



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# BRZDOVÝ SYSTÉM MALÉHO LETADLA S OSTRUHOVÝM PODVOZKEM

BRAKE SYSTEM OF SMALL AIRPLANE WITH TAIL GEAR

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dávid Kubičár

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	<b>Dávid Kubičár</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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

## **Brzdový systém malého letadla s ostruhovým podvozkem**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Navržení brzdového systému na ultralehkém letadle hornokřídle koncepce s ohledem na ergonomické ovládání letadla během poježdění po zemi.

### **Cíle bakalářské práce:**

- 1) Přehled užívaných řešení u brzdových soustav lehkých letadel s ostruhovým podvozkem.
- 2) Návrh vhodného ergonomického řešení.
- 3) Zpracování technické dokumentace.

### **Seznam doporučené literatury:**

ROSKAM, J.: Airplane Design IV :Layout Design of Landing Gear and Systems /Kansas :Roskam Aviation and Engineering Corp.,1989. 416 s.

MERTL, V.: Konstrukce a projektování letadel /Brno :PC-DIR Real,2000. Vyd. 1. 133 s. : il. ISBN 80-214-1789-7

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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



## **ABSTRAKT**

Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh brzdového systému ultraľahkého lietadla. Úvodná časť tejto práce je zameraná na rešeršné štúdia o brzdových sústavách a ich možného ovládania, z hľadiska výhod a nevýhod pre daný typ lietadla, ako aj z pohľadu ergonomicky vhodného usporiadania ovládacích prvkov. Teoretická časť taktiež zahrnuje analýzu zaťaženia pri pristávaní lietadla a rozdelenie hydraulických kvapalín využívaných v brzdovom systéme. V druhej, praktickej časti sa práca zameriava novým konštrukčným návrhom brzdového pedálu, ako aj na výpočet zaťaženia lietadla pri pristávaní a na stanovenie maximálnej brzdnej sily, pri ktorej nedôjde k riziku preklopenia lietadla.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Usporiadanie podvozku, bubnové brzdy, kotúčové brzdy, hydraulický systém, maximálna brzdna sila, hydraulická kvapalina, konštrukčný návrh

## **ABSTRACT**

The purpose of this bachelor thesis is to design a braking system for ultralight aircraft. The introductory part of this work is focused on a research study of brake systems and their possible control, in terms of advantages and disadvantages for a given type of aircraft, as well as in terms of ergonomically appropriate arrangement of controls pedals. The theoretical part also includes the analysis of the load pressure during the landing of the aircraft and the distribution of hydraulic fluids used in the brake system. In the second, practical part, the work focuses on a new design of the brake pedal, as well as on the calculation of the aircraft load during landing and the determination of the maximum braking force at which there is no risk of the aircraft tipping over.

## **KEYWORDS**

Arrangement of chassis, drum brakes, disc brakes, hydraulic system, maximal retarding force, hydraulic fluid, structural design

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

KUBIČÁR, Dávid. *Brzdový systém malého lietadla s ostruhovým podvozkom* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125354>. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Miroslav Šplíchal.



# ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Čestne prehlasujem, že túto bakalársku prácu na tému „Brzdový systém malého letadla s ostruhovým podvozkom“ som vypracoval samostatne, pod odborným vedením vedúceho bakalárskej práce Ing. Miroslava Šplíchala Ph.D., s použitím odbornej literatúry uvedenej v zozname použitých zdrojov.

V Brne dňa 26. júna 2020

.....

Kubičár Dávid





## **POĎAKOVANIE**

Touto cestou by som sa rád poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Miroslavovi Šplíchalovi Ph.D. za odborné rady, ochotu a trpezlivosť počas tvorby tejto práce. Taktiež by som sa rád poďakoval celej svojej rodine za trpezlivosť, pomoc a podporu počas celého doterajšieho štúdia.



## Obsah

Úvod.....	14
1. Typy podvozkov ultraľahkých lietadiel.....	15
1.1. Podvozok s ostrohovým kolesom.....	15
1.2. Podvozok predného typu.....	16
2. Stavebne predpisy.....	16
2.1. Stavebný predpis UL-2.....	16
2.2. Stavebný predpis CS-23.....	17
3. Typy brzdových zostav.....	18
3.1. Bubnové brzdy.....	19
3.2. Jednoduché kotúčové brzdy.....	20
3.2.1. Kotúčová brzda s plávajúcím strmeňom.....	20
3.2.2. Kotúčová brzda s plávajúcím diskom.....	22
3.3. Materiál brzdových kotúčov.....	24
4. Ovládanie brzdového systému.....	25
4.1. Mechanizmy riadenia brzd.....	26
4.2. Sústava dvojitého riadenia.....	28
4.3. Sila pôsobiaca na brzdový pedál.....	29
5. Hydraulický systém.....	31
5.1. Hydrostatický tlak, šírenie tlaku v kvapaline.....	31
5.2. Komponenty hydraulického systému.....	33
5.2.1. Hlavný brzdový valec.....	33
5.2.2. Mechanizmus hlavného valca.....	34
5.2.3. Brzdové valce s integrálnym zásobníkom kvapaliny.....	35
6. Hydraulická kvapalina.....	37
6.1. Druhy hydraulických kvapalín.....	37
6.2. Kompatibilita syntetických a minerálnych kvapalín.....	38
6.3. Kompatibilita hydraulických kvapalín s inými materiálmi.....	38
7. Určenie brzdnych účinkov.....	40
7.1. Určenie brzdnej sily pri maximálnom ťahu motora.....	40
7.2. Rozdelenie zaťaženia na kolesách.....	42
7.3. Rozdelenie zaťaženia pri brzdení.....	44
7.4. Maximálna brzdna sila.....	46

7.5.	Vplyv ďalších vonkajších síl na maximálnu brzdú silu .....	48
7.6.	Maximálna sila pôsobiaca na brzdový pedál pri pristávaní .....	49
8.	Konštrukčný návrh pedálového riadenia brzd .....	51
8.1.	Kontrola držiaka hlavného brzdového valca .....	55
9.	Aplikácia poznatkov na výpočet brzdnej sily .....	56
9.1.	Maximálna sila vyvinutá na brzdový pedál.....	56
9.2.	Výpočet brzdnej sily pri maximálnom ťahu lietadla.....	58
9.3.	Výpočet maximálnej brzdnej sily pri pristávaní. ....	59
9.4.	Návrh dvojitého riadenia brzdových pedálov .....	61
Záver .....		62
Zoznam použitej literatúry a ďalších zdrojov .....		63
Zoznam tabuliek.....		65
Zoznam obrázkov.....		66
Zoznam použitých skratiek a symbolov .....		68
Zoznam príloh.....		70

## Úvod

Táto bakalárska práca sa zaoberá konštrukčným návrhom brzdového systému ultraľahkého lietadla s ostrohovým podvozkom a to hlavne z hľadiska zlepšenia ergonomických podmienok na samotné ovládanie brzdového pedálu.

Prvá časť je venovaná úvodu do problematiky z pohľadu podvozkov využívaných v konštrukcii ultraľahkých lietadiel, leteckým predpisom určujúcim štandardy brzdových systémov lietadiel a rozdeleniu jednotlivých brzdových zostav a ich ovládaniu, a to hlavne z hľadiska ergonomie.

Nasledujúca časť sa zameriava na teoretický postup pri stanovení jednotlivých brzdových účinkov, a to pri maximálnych otáčkach motora a v pristávacej konfigurácii.

V poslednej časti bude popísaný nový konštrukčný návrh ovládania brzdového pedálu a zhodnotenie jeho ergonomických charakteristík v porovnaní s aktuálnym konštrukčným prevedením. Taktiež bude prezentovaný model dvojitého riadenia a jeho porovnanie s inými konštrukčnými možnosťami.

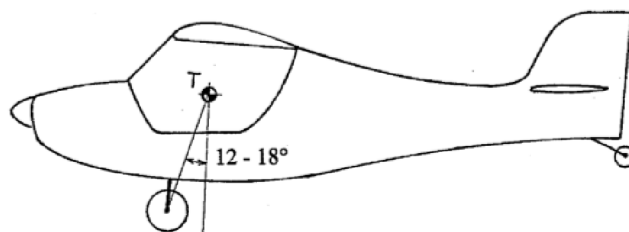
# 1. Typy podvozkov ultraľahkých lietadiel

Pristávacie zariadenie umožňuje lietadlu vzlet a pristátie na pevnú zem alebo vodnú plochu a zároveň musí umožniť pohyb lietadla po zemi a vodnej ploche. V prípade ultraľahkých lietadiel, ktoré nemajú certifikovane letecké motory a riziko núdzového pristátia je vyššie, musí byť konštrukcii pristávacieho zariadenia venovaná zvýšená pozornosť. [1]

Podvozok lietadla tlmí nárazy pri pristávaní a prenáša ich do trupu alebo nosného systému lietadla tak, aby sa namáhanie rozložilo. Lietadlo je vo vodorovnom smere brzdené trením kolies o zem a brzdovým systémom, vo zvislom smere pneumatikami, pružinami a tlmičmi. Základne podmienky zaťaženia podvozku stanovuje predpis UL-2. Pri ultraľahkých lietadlách sa väčšinou využívajú dva koncepty pristávacieho zariadenia a to buď podvozok s ostrohovým kolesom alebo podvozok predného typu. [1]

## 1.1. Podvozok s ostrohovým kolesom

Podvozok s ostrohovým kolesom ma osu hlavných kolies umiestnenú pred ťažiskom lietadla, čím sa prekonáva klopivý moment, snažiaci sa pri pristávaní postaviť letún na hlavu vplyvom trenia kolies po zemi a brzdného momentu. Príliš vysunutý podvozok pred ťažiskom letúna, činí lietadlo pri vzlete ťažkým na chvost a zväčšuje zaťaženie ostrohového kolesa. Naopak, podvozok umiestnený blízko pred ťažiskom lietadla, zväčšuje nebezpečenstvo preklopenia lietadla pri núdzovom pristátí a pri agresívnom použití brzd počas pristávania. To ma za následok, že pri brzdení musí pilot ovládať brzdové pedále opatrne, pričom musí byť v situácii, kedy hrozí preklopenie lietadla, pripravený zatiahnuť výškové riadidlo k sebe, aby vykompenzoval brzdový moment snažiaci sa prevrátiť lietadlo na nos. Spojnica osy podvozkových kolies s ťažiskom lietadla v letovej polohe, má byť sklonená od zvislice prechádzajúcej ťažiskom dopredu o uhol  $12^\circ$  až  $18^\circ$  (Obrázok 1). Výška podvozku musí byť taká, aby koniec vrťuľového listu lietadla mal vo vodorovnej polohe vzdialenosť od zeme najmenej 250 mm. Pokiaľ je to možné, rozchod kolies sa volí čo najväčší, z dôvodu zaručenia lepšej priečnej stability. [1]



Obrázok 1. Podvozok s ostrohovým kolesom [1]

### Výhody podvozku s ostrohovým kolesom

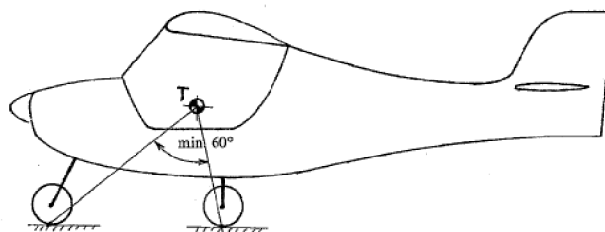
- Zabezpečuje lepšiu manérovateľnosť na zemi pri nízkych rýchlostiach
- Menšia konštrukčná hmotnosť
- Menší aerodynamický odpor
- Lepšie prispôsobenie k pristátiu na trávnatých dráhach
- Jednoduché konštrukčné pripevnenie trupu alebo krídla.
- Jednoduchý mechanizmus riadenia.

## Nevýhody podvozku s ostrohvým kolesom

- Dynamicky nestabilný na zemi
- Zlá smerová kontrola počas pristavania pri silnom bočnom vetre
- Zlý výhľad dopredu z kabíny kvôli vysokému uhlu paluby
- V dôsledku silného brzdenia pri pristávaní môže dôjsť k preklopeniu lietadla na nos
- Náročnejší na pilotáž hlavne pri pristávaní (náchylnejší na odskoky) [2]

## 1.2. Podvozok predného typu

U podvozku predného typu je osa zadných kolies umiestnená za ťažiskom lietadla. Táto vzdialenosť rozhoduje o zaťažení predného kolesa a mala by byť čo najmenšia, avšak zároveň nesmie dôjsť k prevráteniu lietadla dozadu pri nastupovaní posádky. Pri veľkom zaťažení predného kolesa vzniká nebezpečenstvo, že pri núdzovom pristávaní sa predne koleso zaryje do mäkkého terénu, podvozok sa zlomí a lietadlo sa preklopí. Najmenší uhol medzi ťažiskom lietadla a dotykom kolies hlavného podvozku a predného kolesa by mal byť aspoň  $60^\circ$ . Nevýhodou podvozku predného typu je väčší aerodynamický odpor, avšak odstraňuje nevýhody podvozku s ostrohvým kolesom. [1]



Obrázok 2. Podvozok predného typu [1]

## 2. Stavebne predpisy

Pri konštruovaní lietadla a jeho systémov musí konštruktér zaručiť, že jednotlivé navrhnuté systémy budú zodpovedať daným požiadavkám stavebných predpisov. Pri návrhu ultraľahkých lietadiel, ktoré spadajú do kategórie ULL je základným stavebným predpisom predpis UL-2, v ktorom sú presne definované bezpečnostne požiadavky lietadla. V nasledujúcej kapitole budú rozobraté jednotlivé požiadavky na brzdový systém ultraľahkých lietadiel a odvodené vzťahy k výpočtu únosnosti brzd.

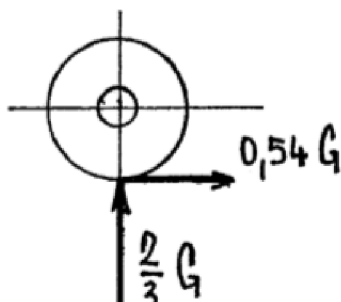
### 2.1. Stavebný predpis UL-2

#### UL 2 § 493 Podmienky zaťaženia pri brzdení

Musí byť preukázané, že brzdenie kolesa podvozku (s pneumatikami a tlmičmi v statickej polohe) vyhovujú zaťaženiu, keď:

- a) zvislé provozné zaťaženie na jedno koleso je  $0,67 G$ ,
- b) vodorovné provozné zaťaženie v mieste dotyku kolesa so zemou je  $0,54 G$  smerom dozadu. [3]





V stavebnom predpise UL-2 nie sú detailnejšie určené podmienky pre brzdný systém ultraľahkých lietadiel, keďže nie je nutné, aby ultraľahké lietadla disponovali brzdami. Či bude alebo nebude lietadlo tohto typu disponovať brzdou jednotkou je výlučne v kompetencii konštruktéra.

Obrázok 3. Zaťaženie brzdeného kolesa [1]

Predpis UL2 taktiež definuje maximálne sily, ktoré nesmú byť pri využívaní nožného riadenia (v našom prípade brzdového pedálu) prekročené. Daná podmienka stanovuje, že sila nožného riadenia v krátkodobej činnosti nesmie presiahnuť hodnotu 400 N. Túto hodnotu budeme brať za maximálnu silu, pri ktorej musí brzdný systém vyvodzovať dostatočnú brzdnú silu. [3]

Aby bolo možné presnejšie určiť požiadavky na brzdný systém z hľadiska absorbovanej kinetickej energie, je možné použiť predpis CS 23 alebo výňatok z britských predpisov 14 CFR 23.735 Brakes, ktoré sú ekvivalentné.

## 2.2. Stavebný predpis CS-23

Z tohto predpisu použijeme výňatok CS 23.735 Brzdy, v ktorom je uvedené:

- a) Letún musí disponovať brzdami. Schopnosť pohltienia brzdnjej kinetickej energie brzdovej sústavy každého kolesa hlavného podvozku nesmie byť menšia, než vyplýva z požiadaviek na pohltienie kinetickej energie stanovených niektorou z nasledujúcich metód:
  - 1) Požiadavky na absorbovanie brzdnjej kinetickej energie musia byť založené na racionálnom a konzervatívnom rozbere postupných udalostí predpokladaných behom pristávania pri návrhovej pristávacej hmotnosti.
  - 2) Namiesto racionálneho rozboru môžu byť požiadavky na pohltienie kinetickej energie u brzdovej sústavy každého kola hlavného podvozku odvodené podľa nasledujúceho vzorca:

kde:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \frac{m \cdot V^2}{N} \quad (1.)$$

$E_{kin}$  = kinetická energia na koleso (Joule)

$m$  = návrhová pristávacia hmotnosť (kg);

$V$  = rýchlosť lietadla v m/s.  $V$  nesmie byť menšia než  $V_{SO}$  – pádová rýchlosť pri voľnobežných otáčkach motora v nulovej nadmorskej výške, pri navrhutej pristávacej rýchlosti a v pristávacej konfigurácii;

$N$  = počet kolies hlavného podvozku s brzdami.

- b) Brzdy musia byť schopné zabrániť otáčaniu kolies a rozbehnutiu na spevnenej rozjazdovej dráhe pri vzletovom výkone motora, ale nemusia zabrániť pohybu lietadla so zablokovanými kolesami.
- c) Pri stanovení dĺžky pristátia podľa CS 23.75 nesmie tlak v brzdovej sústave kolies prekročiť tlak stanovený výrobcom brzd. [4]

**Brzdový systém je teda konštruovaný tak aby boli splnene nasledovné podmienky:**

- Brzdová sila vyvinutá brzdovým systémom by mala zabrániť otáčaniu kolies a rozbehnutiu na spevnenej rozjazdovej dráhe pri vzletovom výkone motora
- Brzdový systém by mal zaručiť spomalenie lietadla na danej drahé v rozumnom čase pri maximálnej sile pôsobiacej na brzdový pedál o hodnote 400N

### 3. Typy brzdových zostav

V minulosti prvé skonštruované lietadlá nemali zabudovaný brzdový systém na spomalenie a zastavenie lietadla na zemi. Namiesto toho sa spoliehali na malé rýchlosti pri pristávaní, mäkké povrchy letísk a trenie vyvinuté chvostom, aby znížili rýchlosť počas pozemnej prevádzky. [5]

Brzdové systémy určené pre lietadlá sa stali bežnými po prvej svetovej vojne, keď sa zvýšila rýchlosť a zložitosť lietadiel a rozširovalo sa používanie hladkých spevnených povrchov vzletových a pristávacích dráh. V dnešnej dobe sú lietadlá väčšinou vybavené brzdovým systémom, aj keď pri ultraľahkých lietadlách to nie je podmienkou. Ich spoľahlivé fungovanie zaručuje bezpečnú prevádzku lietadla na zemi. Hlavnou úlohou brzdového systému je spomaliť lietadlo a zastaviť ho v primeranom čase. Počas nábehu motora držia lietadlo v pokoji a v mnohých prípadoch riadia lietadlo počas pojazdu po dráhe. Na väčšine lietadiel je každé z hlavných kolies vybavené brzdovou jednotkou. Čelné alebo zadné koleso nedisponujú brzdovou jednotkou. [5]

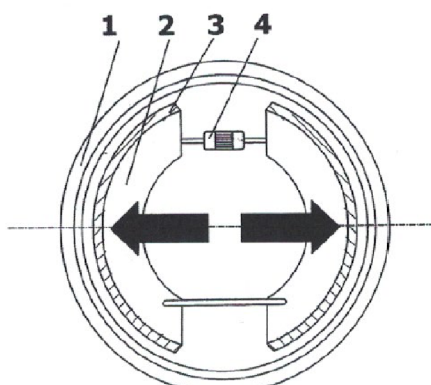
V dnešnej dobe sú pri ultraľahkých lietadlách rozšírené predovšetkým dva typy brzdových systémov. Kotúčové brzdy sú využívané najčastejšie z dôvodu nenáročnej konštrukcie, zatiaľ čo bubnové brzdy sa používali na starších typoch lietadiel a v dnešnej dobe sa dostávajú do úzadia. [5]



Obrázok 4 Jednoduchá kotúčová brzda

### 3.1. Bubnové brzdy

Bubnové brzdy sa používali v lietadlách všetkých veľkostí vyrobených v 30. - 50. rokoch 20. storočia, no ojedinele sa využívajú dodnes. Bubnová brzda je znázornená na Obrázku 4. Bubnová brzda je ľahká nízkotlaková brzda, priskrutkovaná na prírubu nápravy a uložená v brzdovom bubne. Čeluste a ovládací mechanizmus bubnovej brzdy je uchytený na doske pevne spojenou s prírubou nápravy. Brzdové čeluste potom pôsobia na brzdový bubon, ktorý je súčasťou náboja kolesa a otáča sa spolu s kolesom. Roztvárajúce sa brzdové čeluste tlačia pri brzdení na vnútorný povrch brzdového bubna a tým navodzujú trenie, čo vedie k spomaľovaniu kolesa. Ovládanie bubnových brzd bolo v minulosti uskutočnené pomocou lán, no v súčasnosti sa ovládanie brzd uskutočňuje hydraulickým systémom. [5] [6]



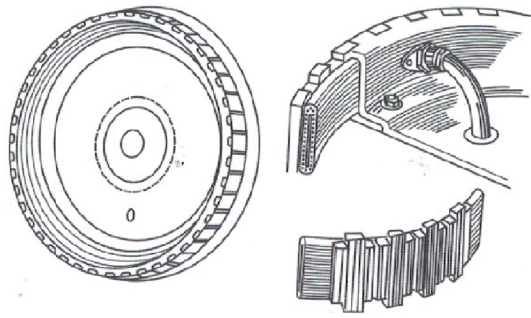
Obrázok 5. Bubnová čelust'ová brzda [6]

- 1- Brzdový bubon, 2- brzdová čelusť,
- 3- brzdové obloženie, 4- brzdový valček

Použitie brzd vytvára značne teplo trením. Množstvo generovaného tepla závisí od faktorov ako napr. hmotnosť lietadla, rýchlosť pri brzdení, efektívnosť premeny trenia na teplo alebo oblasť trenia. Rozdiel vzniku tepla pri bubnových a diskových brzdách je zrejmý. Najväčšia nevýhoda bubnových brzd je, že odvádzajú teplo ďaleko menej efektívne ako kotúčové brzdy. Zatiaľ čo kotúčová brzda je chladená obtekajúcim prúdom vzduchu, bubnová brzda absorbuje celkovo generované teplo do materiálu brzdy, ktoré je následne odvádzané do okolia. Z tohto dôvodu pri dlhom alebo opakovanom intenzívnom brzdení klesá u bubnových brzd brzdny účinok a to následkom poklesu súčiniteľa trenia medzi obložením a bubnom pri vysokej teplote, prípadne následkom tepelných deformácií čelustí a bubnu. [5] [6]

Výhodou bubnových brzd je ich nižšia potreba na údržbu a menšia náchylnosť vniknutia nečistôt medzi brzdové čeluste a bubon. Keďže vnútro brzdy nie je vystavené vonkajším podmienkam, znižuje sa vplyv korózie na jednotlivé súčasti brzdy. [5]

Dušíčková brzda, zobrazená na obrázku 6, v staršej literatúre označovaná ako komorová brzda, je špeciálny typ bubnovej brzdy používanej v letectve. U tohto typu sú brzdové obloženia – brzdové špalíky ovládané dušíčkou. Brzdeným prvkom je opäť bubon, ktorý je pevne spojený s nábojom kolesa. Na rozdiel od čelust'ovej bubnovej brzdy trenie potrebné k brzdeniu nevytvárajú čeluste, ale gumená duša, ktorej rozpínavosť je regulovaná prívodom vzduchu alebo hydraulického kvapaliny. Tento druh brzdy sa už dnes skoro nepoužíva a patrí v podstate histórii. [6]



Obrázok 6. Dušičková (komorová) brzda [6]

### 3.2.Jednoduché kotúčové brzdy

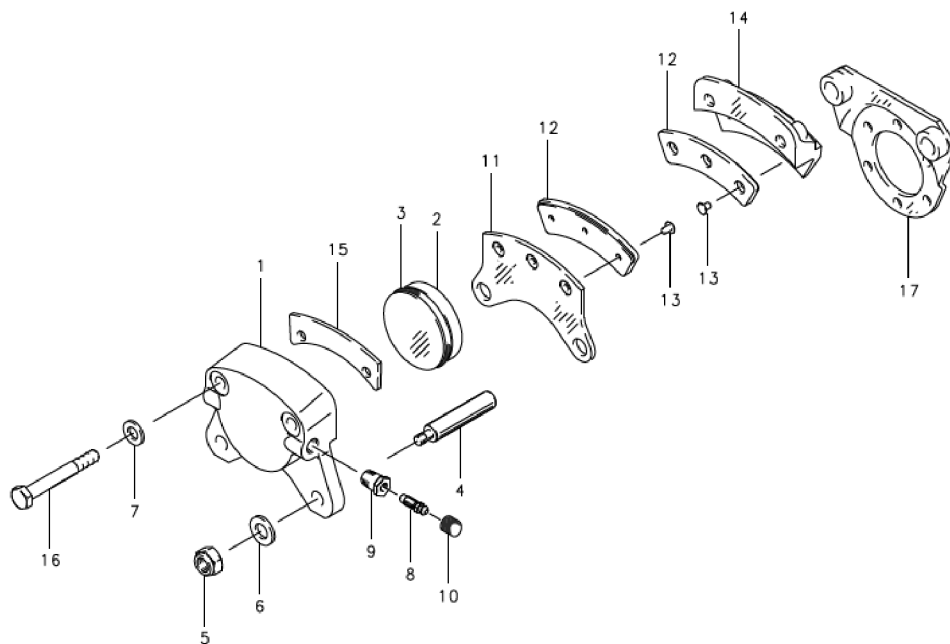
Moderné lietadlá zvyčajne používajú kotúčové brzdy. Kotúč je pevne spojený s nábojom otáčajúceho sa kolesa, zatiaľ čo stacionárny strmeň je pripevnený k rámu podvozku a pôsobí trením proti rotácii disku. Veľkosť, hmotnosť a rýchlosť pristátia lietadla ovplyvňujú konštrukciu a zložitosť systému kotúčovej brzdy. Jednoduché, duálne a viac kotúčové brzdy patria k najbežnejším typom používaných brzd. Segmentové rotorové brzdy sa používajú na veľkých lietadlách. Nahradili komorové brzdy, ktoré boli spomenuté v predošlej kapitole. V prípade malých a ľahkých lietadiel sa zvyčajne dosahuje účinné brzdenie pomocou jedného brzdového disku, ktorý je namontovaný na každom kolese hlavného podvozku. [5]

Jednoduché kotúčové brzdy možno rozdeliť na dva hlavné typy:

- Kotúčová brzda s plávajúcim strmeňom
- Kotúčová brzda s plávajúcim diskom

#### 3.2.1.Kotúčová brzda s plávajúcim strmeňom

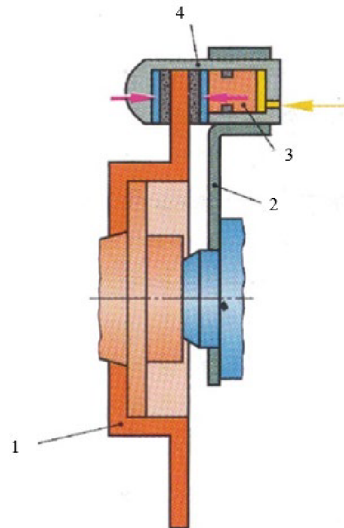
Aby sa dosiahlo požadované trenie a zároveň konzistentné opotrebenie brzdneho obloženia, musí byť na oboch stranách brzdového kotúča aplikovaný rovnomerný tlak. Pri použití kotúčovej brzdy s plávajúcim strmeňom to je možné dosiahnuť pevným spojením kotúča s kolesom a umožnením postranného plávania brzdového strmeňa. Táto konštrukcia brzdového mechanizmu je najrozšírenejšou verziou u ľahkých lietadlách. Rozložený podrobný pohľad na tento typ brzdy je zobrazený na obrázku 7. [5]



Obrázok 7. Podrobný pohľad na kotúčovú brzdú s plávajúcim strmeňom [8]

1- Pracovný valec, 2-Pracovný piest, 3-O-krúžok, 4-Vodiaci kolík,5- Matica, 6,7-Podložky, 8.-Odvzdušňovacia skrutka, 9.-Uloženie od vzdušňovacej skrutky, 10-Kryt, 11-Prítlačná doska, 12-Brzdové platničky, 13-Nity, 14-Zadná doska, 15- Klin, 16- Skrutka, 17- Torzná doska

Konštrukcia s pevným diskom a plávajúcim strmeňom umožňuje brzdovému strmeňu a brzdovým platničkám (12) upravovať polohu voči disku. Jedná brzdová platnička je upevnená k prítlačnej doske a druhá brzdová platnička k zadnej doske(14). Dva vodiace kolíky (4), ktoré prechádzajú prítlačnou doskou, sú uložené v brzdovom strmeni tak, aby nebol zamedzený ich axiálny pohyb. Vodiace kolíky sa môžu voľne posúvať dovnútra a von z puzdier v torznej doske(17), ktorá je nehybne pripevnená k prírubu nápravy. Celá zostava brzdového systému je následne uchytená k zadnej doske, ktorá je pevne spojená s torznou doskou, čo vedie k pripevneniu zostavy okolo disku. Pri pôsobení tlaku, piest (2) tlačí brzdovú platničku k brzdovému kotúču a na druhej strane reakčná sila posúva strmeň, ktorý pritláča druhú brzdovú platničku na vnútornú stranu kotúča. Strmeň a brzdové platničky sa sústreďia na disk prostredníctvom vodiacich kolíkov v puzdriach torznej dosky To poskytuje rovnaký tlak na obe strany disku čím sa spomalí jeho rotácia. Tento spôsob brzdenia je zobrazený na obrázku 8. [5] [7]



Obrázok 8. Plávajúci strmeň [7]

1-brzdový kotúč, 2- torzná doska, 3- pracovný piest,  
4- plávajúci strmeň

Jedinečnou vlastnosťou kotúčovej brzdy s plávajúcim strmeňom je , že brzdové obloženia je možné vymeniť bez demontáže kolesa. Na uvoľnenie brzdového strmeňa zo zadnej dosky stačí, aby sa vodiace kolíky vysunuli z puzdiar torznej dosky. Celá zostava strmeňa je potom voľná a poskytuje prístup ku všetkým komponentom. [5]

Požiadavky na údržbu všetkých jednokotúčových brzdových systémov sú podobné požiadavkám na brzdové systémy akéhokoľvek typu. Vyžaduje sa pravidelná kontrola prípadných poškodení a opotrebenia obložení a diskov. Po výmene opotrebovaných častí nad rámec limitov je vždy vykonaná prevádzková kontrola. Kontrola sa vykonáva pri rolovaní lietadla. Brzdzenie každého hlavného kolesa by malo byť rovnaké a pri použití by mali byť pedále pevné, bez mŕtvych chodov. Po uvoľnení tlaku na pedál by sa brzdy mali uvoľniť bez akéhokoľvek odporu. [5]

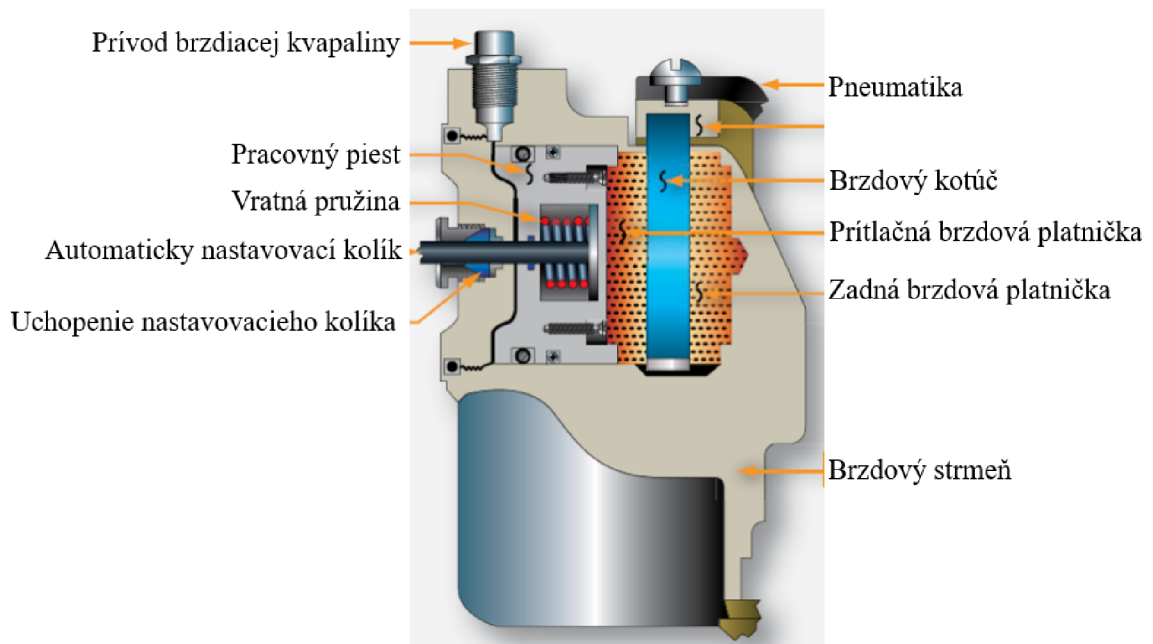
### 3.2.2. Kotúčová brzda s plávajúcim diskom

Kotúčová brzda s plávajúcim diskom, znázornená na obrázku 9, pracuje na skoro rovnakom princípe ako kotúčová brzda s plávajúcim strmeňom. Rozdiel spočíva v tom, že brzdový kotúč je pripevnený na náboji kolesa pomocou drážkovania. Drážkovanie prenáša radiálne zaťaženie od tretej sily brzdových segmentov no zároveň umožňuje axiálny pohyb brzdového kotúča na náboji kolesa. Pri pôsobení sily na brzdový pedál, sa pomocou hydraulického kvapaliny v hydraulickom systéme brzdy prenesie tlak k pracovnému valcu. Pracovný valec pritláča brzdové segmenty k vonkajšej strane rotujúceho disku. Po vymedzení vôle z vonkajšej strany brzdového kotúča, sa brzdový disk vplyvom pôsobiacej sily od pracovného valca mierne zasunie v axiálnom smere až kým sa vnútorné brzdové obloženie nenachádza vo styku s diskom. Výsledkom je pomerne rovnomerné trenie aplikované na každú stranu disku a rotačný pohyb sa tým spomalí. [5]



Obrázok 9. Kotúčová brzda s plávajúcim diskom [5]

Pri uvoľnení brzdového tlaku vratná pružina tlačí pracovný piest späť od disku. Pružina poskytuje vopred nastavenú vôľu medzi brzdovou doštičkou a diskom. Funkcia samočinného nastavovania brzdy (obr.10) zachováva rovnakú vôľu bez ohľadu na mieru opotrebenia brzdového obloženia. Nastavovací kolík na zadnej strane každého piestu sa pohybuje spolu s piestom pomocou trecej svorky. Keď je brzdový tlak uvoľnený, sila vratnej pružiny je dostatočná na to, aby posunula piest späť od brzdového kotúča, ale nestačí na to, aby posunula nastavovací kolík, držaný trením úchopu čapu. Piest sa zastaví, keď sa dotkne hlavy nastavovacieho kolíka. Teda bez ohľadu na mieru opotrebenia je na zabrzdzenie potrebná rovnaká dráha piestu. Driek čapu vyčnievajúci cez hlavu piestu, slúži ako indikátor opotrebenia. Informácie o údržbe výrobcu uvádzajú minimálnu dĺžku čapu, ktorý musí vyčnievať, aby sa brzdy považovali za spôsobilé na let. [5]



Obrázok 10. Samočinné nastavovanie brzdy (upravené) [5]

### 3.3. Materiál brzdových kotúčov

Pri brzdení lietadla dochádza v dôsledku trenia medzi brzdovým kotúčom a brzdovým obložením k premene kinetickej energie sústavy v teplo. Brzdové kotúče a brzdové obloženia teda musia byť vyrobené z materiálov, ktoré zaručujú funkčnosť brzdového systému aj pri zvýšených teplotách. Brzdové kotúče sa začiatkom vyrábali z ocele, neskôr z berýlia za účelom znížiť hmotnosť brzdového systému a neskôr boli nahradené karbónovými brzdovými kotúčmi. V prípade ultraľahkých lietadiel, sa dodnes využívajú brzdové kotúče vyrobené z ocele, ktorá predstavuje kompromis medzi hmotnosťou a brzdovými charakteristikami. Pre výpočet vzniknutého tepla trením a jeho vplyvu na materiál brzd je potrebné poznať charakteristické vlastnosti materiálu ako hustotu  $\rho$ , mernú tepelnú kapacitu  $c$  a tepelnú vodivosť materiálu  $\lambda$ . V tabuľke 1 sú uvedené približné hodnoty použitého materiálu brzdového kotúča. [5] [9]

Tabuľka 1. Fyzikálne charakteristiky ocele brzdových kotúčov [10]

$\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ]	$c$ [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	$\lambda$ [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
7800	460	51

Z dôvodu zjednodušenia, budeme uvažovať, že vzniknuté teplo bude pohltene iba brzdovým kotúčom. Pre výpočet ohrevu kotúča  $\Delta T$  použijeme obyčajnú kalorimetrickú rovnicu, v ktorej sa nahradí teplo  $Q$  za kinetickú energiu. Počíta sa s hmotnosťou redukovaného brzdového kotúča  $m_{RK}$  o ploche  $S'$ , ktorá je definovaná vnútorným a vonkajším polomerom brzdovej doštičky (medzikružím). [10]

$$Q = c \cdot m_{RK} \cdot \Delta T \quad (2.)$$

Vyjadrením  $\Delta T$  a dosadením  $Q = E_{kin}$  dostaneme:

$$\Delta T = \frac{E_{kin}}{c \cdot m_{RK}} \cdot \frac{1}{2} \quad (3.)$$

Vypočítaná hodnota ohrevu brzdového kotúča je však iba teoretická a slúži na odhad tepelného zaťaženia brzdového kotúča. Reálna hodnota bude z dôvodu ďalších vonkajších faktorov, ktoré znižujú kinetickú energiu lietadla (aerodynamický odpor, trenie kolies, prenos tepla do ďalších komponentov brzd, chladenie obtekajúcim vzduchom) nižšia, avšak pri pristávaní na vysokých rýchlostiach môže dôjsť k prekročeniu hodnoty  $\Delta T$ .

Pri kontakte otáčajúceho sa brzdového kotúča s brzdovým obložením vzniká trecia sila, ktorá je závislá na prítlačnej sile, ktorou sú brzdové segmenty pritlačované k brzdovému kotúču a na koeficiente dynamického trenia alebo statického trenia. Koeficient dynamického trenia  $\mu_{DB}$  medzi brzdovým obložením a brzdovým kotúčom sa pohybuje v rozmedzí od 0,35 až 0,50. [11]

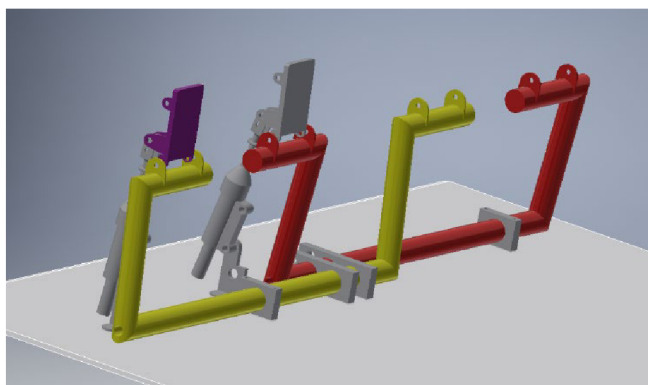


## 4.Ovládanie brzdového systému

Ovládanie brzdového systému je prevedene zväčša pomocou pedálu. Konštrukcia a umiestnenie brzdového pedálu môžu mať rôzne prevedenia. Pri umiestnení pedála musí byť však za každých okolností zaručená ergonómia tak, aby pri maximálnych výchylkách smerových kormidiel bolo vždy možné vyvinúť potrebnú silu vyvodzujúcu brzdný účinok. Brzdový pedál je možné ovládať buď hornou časťou nohy- špičkou alebo pätou.

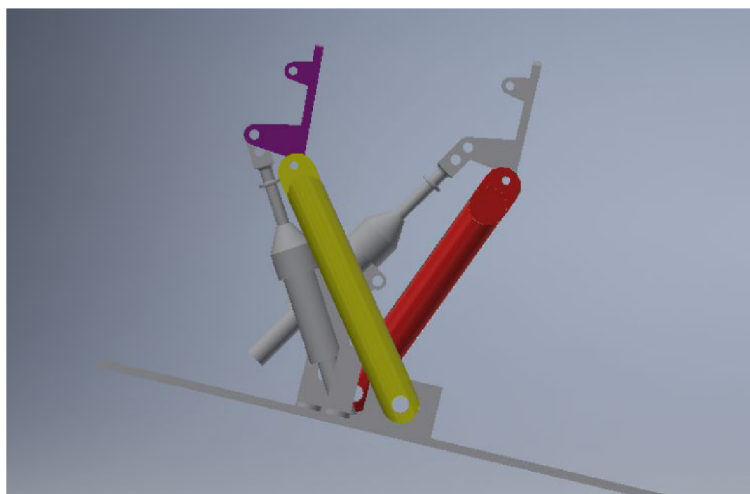
### Ovládanie brzdového systému špičkou

Ovládanie brzdového systému pomocou špičky, je najčastejšie využívaná koncepcia vyvodzovania brzdnéj sily na brzdový systém. Jeho možné prevedenie je znázornene na Obrázku 11.



Obrázok 11. Ovládanie brzdových pedálov cez špičku

Pre docielenie správnej ergonomie pedála v krajných výchylkách smerového kormidla, je často využívaný mechanizmus paralelogramu. Ten umožňuje nezávisle natáčanie pedálu okolo vlastnej osy, ktoré nezávisí od polohy natočenia smerového kormidla. Brzdový pedál sa teda v každom okamihu výchylky smerového riadenia nachádza v rovnakom sklone vzhľadom k pilotovi. Maximálna výchylka smerového kormidla a poloha brzdových pedálov je znázornená na Obrázku 12.



Obrázok 12. Poloha brzdových pedálov v maximálnych výchylkách smerového kormidla

Výhodou konštrukcie pedála ovládaného špičkou je schopnosť znásobovať pôsobiacu silu na pedál pomocou páky, čo vedie k zväčšeniu sily pôsobiacej na hlavný brzdový valec. Z hľadiska ergonómie je táto vlastnosť veľmi dôležitá, keďže v ultraľahkých lietadlách sa nevyužívajú násobiče (posilňovače) brzdnej sily. Popis znásobenia sily bude vysvetlený nižšie.

### **Ovládanie brzdového systému pätou**

Koncepcia brzdového systému brzdeného pätou, je využívaná v menšej miere. Možné prevedenie je znázornené na Obrázku 13.



Obrázok 13. Brzdový systém ovládaný päťami

Nevýhodou tejto koncepcie je absencia pákového znásobenia sily a horšie ergonómické podmienky. Plocha brzdového pedála sa nenatáča nezávislo od smerového kormidla, čo môže viesť k zlej manipulácii brzd pri maximálnych výchylkách smerového kormidla.

### **Ovládanie brzdového systému pomocou rozdeľovača**

Tento typ brzdového systému využíva brzdny rozdeľovací ventil. Rozdeľovací kohút je obvykle trojcestný ventil, ktorý je skonštruovaný tak, aby hydraulická kvapalina mohla voľne prúdiť do spätnej vetvy (keď je hydraulicky valec v nečinnosti) alebo na jednu či druhú stranu pracovného valca. Rozdeľovací kohút je prepojený so smerovým kormidlom. Pri zatlačení pravého smerového kormidla sa tlak pomocou rozdeľovača usmerní do časti hydraulického prepojenia pravého kolesa a koleso je nezávisle od ľavej strany príbrzdované. Pri použití ľavej smerovej výchylky je pravý hydraulický okruh uzavretý a tlak kvapaliny sa šíri v ľavej časti hydraulického prepojenia ľavej strany kolesa. Brzdna sila je vyvíjaná pákou ovládanou rukou.

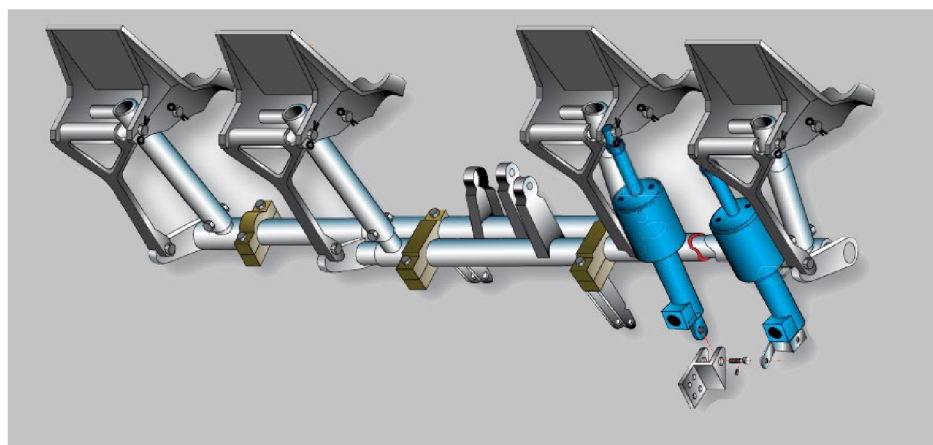
## **4.1. Mechanizmy riadenia brzd**

Sústava riadenia slúži k prenosu riadiacich činností z riadidiel na riadiace orgány. Systém riadenia môže byť prevedený pomocou mechanického riadenia, ktoré zahŕňa lanové a tiahlové riadenie, alebo hydraulického riadenia. [6]

### **Sústava mechanického riadenia- tiahlové riadenie**

Sústava tiahlového riadenia je sústava, v ktorej sa pre prenos riadiacich činností z riadidiel na riadiace orgány používajú tiahla. Riadiace tiahla sú spravidla vyrobené z duralových trubiek a sú opatrené koncovkami nesúcimi guľôčkové ložiská, ktoré slúžia na zamedzenie trenia v riadiacom okruhu. Tiahlova sústava sa skladá z riadiacich tiahli a ich koncoviek, vahadiel,

pák a uhlových pák. Výhodou tiahloveho riadenia je jeho nenáročná konštrukcia a nízka poruchovosť. Nevýhodou je jeho vyššia hmotnosť a v niektorých prípadoch nedostatočná tuhosť, čo môže viesť k určitej vôle riadenia. [6]

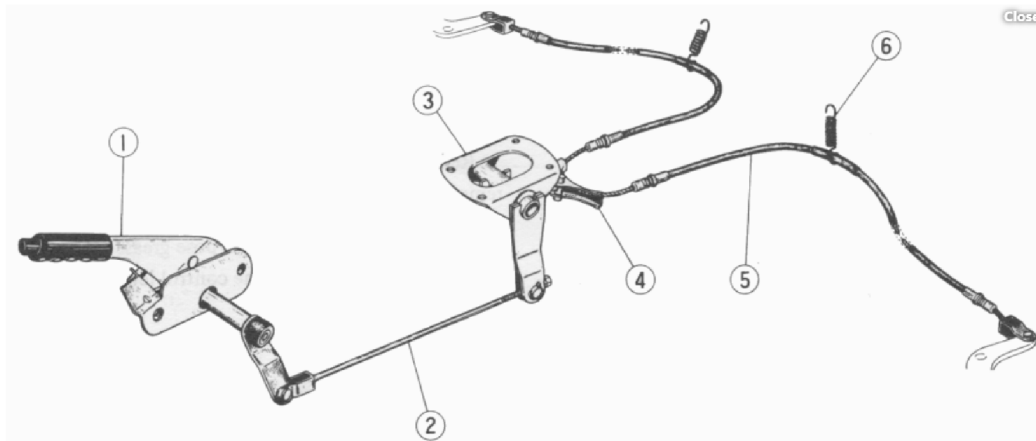


Obrázok 14. Systém riadenia tiahlom (upravené) [5]

### **Sústava mechanického riadenia- lanové riadenie**

Sústava lanového riadenia je sústava, ktorá na prenos riadiacich činností z riadidiel na riadiace orgány využíva systém lán, napínakov, kladiek a vodidiel. Minimálny priemer lanka, použitého na riadenie je stanovený stavebnými predpismi. Riadiace lanka tvoria vlastne uzavreté okruhy pričom je nutne, aby každý samostatný okruh bol vybavený napínakom. Napínaky lan musia byť zaistene tak, aby nemohlo dôjsť k samovoľnému uvoľneniu lán. Predpätie lán je totiž veľmi dôležité z hľadiska vymedzenia mŕtvych chodov v riadení a zároveň znižuje nepriaznivé vplyvy teploty na dilatáciu lán. [6]

Riadenie lanom sa v leteckom priemysle využíva hlavne na ovládanie riadiacich plôch lietadla. Ovládanie brzdového systému pomocou lán sa v súčasnosti už nepoužíva, avšak v minulosti alebo v starších typoch lietadiel, disponujúcich bubnovými brzdami, bol využívaný tento typ mechanického ovládania predovšetkým ako ručná brzda, fungujúca na rovnakom princípe ako ručná brzda na osobných automobiloch. Obrázok 15.

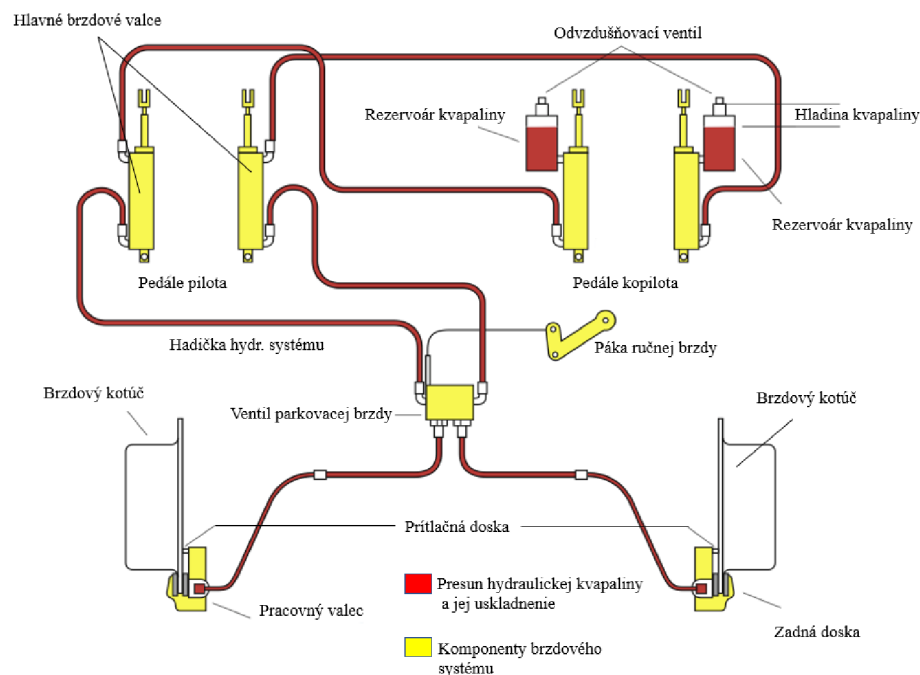


Obrázok 15. Sústava lanového riadenia (upravené) [12]

1- Ovládacia páka, 2- Spojovacie tiahlo, 3- Centrálna páka, 4- Vodidlo, 5- Brzdové lano, 6- pružina

### Sústava hydraulického riadenia

Sústava hydraulického riadenia kormidiel je využívaná iba v prípade väčších lietadiel, ktoré disponujú hydraulickým systémom. Malé a ultraľahké lietadla síce nevyužívajú hydraulický systém na riadenie riadiacich plôch, ale môžu využívať integrálny hydraulický systém na riadenie brzd a vzájomného prepojenia brzdových pedálov (Obrázok 16).

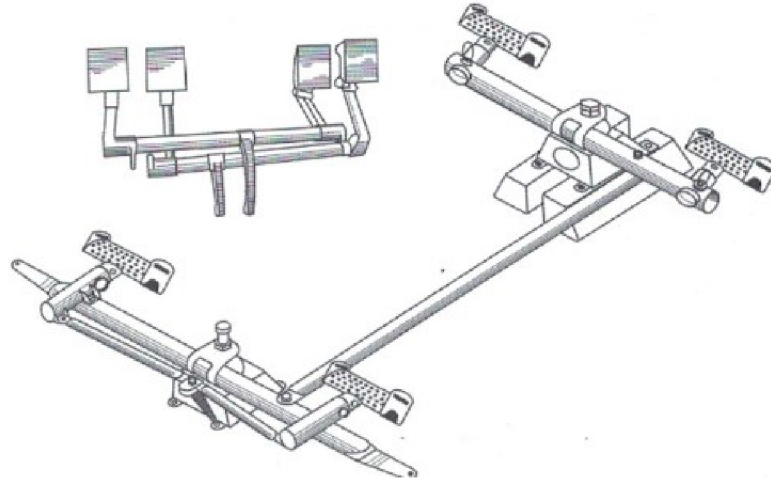


Obrázok 16. Sústava hydraulického riadenia brzd (upravené) [13]

## 4.2. Sústava dvojitého riadenia

Jedným z hľadísk, podľa ktorého sa posudzujú sústavy riadenia je počet miest z ktorých je možné lietadlo ovládať. V praxi sa systémy riadenia delia na jednoduché a dvojité systémy riadenia.

Sústava dvojitého riadenia je sústava riadenia umožňujúca ovládanie riadidiel z dvoch sedadiel. Sústavy dvojitého riadenia sú vždy prispôbena polohe sedadiel v lietadle. Z tohto hľadiska sa jedna o dvojité riadenie so sedadlami vedľa seba a so sedadlami za sebou. Rovnako ako u jednoduchého riadenia, je u oboch prípadoch dvojitého riadenia možné použiť jak tiahlovú, lanovú, tak hydraulickú sústavu riadenia brzd a riadiacich plôch. [6]



Obrázok 17. Dvojité nožne riadenie - za sebou a vedľa seba

### 4.3. Sila pôsobiaca na brzdoý pedál

Geometria brzdoého pedála hrá dôležitú úlohu pri fungovaní brzdoého systému. Na optimálne brzdenie musí hlavný brzdoý valec dodať pracovnému valcu správny tlak a objem kvapaliny. Pri použití manuálneho ovládania, kde nie je využitý žiadny element násobenia sily (posilňovač), môžeme brzdoý pedál pri vhodnom uložení a ergonomickom tvare využiť ako násobič sily. Pri výpočte výslednej sily pedála pôsobiacej na hlavný brzdoý valec vyjdeme z momentovej rovnice, pričom jednotlivé parametre pedála môžeme odčítať z prílohy 1.

Momentová rovnica k ose otáčania pedálu (obrázok 18.) je vyjadrená rovnicou:

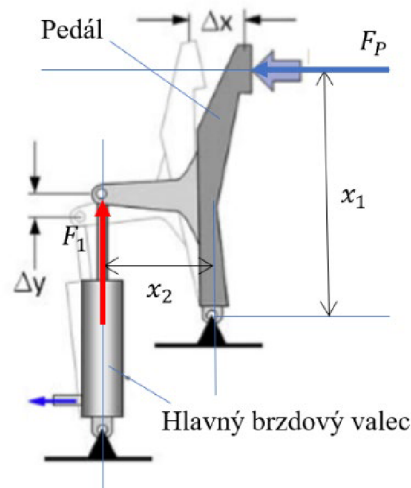
$$M_1 = F_p * x_1 - F_1 * x_2 \quad (4.)$$

Kde:  $F_{pmax}$ ... sila posobiaca na pedál

$F_1$ ... sila pôsobiaca na hlavný brzdoý valec

$x_1$ ... zvisla vzdialenosť sily  $F_p$  od osy otáčania

$x_2$ ... vodorovna vzdialenosť sily  $F_1$  od osy otáčania



Obrázok 18. Pôsobenie síl na pedál (upravené) [2]

Zo statickej rovnováhy vyplýva:

$$M_1 = 0$$

$$F_p * x_1 = F_1 * x_2$$

Vyjadríme  $F_1$ :

$$F_1 = F_p * \frac{x_1}{x_2} \quad (5.)$$

Silu  $F_p$  môžeme určiť z grafu v prílohe 2, ktorý zohľadňuje posed pilota a jeho fyzickú predispozíciu na vyvinutie sily na pedál.

Z uvedeného grafu vyplýva, že sila, ktorú je pilot schopný vyvinúť na brzdový pedál je závislá od samotného posedu pilota, ktorý určuje uhol  $\alpha$  medzi stehnom a vodorovnou hladinou a uhol  $\beta$  medzi stehnom a podkolennou časťou nohy. Sedadlo pilota a umiestnenie riadiacich prvkov teda musí zaručovať, aby bol pilot schopný pri rôznych výchylkách riadidiel vyvinúť dostatočnú silu na ich ovládanie. Zároveň musí byť zohľadnená podmienka z predpisu UL2, čo znamená, že maximálna sila, daná fyzickou predispozíciou a posedom pilota, musí byť väčšia ako limitná sila 400 N stanovená predpisom. Musí byť teda zaručené, že pilot bude sedieť v konfigurácii, v ktorej bude schopný vyvolať minimálnu silu na brzdový pedál o veľkosti 400 N.

## 5. Hydraulický systém

Hydraulické systémy slúžia na prenos energie z jedného miesta na iné. Vyznačujú sa tým, že na plnenie tejto funkcie využívajú tekutiny (kvapalina alebo vzduch). V hydraulickom systéme brzd, sa ako prenosné médium používa hydraulická kvapalina, o ktorej budeme uvažovať, že je nestlačiteľná.

### 5.1. Hydrostatický tlak, šírenie tlaku v kvapaline

Fyzikálnym základom hydraulických systémov je konštantné šírenie tlaku v kvapalinách, ktorý je definovaný Pascalovým zákonom: „Tlak pôsobiaci v danom mieste kvapaliny sa šíri všetkými smermi konštantne a nezávisí na sklonu plochy, tzn. že tlak je skalárna veličina“. [15]

Tlak môžeme definovať ako pôsobiacu silu na jednotku plochy:

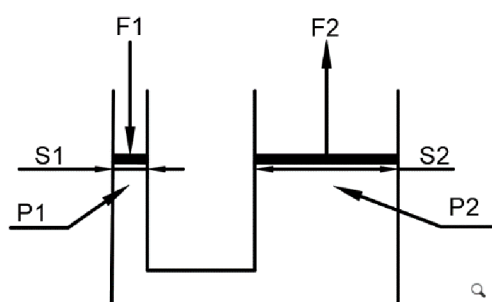
$$P = \frac{F}{S} \quad (6.)$$

Kde: P... tlak (Pa,kPa)

F... sila pôsobiaca na plochu (N)

S... plocha, na ktorú pôsobí daná sila (m<sup>2</sup>)

Praktickou aplikáciou Pascalovho zákona je hydraulický lis znázornený na Obrázku 19. Hydraulický lis funguje na rovnakom princípe ako hydraulické brzdy. [16]



Obrázok 19. Znázornenie Pascalovho zákona pomocou hydr. lisu

Z Pascalovho zákona je zrejmé, že tlak pod piestom 1 je rovnako veľký ako tlak pod piestom 2, čo môžeme vyjadriť ako:

$$P_1 = P_2 \quad (7.)$$

Kde: P<sub>1</sub>... tlak v hlavnom valci

P<sub>2</sub>... tlak v brzdovom valci

Tlak sme definovali ako silu pôsobiacu na plochu. Použitím Rovnice 1 môžeme písať:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \quad (8.)$$

Kde:  $F_1$ ... sila pôsobiaci na hlavný valec

$S_1$ ... obsah plochy hlavného valca

$F_2$ ... výsledná sila pôsobiaci na brzdové segmenty

$S_2$ ... plocha brzdového valca

Úpravou Rovnice 3 dostaneme:

$$F_2 = F_1 * \frac{S_2}{S_1} \quad (9.)$$

Z uvedeného vzťahu vyplýva, že výsledná sila pôsobiaci na brzdové segmenty závisí od pomeru plôch hydraulických valcov. Plochy valcov  $S_1$  a  $S_2$  sú uvedené v technických parametroch výrobcu.

Závislosť zdvihu pedálu a zdvih brzdového strmeňa je závislí na transferu, prenosi kvapaliny z jedného valca do druhého. Za predpokladu, že kvapalina je nestlačiteľná a použitím zákona zachovania objemu môžeme napísať:

$$\Delta l_1 * S_1 = \Delta l_2 * S_2 \quad (10.)$$

Kde:  $\Delta l_1$ ... posun (zdvih) hlavného valca na pedále

$\Delta l_2$ ... posun brzdného piestu strmeňa

Po úprave dostaneme:

$$\Delta l_2 = \Delta l_1 * \frac{S_1}{S_2} \quad (11.)$$

Z čoho vyplýva, že posun brzdového valca strmeňa je menší ako posun hlavného brzdného valca pedálu, čo vedie k lepšej ovládateľnosti brzdového pedálu a lepšej citlivosti brzd. Medzi brzdovými segmentmi a brzdovým kotúčom je medzera, ktorá umožňuje voľne otáčanie brzdového kotúča spolu s kolesom, ak nie je na brzdový systém vyvíjaná žiadna sila. To znamená, že pôsobenie sily na brzdový kotúč nenastáva hneď po zatlačení pedála, ale až po vymedzení tejto vôle. Na stanovenie posunu hlavného valca, aby došlo k vymedzeniu vôle medzi brzdovým obložením a kotúčom môžeme použiť vzťah:

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 * \frac{S_2}{S_1} \quad (12.)$$



## 5.2. Komponenty hydraulického systému

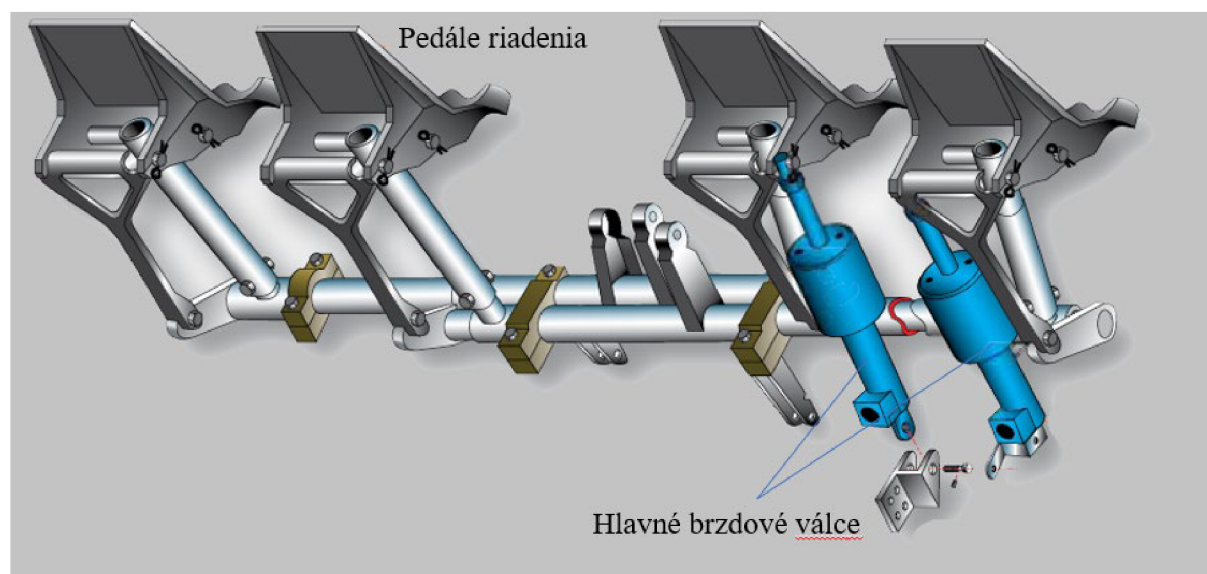
Rôzne brzdové sústavy opísané v predchádzajúcej časti používajú na prevádzku hydraulickú silu. V tejto časti sa budeme zaoberať rôznymi spôsobmi dodávania požadovaného tlaku hydraulickej kvapaliny brzdovým zariadeniam. Základný ovládací hydraulický systém využívaný pri ultraľahkých lietadlách je nezávislý systém, ktorý nie je súčasťou hlavného hydraulického systému lietadla. [5]

Hydraulický systém tvoria samostatné prvky ako napr. brzdové valce, brzdiče, hydraulické vedenie, šrúbenie, ventily, rozdeľovače a iné. Detailnejší popis komponent hydraulického systému bude zameraný hlavne na popis hlavného brzdového valca.

### 5.2.1. Hlavný brzdový valec

Vo všeobecnosti používajú ľahké lietadla a lietadlá bez hydraulických systémov nezávislé brzdové systémy. Nezávislý brzdový systém nie je nijako prepojený s hydraulickým systémom lietadla a preto sa na vyvinutie potrebného hydraulického tlaku na ovládanie brzd používajú hlavné brzdové valce. Tento systém je podobný brzdovému systému automobilu, avšak väčšinou nie je vybavený posilňovačom.

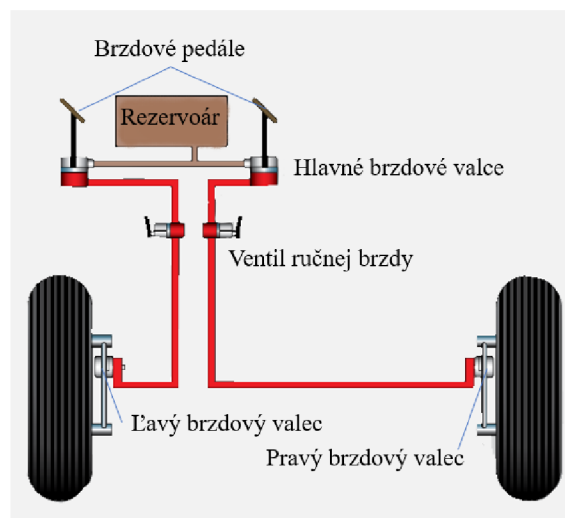
Vo väčšine brzdových systémov, je manipulácia brzd zaručená pedálmi umiestnenými na vrchnej časti nožného riadidla smerového kormidla a sú ovládané pomoc špičiek. Na vyvodenie brzdneho účinku v brzdovom systéme, musí pilot zatlačiť na pedále brzd, čím vyvinie potrebný tlak v hydraulickom systéme brzd. Pre každú vetvu hydraulického systému je použitý hlavný brzdový valec, ktorý je mechanicky spojený s príslušným pedálom kormidla (t.j. pri zatlačení na pravý brzdový pedál sa aktivuje brzda na pravom hlavnom kolese a zatlačením na ľavý brzdový pedál sa aktivuje brzda na ľavom kolese.) [Obrázok 20]. Keď je pedál stlačený, piest vo vnútri utesnenej komory naplnenej kvapalinou v hlavnom valci tlačí hydraulickú tekutinu cez hydraulické vedenie k piestu (-om) v brzdnej zostave. Brzdový piest tlačí brzdové obloženia proti brzdovému rotoru, čo vedie k transformácii kinetickej energie rotujúceho disku v teplo. Čím väčšou silou pôsobíme na brzdový pedál, tým viac narastá tlak v hydraulickom systéme brzdnej sústavy, čo vedie k väčšej prítlačnej sile obložení k rotujúcemu disku. [5]



Obrázok 20. Prepojenie hlavných brzdových valcov s pedálmi riadenia (upravené) [5]

Mnoho hlavných valcov má zabudované nádržky na brzdovú kvapalinu. Ďalšou možnosťou je jeden vzdialený rezervoár, ktorý je prepojený s brzdými valcami sústavy a zásobuje ich hydraulickou kvapalinou. Tento druh konštrukčného prevedenia je znázornený na obrázku 21. Využíva sa hlavne pri hlavných brzdových valcoch, ktoré nemôžu byť v danom konštrukčnom prevedení vo vertikálnej polohe. [5]

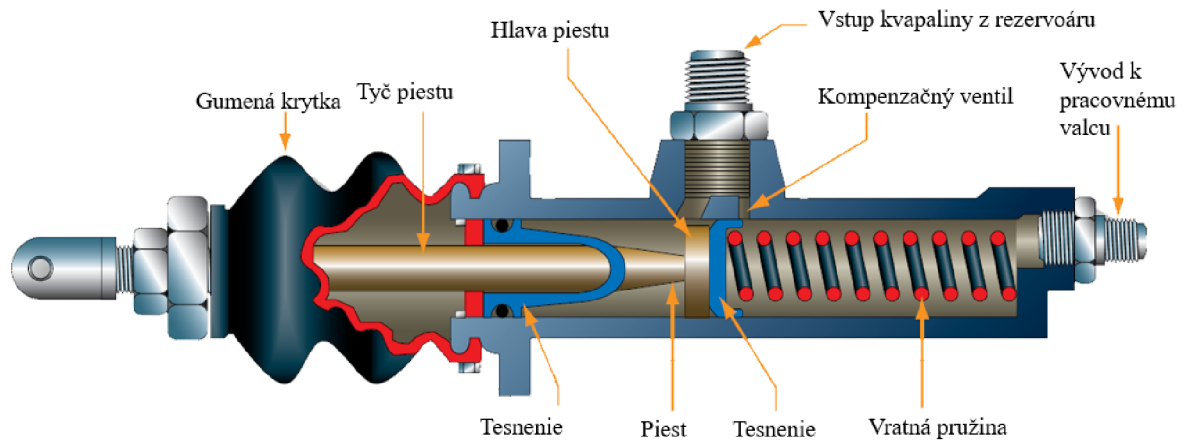
Niektoré typy ultraľahkých lietadiel disponujúcich ovládaním predného kolesa pomocou smerových riadidiel, využívajú na vyvedenie hydraulickej sily iba jeden brzdový valec, ktorý dodáva do hydraulického systému potrebný tlak (WT9 Dynamic) a brzdí oba kolesa hlavného podvozku súčasne. Takéto konštrukčné riešenie je možné využiť pri daných lietadlách, pretože riadenie lietadla sa počas pojazdu usmerňuje natáčaním predného, tým pádom sa nevyžaduje diferenciálne brzdenie. [5]



Obrázok 21. Hydraulický okruh s jedným rezervoárom hydraulickej kvapaliny (upravené) [5]

## 5.2.2. Mechanizmus hlavného valca

Hlavný valec používaný so vzdialeným zásobníkom hydraulickej kvapaliny je znázornený na Obrázku 22. Tento konkrétny model je hlavný brzdový valec značky Goodyear. Valec, nádrž a hydraulické vedenie, sú neustále naplnené hydraulickou kvapalinou neobsahujúcou nečistoty bez prítomnosti vzduchových bublín. Pri stlačení hornej časti pedála kormidla sa tyč piestu mechanicky posunie dopredu do hlavného valca a vyvoláva silu, ktorou piest tlačí hydraulickú kvapalinu pred sebou a vháňa ju do pracovných brzdových valcov brzdnej zostavy. Po vymedzení vôle medzi brzdovým kotúčom a brzdovými doštičkami, začne v dôsledku nestlačiteľnosti kvapaliny stúpať hydraulický tlak v hydraulickom vedení, čo zvyšuje brzdú silu. Keď je tlak na pedál uvoľnený, spätné pružiny v brzdovej zostave zasunú brzdové pracovné piesty späť do brzdového puzdra. Hydraulická kvapalina za pracovnými piestmi je vytlačená späť do hlavného brzdového valca, ktorá spolu s pružinou v hlavnom valci posúva piest, piestovú tyč a pedál kormidla späť do pôvodnej polohy.



Obrázok 22. Hlavný brzdový valec so vzdialeným rezervoárom hydraulickej kvapaliny (upravené) [5]

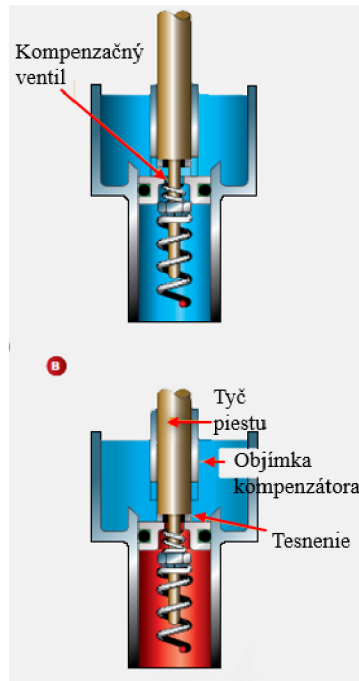
Pri zvyšovaní teploty hydraulickej kvapaliny, ku ktorej dochádza v dôsledku vzniknutého tepla pri brzdení, môže dôjsť k zväčšeniu objemu hydraulickej kvapaliny. Zväčšenie objemu hydraulickej kvapaliny môže viesť k brzdeniu brzdového kotúča, aj keď nie je na brzdový pedál vyvíjaný žiadny tlak. Z dôvodu zamedzenia nežiaduceho brzdového účinku, zapríčineného expanziou objemu kvapaliny, sú v brzdovom valci zabudované kompenzačné porty, ktoré slúžia na prepúšťanie nadbytočnej kvapaliny späť do rezervoáru hydraulickej kvapaliny. Cieľom tohto systému je udržať hydraulický okruh bez vzduchových bublín. Ak je hydraulický valec v pokoji, brzdová kvapalina môže expandovať do rezervoára. Pri brzdení je kompenzačný port utesnený špeciálne tvarovaným tesnením, čo vedie k zvyšovaniu tlaku. Pri uvoľnení pôsobiacej sily na tyč piestu, tlačí vratná pružina piest do začiatkovej polohy. Avšak vplyvom opotrebovania bríz môže nastať situácia, kedy v systéme vznikne podtlak, ktorý by tlačená pružina neprekonal. K tomu slúži pomocný rezervoár v pieste pred tesnením, ktorý je napájaný z rezervoáru brzdovej kvapaliny. Kvapalina z pomocného rezervoáru je nasávaná do priestoru pred piestom cez tesnenie, ktoré sa v tomto smere prúdenia kvapaliny chová ako ventil. Tento systém je veľmi citlivý na kvalitu gumového tesnenia. Alternatívou je systém s mechanicky uzatváracím ventilom, ktorý je popísaný nižšie. [5] [7]

Všeobecnou požiadavkou všetkých brzdových systémov je, aby sa zamedzil vznik vzduchových bublín v hydraulickej kvapaline. Pretože plyn je stlačiteľný a hydraulická kvapalina v podstate nie, akékoľvek vzduchové bubliny pri použití brzd môžu spôsobiť zhoršenie odozvy brzdových účinkov na brzdový pedál, alebo úplne znefunkčnúť brzdový systém. Z tohto dôvodu musia byť brzdové systémy riadne odvzdušnené, aby sa v systéme vyskytovalo čo najmenšie množstvo vzduchu. Pokyny na odvzdušnenie brzd sú uvedené v informáciách o údržbe výrobcu. [5]

### 5.2.3. Brzdové valce s integrálnym zásobníkom kvapaliny

Alternatívne spoločné usporiadanie nezávislých brzdových systémov obsahuje dva hlavné valce, z ktorých každý má svoj vlastný integrálny zásobník kvapaliny. S výnimkou umiestnenia nádrže s hydraulickou kvapalinou je brzdový systém v podstate rovnaký, ako bol opísaný vyššie. Hlavné valce sú mechanicky spojené s pedálmi kormidla. Stlačenie hornej časti pedálu

spôsobí, že tyč piestu tlačí piest do valca a tlačí tekutinu von do brzdovej sústavy. Piestna tyč jazdí v objímke kompenzátora obsahujúceho tesniaci O-krúžok, ktorý utesňuje piestnu tyč k válcu, keď sa tyč pohybuje dopredu. Tým sa zablokuje vyrovnávací port. Po uvoľnení brzdového pedála, vráti pružina piest do svojej pôvodnej polohy, vyrovnávací port sa otvorí a hydraulická kvapalina môže preniknúť späť do zásobníka brzdovej kvapaliny. Tesnenie konca tyče sa stiahne z hlavy piestu, čo umožňuje voľný tok tekutiny z valca cez kompenzačné otvory v pieste do nádrže. [5]



Obrázok 23. Brzdový valec s integrálnym zásobníkom (upravené) [5]

## 6. Hydraulická kvapalina

Najdôležitejšou časťou v hydraulických systémoch, ktoré boli popísané v predchádzajúcej kapitole, je hydraulická kvapalina. Od vlastností hydraulickej kvapaliny závisí celková účinnosť hydraulického systému. Nesmierne dôležité je určiť, či je možné použiť hydraulické kvapaliny, ktorých chemický základ je rozdielny, v jednom hydraulickom systéme a zistiť ich možný dopad na znefunkčnenie systému.

### 6.1. Druhy hydraulických kvapalín

Aby sa zabezpečila správna prevádzka systému a aby sa zabránilo poškodeniu nekovových komponentov hydraulického systému, musí sa použiť správna kvapalina. Pri dopĺňaní kvapaliny do systému musí byť použitý špecifikovaný typ uvedený v príručke pre údržbu od výrobcu lietadla alebo na štítku s pokynmi pripevnenom k opravovanej nádrži alebo jednotke. [5]

**Hydraulické kvapaliny možno podľa bázy rozdeliť do dvoch hlavných kategórií:**

1. Minerálne hydraulické kvapaliny
2. Syntetické hydraulické kvapaliny

Pri údržbe hydraulického systému musí byť technik presvedčený, že používa správnu kategóriu náhradnej kvapaliny. Hydraulické kvapaliny nie sú nevyhnutne kompatibilné.

#### **Minerálne hydraulické kvapaliny**

Hydraulické kvapaliny na báze minerálnych olejov (MIL-H-5606) sa začali používať v 40. rokoch minulého storočia a patria k najstarším používaným hydraulickým kvapalinám. Minerálne hydraulické kvapaliny sa používajú v mnohých systémoch, najmä tam, kde je nízke nebezpečenstvo požiaru. Hydraulická kvapalina na báze minerálov sa spracováva z ropy. Má zápach podobný prenikajúcemu oleju a je zafarbená na červeno. S kvapalinami na báze ropy sa používajú syntetické gumové tesnenia. [5]

#### **Syntetické polyalfaolefínové hydraulické kvapaliny**

Hydrogenované polyalfaolefínové hydraulické kvapaliny boli vyvinuté začiatkom 60. rokoch minulého storočia. V porovnaní s minerálnymi hydraulickými kvapalinami disponovali zvýšenou ohňovzdornosťou. Nevýhodou týchto polyalfaolefínových kvapalín bola ich vysoká viskozita pri nízkych teplotách. Spravidla je ich využitie obmedzené na -40 °C. [5]

#### **Syntetické hydraulické kvapaliny na báze fosfátových esterov**

Tieto kvapaliny sa používajú vo väčšine komerčných dopravných lietadiel a sú mimoriadne odolné voči ohňu. Nie sú však ohňovzdorné a za určitých podmienok horia. Najstaršia generácia týchto tekutín bola vyvinutá po druhej svetovej vojne v dôsledku rastúceho počtu požiarov hydraulických brzd lietadiel, ktoré vyvolali kolektívne obavy komerčného leteckého priemyslu. K progresívnemu vývoju týchto tekutín došlo v dôsledku výkonnostných požiadaviek nových návrhov lietadiel. [5]

#### **Hlavné požiadavky hydraulických kvapalín**

Všetky hydraulické kvapaliny, či už na báze syntetického alebo minerálneho oleja, musia spĺňať požiadavky dané nárokmi pri využívaní hydraulických kvapalín. Hlavnými požiadavkami hydraulických kvapalín sú :

- Nízka teplota tuhnutia
- Minimálna zmena viskozity s teplotou
- Dobrá korózna a oxidačná stabilita
- Dobrá znášateľnosť s tesnením
- Nestlačiteľná
- Ohňovzdorné
- Dobré proti penivé vlastnosti
- Dobrá stabilita pri nízkych a vysokých teplotách

Okrem toho, väčšina technických špecifikácií leteckých hydraulických kvapalín uvádza iné požiadavky, ktoré sú špecifické pre daný typ hydraulickej kvapaliny alebo pre dané použitie. [5] [17]

## 6.2. Kompatibilita syntetických a minerálnych kvapalín

Do skupiny syntetických hydraulických kvapalín patria aj kvapaliny pod označením DOT 3, DOT 4 a DOT 5.1, ktoré majú polyetylglykolový základ, ako aj kvapaliny DOT 5, ktoré sú tvorené silikónovým základom. Hydraulicke kvapaliny DOT3, DOT4 a DOT 5.1 sa od seba odlišujú predovšetkým svojou viskozitou a teplotou, pri ktorej nastáva bod varu. Sú navzájom miešateľné, ale výsledná zmiešaná kvapalina bude mať vlastnosti nižšej triedy, pričom všeobecne platí, že čím je hydraulická kvapalina označená vyšším číslom, tým sú jej charakteristiky lepšie. Kvapaliny DOT3, DOT4 a DOT 5.1 sa však nesmú miešať s kvapalinami typu DOT 5 alebo s hydraulickými kvapalinami na báze minerálnych olejov (AeroShell4).

Tabuľka 2. Charakteristické vlastnosti syntetických kvapalín [17]

Označenie	Suchý bod varu	Mokrý bod varu	Viskozita (+100°C)	Hlavná zložka
DOT3	205°C	140°C	$1,5 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	Etylglykol
DOT4	230°C	155°C	$1,500 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	Etylglykol
DOT5	260°C	180°C	$1,5 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	Silikón
DOT 5.1	260°C	180°C	$1,5 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	Etylglykol

## 6.3. Kompatibilita hydraulických kvapalín s inými materiálmi

Pri použití hydraulických kvapalín, či už na báze syntetického oleja alebo minerálneho oleja, sa musí skontrolovať kompatibilita kvapaliny s tesniacimi materiálmi, plastmi alebo farbami. Výrobcovia hydraulických kvapalín nezaručujú kompatibilitu hydraulických kvapalín s ostatnými materiálmi, pretože stupeň kompatibility závisí od prevádzkových podmienok a presného zloženia materiálov daných súčastí v hydraulickom systéme. Najväčším problém je

určiť, či použitá kvapalina v hydraulickom systéme nebude mať negatívny vplyv na tesnenia, použitých v danom hydraulickom systéme. Mnohí dodávatelia elastomérov vyrábajú tabuľky preukazujúce zlučiteľnosť svojich výrobkov s radom iných materiálov. Poskytnuté informácie sa preto môžu brať do úvahy iba ako usmernenia. [17]

V prípade nášho hydraulického brzdového systému, je náročne určiť správnu hydraulickú kvapalinu, ktorá by sa mala v hydraulickom systéme použiť. Hydraulický systém totiž obsahuje letecké brzdiče, v ktorých by ako plniace médium mala byť použitá hydraulická kvapalina na báze minerálnych olejov. Ďalšou časťou hydraulického systému sú motocyklové hlavne brzdové valce, ktoré sú prispôsobené na použitie hydraulickej kvapaliny DOT 4. Ako bolo vysvetlené vyššie, ich chemické základy sú rozličné, nie sú vzájomne kompatibilné a nesmú sa navzájom miešať.

V tabuľke 3 je vyjadrená kompatibilita hydraulických kvapalín s jednotlivými materiálmi, z ktorých sa zvyčajne vyrábajú tesniace krúžky a tesnenia, využité v valcoch hydraulického systému. Ak by došlo k naleptaniu gumového tesnenia na niektorom mieste hydraulického okruhu, môže to viesť k celkovej nefunkčnosti brzdového systému.

Tabuľka 3. Kompatibilita, znášateľnosť hydraulických kvapalín s inými materiálmi [18]

Elastomer/Plast	Hydraulické kvapaliny na báze minerálneho oleja	Hydraulická kvapaliny na báze syntetického oleja
Fluorocarbon (Viton)	Veľmi dobre	Veľmi dobre
Akrylonitril	Dobre	Dobre
Polyester	Dobre	Dobre
Silikón	Zle - Dobre	Zle - Dobre
Teflon	Veľmi dobre	Veľmi dobre
Nylon	Zle - Dobre	Zle - Dobre
Perbunan	Dobre	Dobre
Metakrylat	Dobre	Dobre
Neopren	Dostačujúco - Dobre	Dostačujúco - Dobre
Kaučuk	Zle - Dostačujúco	Zle - Dostačujúco
Polyetylén	Dobre	Dobre
Butylový kaučuk	Veľmi zle - Zle	Veľmi zle - Zle
Polyvinylchlorid	Zle - Dobre	Dostačujúco - Dobre
Hodnotenie kompatibility: Veľmi dobre – Dobre – Dostačujúco – Zle – Veľmi zle		

Z tabuľky 3 môžeme približne určiť, že vlastnosti syntetických a minerálnych kvapalín majú približne rovnaký vplyv na dané materiály tesnení. Hodnoty z tabuľky 3 sú však len orientačné a presná kompatibilita sa nedá definitívne určiť.

Z dôvodu prevádzkových nákladov, väčšina prevádzkovateľov ultraľahkých lietadiel využíva v brzdnom hydraulickom systéme bežne dostupné syntetické kvapaliny DOT 4, pretože letecká hydraulická kvapalina, vyrobená na báze minerálnych olejov, je spravidla drahšia, menej

prístupná a predávaná vo väčších objemoch. Po zohľadnení všetkých aspektov, bude v našom hydraulickom systéme použitá kvapalina typu DOT 4.

## 7. Určenie brzdných účinkov

V tejto kapitole sa budeme zaoberať dynamikou lietadla pri pristávaní a odvodíme vzťahy pre výpočet maximálnych brzdných účinkov, ktoré môže brzdovala sústava vyvinúť, aby nedošlo k riziku preklopenia lietadla na nos.

### 7.1. Určenie brzdnéj sily pri maximálnom ťahu motora

Brzdy by mali byť navrhnuté tak, aby pri úplnom rozbehu motora boli schopné zabrániť pohybu lietadla po zemi. Ťah vyvíjaný motorom sa v tomto prípade rovná trecej sile medzi pneumatikou a povrchom zeme, ako je znázornené na obrázku 24.



Obrázok 24. Ťah a trecia sila pôsobiaca pri štarte (upravené)[19]

Z uvedeného obrázku vyplýva vzťah:

$$F_{\text{Ťah}} = F_{\text{T}} \quad (13.)$$

Kde:  $F_{\text{Ťah}}$ ... Ťah motora

$F_{\text{T}}$ ... Celková brzdná sila

$F_{\text{Ťah}}$  môžeme určiť z technických parametrov vrtule a motoru lietadla.

Pri vyvinutí sily na brzdovalý pedál, sa pomocou hydraulického vedenia a princípov opísaných vyššie vyvinie aj finálna sila pôsobiaca na brzdovalé obloženie, ktoré je touto silou pritlačované k brzdnému kotúču. Tým vznikne medzi brzdovalým obložením a kotúčom trecia sila, ktorá je prenášaná cez pneumatiku na povrch zeme. Brzdnú silu môžeme určiť: [19]

$$F_{\text{BK}} = P \cdot S_2 \cdot \mu = F_2 \cdot \mu_{\text{sd}} \quad (14.)$$

Kde:  $F_{\text{BK}}$ ... je trecia sila medzi brzdovalým obložením a kotúčom(

$P$ ... je tlak v hydraulickom systéme

$S_2$ ... plocha brzdovalého válca

$\mu_{\text{sd}}$ ... je koeficient statického trenia medzi brzdovalým obložením a kotúčom



Výsledná brzdiaca sila  $F_{BCK}$  je dvojnásobná, pretože trecia sila vzniká na oboch stranách brzdového kotúča:

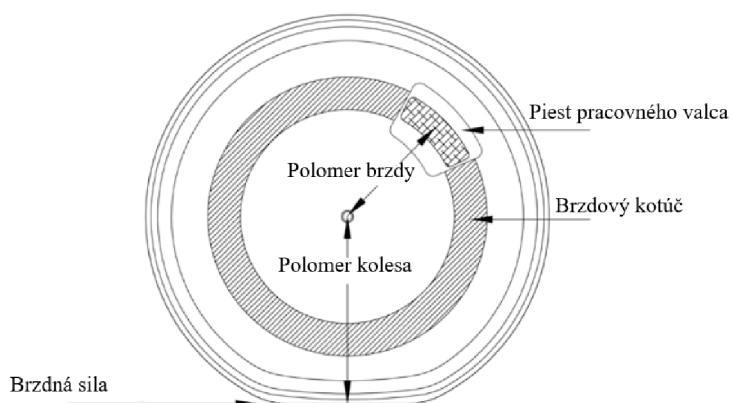
$$F_{BCK} = 2 \cdot F_{BK} \quad (15.)$$

Brzdiaca sila vyvoláva na koleso brzdiaci moment  $M_B$ :

$$M_B = F_{BCK} \cdot R_D \quad (16.)$$

Kde:  $R_D$ ... účinný polomer brzdy

Schopnosť bŕzd udržať lietadlo v nehybnom stave aj pri maximálnom výkone motora je závislá na priemere brzdených kolies. Vzťah medzi efektívnym polomerom brzdy a polomerom kolesa je patrný z Obrázka 15. [20]



Obrázok 25. Závislosť medzi polomerom brzdy a polomerom brzdeného kolesa (upravené) [19]

Aby lietadlo zotrvalo na mieste bez pohybu pri maximálnom výkone motora, musí byť brzdný moment k ose otáčania kolesa vyvolaný brzdovou silou bŕzd rovný brzdnému momentu vyvolanému brzdovou silou pneumatiky. Môžeme písať: [19]

$$F_T \cdot R_T = F_{BCK} \cdot R_D \quad (17.)$$

Kde:  $R_T$ ... je polomer pneumatiky

Vyjadrime brzdiacu silu pneumatiky  $F_T$ :

$$F_T = F_{BCK} \cdot \frac{R_D}{R_T} \quad (18.)$$

Lietadlo zotrvá v stave statickej rovnováhy ak platí:

$$F_T \geq F_{Tah} \quad (19.)$$

Pre stanovenie hydraulického tlaku  $P_{Tah}$  v hydraulickom systéme, kedy je na obidva brzdové pedále súčasne vyvíjaná rovnako veľká sila, platí podmienka :

$$F_{T1K} = \frac{F_{Tah}}{2} \quad (20.)$$

Kde:  $F_{T1K}$ ... je brzdná sila prenášaná jednou pneumatikou

Tlak  $P_{Tah}$  v hydraulickom systéme pri maximálnom ťahu motora určíme dosadením rovnice (20.) do rovníc (15.) a (14.) a následným vyjadrením tlaku. Dostaneme:

$$P_{Tah} = \frac{F_{Tah} \cdot R_T}{S_2 \cdot R_D \cdot \mu_{SD}} \quad (21.)$$

Sila ktorá bude v tom prípade pôsobiť na hlavný brzdový valec vyjadríme pomocou rovnice (8.). Vyjadrením dostaneme:

$$F_1 = P_{Tah} \cdot S_1 \quad (22.)$$

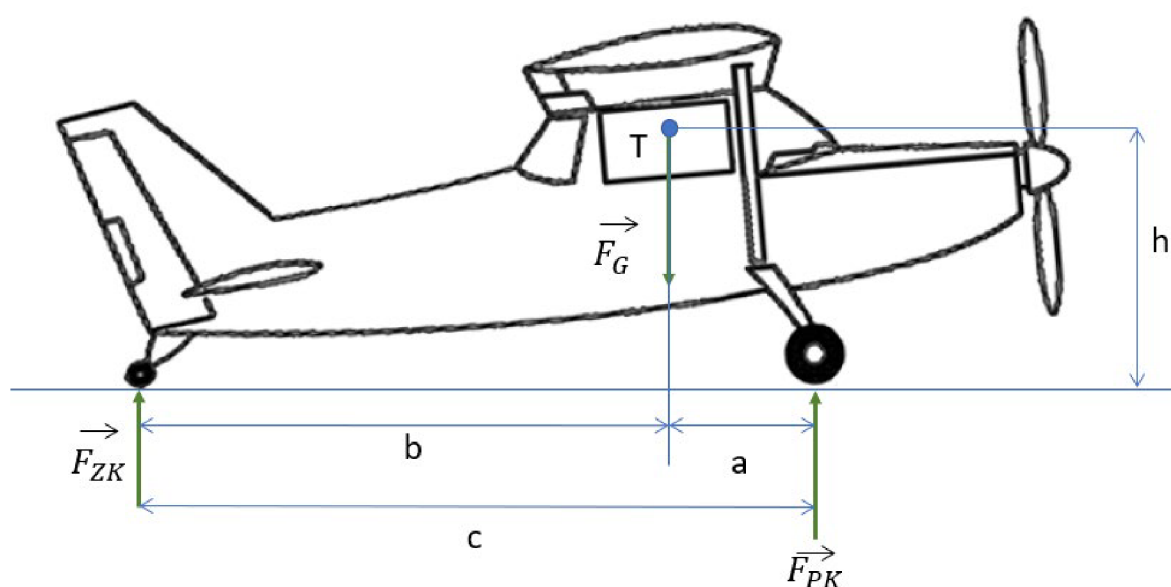
Sila, ktorou bude pilot pôsobiť na oba pedále súčasne, aby vyvolal v hydraulickom systéme daný tlak  $P_{Tah}$  vypočítame z rovnice (5.) a dosadením rovníc (21.) a (22.). Dostaneme:

$$F_{P\_Tah} = \frac{x_2 \cdot S_1 \cdot R_T \cdot F_{Tah}}{x_1 \cdot S_2 \cdot R_D \cdot \mu_{SD}} \quad (23.)$$

Kde:  $F_{P\_Tah}$ ... je sila, vyvinutá na oba brzdové pedále súčasne pri max. ťahu motora

## 7.2. Rozdelenie zaťaženia na kolesách

Brzdna sústava by mala byť navrhnutá tak, aby vyvolala dostatočnú brzdiacu silu na zastavenie pohybujúceho sa lietadla pri pristávaní na rýchlosti  $v_{SO}$  za určitý čas na danej brzdiacej dráhe. Pri konfigurácii podvozku s ostrohovým kolesom je brzdený iba predný hlavný podvozok,



Obrázok 26. Statická rovnováha lietadla (upravené) [19]

zatiaľ čo ostroha nedisponuje brzdiacim systémom. Pri určení vonkajších síl pôsobiacich na lietadlo pri brzdení, budeme vychádzať z dynamiky lietadla pri pristávaní. Obrázok 26 znázorňuje reakčné sily lietadla nachádzajúceho sa v statickej rovnováhe bez účinkov vonkajších síl pôsobiacich na lietadlo.

Podľa prvého Newtonovho zákona zotrúva teleso v pokoji alebo v rovnomernom priamočiarom pohybe, ak naň nepôsobí žiadna sila alebo je výslednica síl naň pôsobiacich

nulová. Pri zanedbaní trecích síl a zvyšných odporov pôsobiacich proti pohybu, by sa lietadlo pohybovalo konštantnou rýchlosťou  $v_{S0}$ . Jediná pôsobiaca sila je tiažová sila  $F_G$ , ktorá pomyselne pôsobí v ťažisku lietadla, ako je znázornene na Obrázku 26. Reakčne sily posobiace od zeme su  $F_{PK}$  a  $F_{ZK}$ . Platí: [20] [21]

$$F_G = F_{PK} + F_{ZK} \quad (24.)$$

Kde:  $F_{PK}$ ... reakčná sila predného kolesa

$F_{ZK}$ ...reakčná sila zadného kolesa

V statickej rovnováhe, keď sú predne aj zadné kolesa v kontakte so zemou platí:

$$\sum M_i^{\vec{}} = 0 \quad (25.)$$

Pre vektorový točivý moment k počiatku súradnicového systému, nachádzajúceho sa v ťažisku lietadla, ktorého osa otáčania prechádza ťažiskom a je rovnobežná s osou Y platí:

$$\vec{a} \times \vec{F}_{PK} = -\vec{b} + \vec{F}_{ZK} \quad (26.)$$

Keďže sily a ramena príslušných síl sú navzájom kolmé, platí:

$$F_{PK} \cdot a = F_{ZK} \cdot b \quad (27.)$$

Z doposiaľ použitých rovníc je možné určiť jednotlivé reakčné sily pôsobiace od zeme na podvozok lietadla (rozloženie váhy).Z rovnice 23 vyjadríme  $F_{PK}$  a  $F_{ZK}$  a dosadíme do rovnice 20. [20]

Následne dostaneme:

$$F_{PK} = F_G \frac{b}{a + b} \quad (28.)$$

$$F_{ZK} = F_G \frac{a}{a + b} \quad (29.)$$

Z Obrázka 26. je zrejmé, že  $a < b$ , čo vedie k vyššiemu zaťaženiu predného podvozku

$$F_{PK} > F_{ZK}$$

Keďže maximálna brzdná sila, prenášaná pneumatikou na povrch podkladu pristávacej plochy, je definovaná ako násobok zaťaženia kolesa a koeficientu statického trenia medzi pneumatikou a povrchom pristávacej dráhy, je z pohľadu  $F_{PK} > F_{ZK}$  výhodne vyvodzovať brzdnú silu na kolesách hlavného podvozku.

### 7.3. Rozdelenie zaťaženia pri brzdení

Pri brzdení samozrejme nedochádza k rovnomernému priamočiaremu pohybu pri konštantnej rýchlosti, musí teda pri použití brzd na systém pôsobiť podľa druhého Newtonovho zákona nejaká vonkajšia sila. Pohybová zmena vozidla je vyvolaná silou, ktorá je definovaná: [20] [21]

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (30.)$$

Kde:  $m$ ... je celková hmotnosť lietadla

$\vec{F}$ ... je výsledná sila pôsobiaca na teleso

$\vec{a}$ ... je zrýchlenie pôsobiace na teleso ( pri brzdení pôsobí proti smeru pohybu)

Pri konštantnej translačnej rýchlosti lietadla sa pneumatiky kolies odvaľujú po zemi bez preklzu konštantnou rýchlosťou. Pri uvedení brzd do činnosti sa vyvinie trecia sila medzi brzdovým obložením a brzdovým kotúčom, ktorá spomaľuje uhlovú rýchlosť  $\vec{\omega}$  rotujúcich kolies. Výsledkom je zníženie obvodovej rýchlosti  $\vec{v}_u$  kolies. Pretože translačná rýchlosť  $\vec{v}_0$  odvaľujúceho kolesa, je závislá na uhlovej rýchlosti  $\vec{\omega}$  odvaľujúceho sa kolesa, platí, že pri znížení uhlovej rýchlosti  $\vec{\omega}$  kolesa, klesá aj translačná rýchlosť  $\vec{v}_0$  kolesa a tým translačná rýchlosť celého systému. Dôvodom je, že spomalenie iniciované na kolesách spôsobuje, že pneumatiky kolies sa trú o kontaktné body (ZK a PK) so zemou. Ak systém nespomalí, znamená to, že prítláčna sila vyvinutá na brzdové obloženie zablokovala koleso a pneumatiky sa kĺžu po zemi. Preto predpokladáme, že brzdenie sa uskutoční bez preklzu. Pri brzdiacom procese bez preklzu platí: [20]

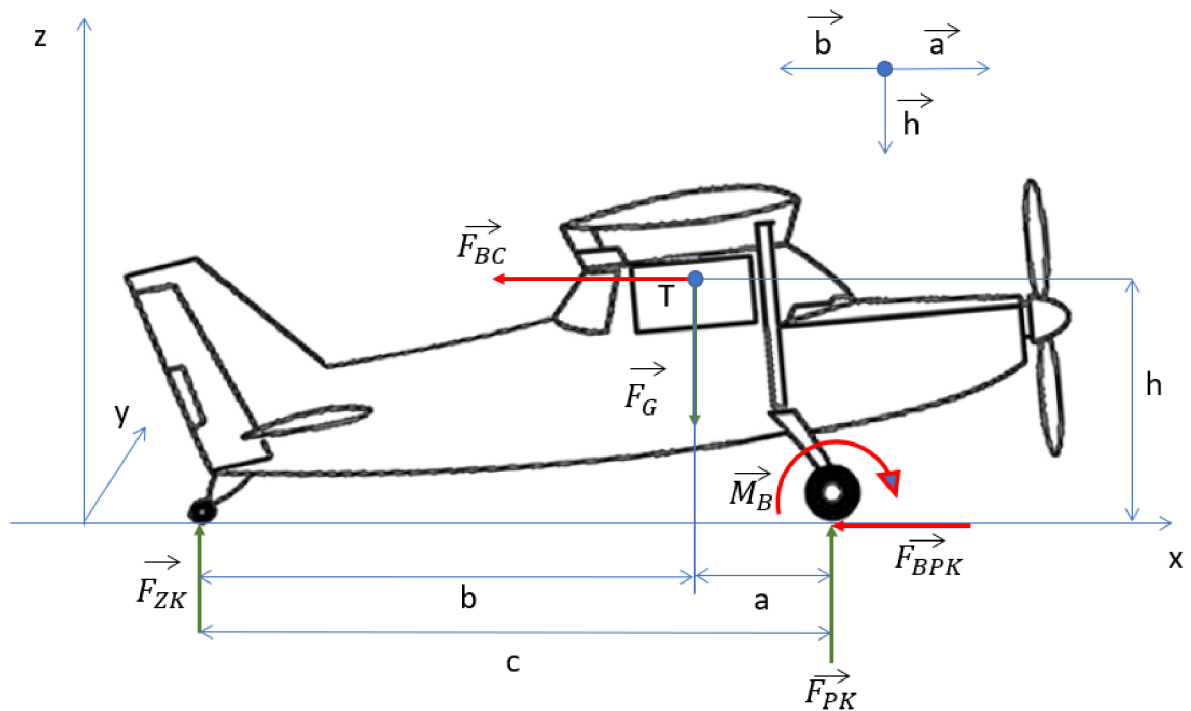
$$v_u = v_0 \quad (31.)$$

V prípade rovnomerného brzdenia by malo dôjsť ku kľzavému treniu medzi brzdovým obložením a brzdovým kotúčom a statickému treniu v kontaktnej oblasti medzi pneumatikou a vozovkou. Z toho môžeme usúdiť, že rozhodujúca brzdna sila pôsobí na styčných plochách medzi pneumatikami a vozovkou (za predpokladu, že funkčná brzda vytvára dostatočne vysoké brzdne momenty). Táto (maximálna možná) brzdna sila predných kolies  $F_{BPK}$  sa v zásade určuje prostredníctvom statického koeficientu trenia  $\mu_s$  a činnej hmotnosti (normálová sila) na príslušnej pneumatike. Pre brzdne sily na pneumatikách platí: [20]

$$F_{BPK} = F_{PK} \cdot \mu_s \quad (32.)$$

Odhliadneme od ostatných vonkajších zaťažení pôsobiacich na celkový systém (napr. odporová aerodynamická sila, valivý moment kolies, vztlaková sila), môžeme celkovú možnú brzdnu silu určiť ako:

$$F_{BC} = F_{BPK} \quad (33.)$$



Obrázok 27. Vplyv brzdnjej sily na dynamiku lietadla (upravené) [19]

Podľa vzťahov uvedených vyššie, je možné maximálnu brzdnú silu stanoviť ako :

$$F_{BCmax} = F_G \cdot \mu_s \quad (34.)$$

Kde:  $F_{BCmax}$ ...je maximálna celková brzdná sila

Pri brzdnom účinku, sa prerozdelenie hmotnosti pôsobiacej na jednotlivých kolesách z dôvodu vzniku točivého momentu od brzdnjej sily. Rovnice (28.) a (29.) síce určujú rozdelenie hmotnosti na kolesách, ale nemôžu byť znova použité, pretože rovnice (26.) a (27.) pri pôsobení brzdnjej sily strácajú platnosť, keďže nezohľadňujú vznikajúci točivý moment od brzdnjej sily.

Musíme zaviesť nové rovnice, ktoré zohľadnia vplyv vzniknutého brzdného momentu. Na stanovenie platnej momentovej rovnice použijeme už zavedený súradnicový systém (Obrázok 27). Vzniknutý točivý moment z dôvodu brzdnjej sily stanovíme :

$$M_B = F_{BC} \cdot h \quad (35.)$$

Vektorovo teda platí:

$$\vec{a} \times \vec{F}_{PK} = -[\vec{b} \times \vec{F}_{ZK} + \vec{h} \times \vec{F}_{BPK}] \quad (36.)$$

Z dôvodu ortogonalit jednotlivých zložiek a zavedením celkovej brzdnjej sily môžeme rovnicu (36.) upraviť na tvar:

$$F_{PK} \cdot a = F_{ZK} \cdot b + F_{BC} \cdot h \quad (37.)$$

Použitím rovnice (24.), ktorá je platná aj po zohľadnení brzdných síl pôsobiacej na sústavu, môžeme určiť prerozdelenie hmotnosti lietadla na jednotlivých kolesách. Z rovnice (24.) si vyjadríme  $F_{PK}$  a  $F_{ZK}$  a dosadíme do rovnice (37.). Dostaneme:

$$F_{PK} = \frac{F_G \cdot b + F_{BC} \cdot h}{a + b} = \frac{F_G \cdot b + F_{BC} \cdot h}{c} \quad (38.)$$

$$F_{ZK} = \frac{F_G \cdot a - F_{BC} \cdot h}{a + b} = \frac{F_G \cdot a - F_{BC} \cdot h}{c} \quad (39.)$$

Z rovníc (38.) a (39.) je zrejmé, že z dôvodu vznikajúceho brzdného momentu od brzdných síl sa zvyšuje zaťaženie predných podvozkových kolies a ostrohoové koleso sa odľahčí. Čím bude brzdná sila väčšia, tým väčšie bude zaťaženie hlavného podvozku lietadla. Brzdový moment vyvolaný brzdou silou môže byť tak veľký, že ostrohoové koleso bude úplne odľahčené, čo môže následne viesť k prevráteniu sa lietadla cez predné kolesa na nos lietadla. [20]

Rozdelenie zaťaženia jednotlivých kolies pri brzdení reprezentuje najdôležitejšiu premennú, keďže samotná brzdná sila je závislá na zaťažení kolies ( $F_{PK}$  alebo  $F_{ZK}$ ) a statickom koeficiente trenia  $\mu_s$ . (32.),(33.) [20]

## 7.4. Maximálna brzdná sila

Keďže veľkosť brzdných síl závisí od zaťaženia kolies a statického koeficientu trenia, predné kolesa môžu prenášať oveľa väčšie brzdné sily ako napr. zadné koleso. Avšak limitujúcim prvkom pri prednej brzdných silách je vznikajúci brzdný moment, ktorý sa snaží lietadlo preklopiť na nos okolo predných kolies podvozka. [20]

Pri určení maximálnej brzdných síl pri ktorej ešte nedôjde k preklopeniu lietadla budeme vychádzať z podmienky:

$$F_{ZK} \geq 0 \quad (40.)$$

Čo je limitná podmienka, aby sa lietadlo nepreklopilo. Avšak táto podmienka nie je dostačujúca. Ďalšou podmienkou je podmienka valenia, ktorá definuje brzdnú silu tak, aby sa koleso odvalovalo a nedošlo k šmyku:

$$F_{BPK} \leq F_{PK} \cdot \mu_s \quad (41.)$$

Zohľadnením podmienok definovaných vyššie a použitím rovnice (37.), v ktorej je  $F_{ZK} = 0$ , dostaneme:

$$F_G \cdot a - F_{BC} \cdot h = 0 \quad (42.)$$

Celkovú brzdnú silu  $F_{BC}$  v Rovnici (38.) nahradíme vzťahom maximálnej brzdných síl z rovnice (34.) a dostaneme:

$$F_G \cdot a - F_G \cdot \mu_s \cdot h = 0 \quad (43.)$$

Úpravou rovnice (43.) dostaneme:

$$\mu_s = \frac{a}{h} \quad (44.)$$

To znamená, že ak  $\mu_s \geq \frac{a}{h}$ , môže dôjsť k nadvihnutiu zadného ostrohového kolesa. Celá tiaž lietadla by v tomto prípade pôsobila na predný podvozok lietadla, čo by mohlo viesť k prevráteniu lietadla.

Avšak, ak  $\mu_s \leq \frac{a}{h}$ , znamená to, že nie je možné vyvolať tak veľkú brzdnú silu, aby sa stratil kontakt medzi ostrohovým kolesom a zemou a aby došlo k prevráteniu lietadla. Ak by bola vyvinutá sila na brzdový systém väčšia, nedošlo by k prevráteniu lietadla, ale k zablokovaniu kolies, a kolesa by prešli do sklzu. [20]

**Stanovenie maximálnej brzdnjej sily, ak  $\mu_s \leq \frac{a}{h}$ .**

Na stanovenie brzdnjej sily, ak platí, že  $\mu_s \leq \frac{a}{h}$ , budeme vychádzať z rovnosti rovnice (41.) To znamená, že predpokladáme:

$$F_{\text{BPKmax}} = F_{\text{PK}} \cdot \mu_s \quad (45.)$$

Kde:  $F_{\text{BPKmax}}$  je maximálna brzdná sila predného kolesa

Rovnicu (45.) dosadíme do rovnice (39.) a dostaneme:

$$F_{\text{BPKmax}} = \frac{F_G \cdot b + F_{\text{BC}} \cdot h}{c} \cdot \mu_s \quad (46.)$$

Po úprave rovnice (46.) dostaneme:

$$F_{\text{BPKmax}} = \frac{F_G \cdot \mu_s \cdot b}{c - \mu_s \cdot h} \quad (47.)$$

Pri tejto brzdnjej sile, je ostrohové kolesa zaťažené minimálne, ale k úplnej strate kontaktu medzi pneumatikou a zemou nedôjde.

Maximálne zrýchlenie (v našom prípade spomalenie) môžeme určiť ako:

$$a_{\text{Bmax}} = \frac{F_{\text{BPKmax}}}{m} = \frac{g \cdot \mu_s \cdot b}{c - \mu_s \cdot h} \quad (48.)$$

Konečné rozloženie zaťaženia určíme pomocou rovníc (38.) a (39.) a zohľadnením brzdnjej sily z rovnice (47.), kde platí, že  $F_{\text{BPKmax}} = F_{\text{BC}}$  dostaneme:

$$F_{\text{PK}} = \frac{F_G \cdot b}{c - \mu_s \cdot h} \quad (49.)$$

$$F_{\text{ZK}} = \frac{F_G \cdot (a - \mu_s \cdot h)}{a + b - \mu_s \cdot h} \quad (50.)$$

## Stanovenie maximálnej brzdnnej sily, ak $\mu_s \geq \frac{a}{h}$

V prípade ak  $\mu_s \geq \frac{a}{h}$  môžeme v porovnaní s doterajšími úvahami a výsledkami spozorovať rozdiel. Základom doterajšieho uvažovania bolo, že pri maximálnej brzdnnej sile vyvolanej brzdňým systémom a prenesenou kontaktom pneumatík s povrchom nedôjde ku sklzu pneumatík ale bude zachovaný valivý pohyb pneumatík. (28.) (35.)

Avšak ako bolo dokázané vyššie, pri  $\mu_s = \frac{a}{h}$  (38.) stratí zadné ostrohoové koleso kontakt s povrchom zeme. Každé ďalšie zvyšovanie brzdnnej sily  $F_{BPK}$  vedie k nárastu brzdného momentu a tým k riziku preklopenia lietadla. Z toho vyplýva, že pre maximálnu brzdňú silu platí vzťah: [20]

$$F_{BPKmax} = \frac{a}{h} \cdot F_{PK} = \frac{a}{h} \cdot F_G \quad (51.)$$

Z rovnice (51.) teda vyplýva, že koeficient statického trenia, pre ktorý bude platiť, že  $\mu_s \geq \frac{a}{h}$ , nebude mať žiadny vplyv na veľkosť výslednej maximálnej brzdnnej sily. Aby sme mohli dosiahnuť väčšiu brzdňú silu, pri ktorej nedôjde k preklopeniu lietadla, museli by sme presunúť ťažisko lietadla (a zväčšiť, h zmenšiť) [20]

Model, podľa ktorého sme postupovali však nie je úplne presný. Z dôvodu, že hlavný podvozok disponuje dvoma kolesami, ktoré sú pri brzdení rovnako zaťažené (predpokladáme priamočiari pohyb). Pre zaťaženie jedného kolesa teda platí:

$$F_{PK1} = \frac{F_{PK}}{2} \quad (52.)$$

Z toho vyplýva, že každé koleso hlavného podvozku prenáša polovičnú maximálnu brzdňú silu v každom stave popísanom vyššie. Všeobecne platí:

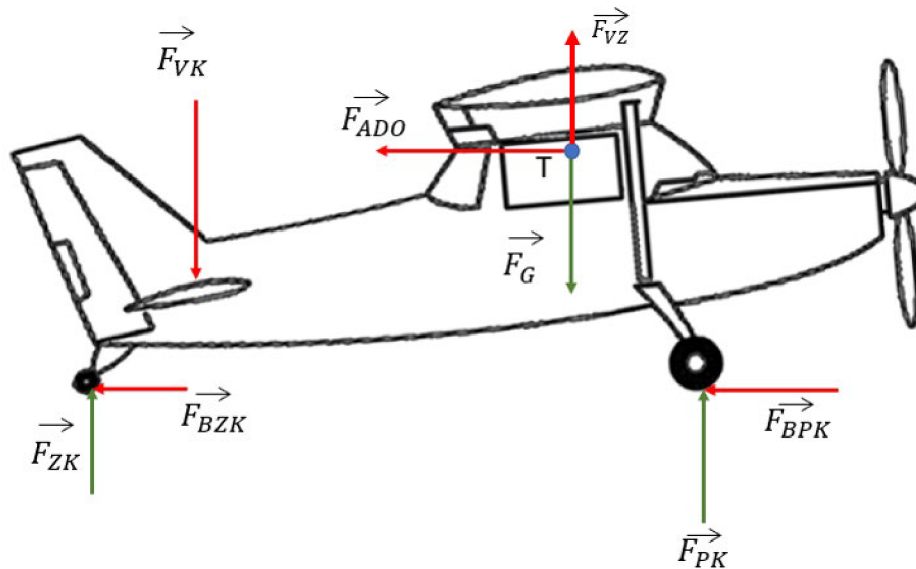
$$F_{BPKmax1} = \frac{F_{BPKmax}}{2} \quad (53.)$$

Kde:  $F_{BPKmax1}$ ... je maximálna brzdňá sila jedného kolesa hlavného podvozku

## 7.5. Vplyv ďalších vonkajších síl na maximálnu brzdňú silu

V modeli, podľa ktorého sme sa snažili určiť maximálnu brzdňú silu, sme z dôvodu zjednodušenia nezobrali do úvahy ďalšie vonkajšie sily pôsobiace na lietadlo počas brzdenia. Pri požadovaní presnejšieho výsledku, by sme do úvahy a výpočtov vyššie museli zahrnúť aj vplyv aerodynamického odporu a vplyv síl vzniknutých od ovládacích plôch lietadla (Obrázok 28.). Obe tieto uvedené sily v praxi dovoľujú zvyšovať maximálnu brzdňú silu  $F_{BPKmax}$ , pretože obe sily kompenzujú brzdný moment, ktorý zapríčiňuje stratu kontaktu ostrohoového kolesa so zemou a následne preklopenie lietadla. V praxi sa piloti snažia vykompenzovať brzdný moment pravé silami vniknutými v dôsledku ovládacích plôch výškového kormidla. Pri brzdení potiahnu riadidlo výškového kormidla k sebe, čo vytvorí silu, ktorá tlačí zadnú časť lietadla k zemi a bráni preklopeniu. Avšak táto sila nie je konštantná, lebo závisí na rýchlosti vzduchu narážajúceho na plochu výškového kormidla. Pri spomaľovaní lietadla sa teda znižuje aj rýchlosť vzduchu voči lietadlu čo vede k zmenšovaniu sily vyvolanej výškovým kormidlom.





Obrázok 28. Vplyv ďalších vonkajších síl pôsobiacich na lietadlo pri pristávaní (upravené) [19]

$\vec{F}_{VK}$  - sila od výškového kormidla,  $\vec{F}_{ADO}$  - sila aerodynamického odporu

## 7.6. Maximálna sila pôsobiaca na brzdový pedál pri pristávaní

Aby sme mohli určiť, akou maximálnou silou môže pilot pôsobiť na brzdové pedále a či je vôbec schopný tuto silu vyvolať, budeme vychádzať zo vzťahov uvedených vyššie.

Aby sa koleso pri brzdení nezablokovalo a nedošlo k šmyku, musí medzi brzdovým obložením a brzdovým kotúčom vniknúť trecia sila závislá na dynamickom koeficiente trenia. Pre tuto silu platí:

$$F_{TBS} = 2 \cdot F_2 \cdot \mu_{DB} \quad (54.)$$

Kde:  $F_{TBS}$ ... je trecia sila brzdového systému jedného kolesa

$F_2$ ... je prítlačná sila brzdových segmentov z rovnice (9.)

$\mu_{DB}$ ... koeficient dynamického trenia medzi brzdovým obložením a kotúčom

2... pôsobenie trecej sily je na oboch stranách brzdového kotúča

Z dôvodu, aby nedošlo k zablokovaniu kolies, musí platiť :

$$F_{TBS} \leq F_{BPKmax1} \quad (55.)$$

Následne si vyjadríme z rovnice (9.) silu  $F_2$  a dosadíme do rovnice (54.). Dostaneme:

$$F_{TBS} = 2 \cdot F_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \cdot \mu_{DB} \quad (56.)$$

Pre stanovenie maximálnej sily pôsobiacej na pedál musí platiť rovnosť rovnice (55.).

Dosadením rovnice (56.) do rovnice (55.) a vyjadrením sily  $F_1$  dostaneme vzťah:

$$F_{1\text{Max}_{v_{s0}}} = \frac{F_{\text{BPKmax1}} \cdot S_1}{S_2 \cdot \mu_{\text{DB}} \cdot 2} \quad (57.)$$

Kde:  $F_{1\text{Max}_{v_{s0}}}$ ... je maximálna sila, pôsobiaca na hlavný brzdový valec pri pristávaní

Rovnicu (51.) dosadíme do rovnice (3.) z ktorej platí:

$$F_{\text{Pmax}_{v_{s0}}} = \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{F_{\text{BPKmax1}} \cdot S_1}{S_2 \cdot \mu_{\text{D}} \cdot 2} \quad (58.)$$

Kde:  $F_{\text{Pmax}_{v_{s0}}}$ ... je maximálna možná sila vyvíjaná na oba brzdové pedále súčasne , pričom nedôjde k preklopeniu lietadla na nos

Finálny vzťah dostaneme úpravou rovnice (58.):

$$F_{\text{Pmax}_{v_{s0}}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{S_1}{S_2 \cdot \mu_{\text{DB}}} \cdot \frac{a}{h} \cdot F_{\text{G}} \quad (59.)$$

Tlak v hydraulickom systéme pri pristávaní  $P_{\text{Max}_{v_{s0}}}$  určíme rovnicou:

$$P_{\text{Max}_{v_{s0}}} = \frac{\frac{F_{\text{BPKmax1}} \cdot S_1}{S_2 \cdot \mu_{\text{D}} \cdot 2}}{S_1} = \frac{\frac{a}{2 \cdot h} \cdot F_{\text{G}}}{S_2 \cdot \mu_{\text{DB}} \cdot 2} \quad (60.)$$

A maximálny brzdový moment vzťahom:

$$M_{\text{Bmax}_{v_{s0}}} = F_{\text{TBS}} \cdot R_{\text{D}} \cdot 2 = \frac{a}{h} \cdot F_{\text{G}} \cdot R_{\text{D}} \quad (61.)$$

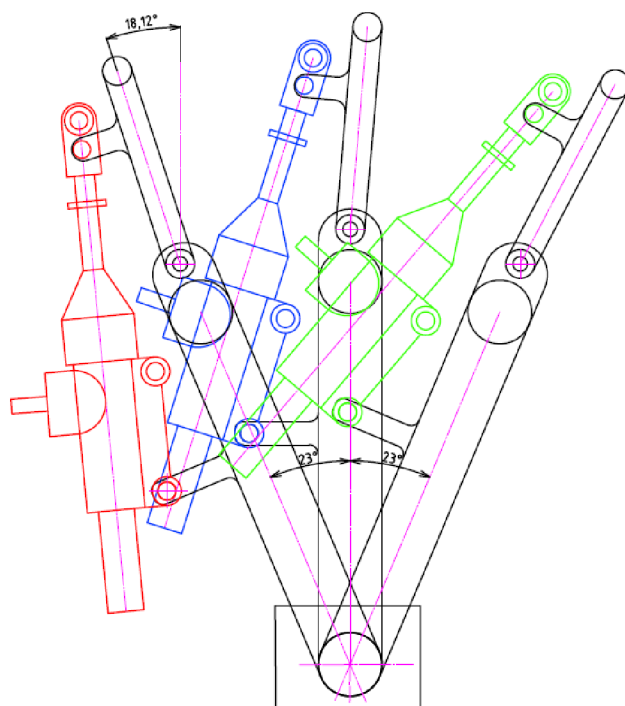
## 8. Konštrukčný návrh pedálového riadenia brzd

Pri návrhu konštrukcie brzdových pedálov a ich montáže k smerovým riadidlám lietadla, bolo cieľom zlepšiť celkovú ergonómiu novej zostavy voči aktuálnej konštrukcii. Pri aktuálnom stave vzniká z dôvodu zlej ergonómie problém, kedy pilot pri maximálnych výchylkách smerových riadidiel nie je schopný použiť maximálnu výchylku brzdového pedálu. Aktuálne zostavenie pedálov môžeme vidieť na Obrázku 29.

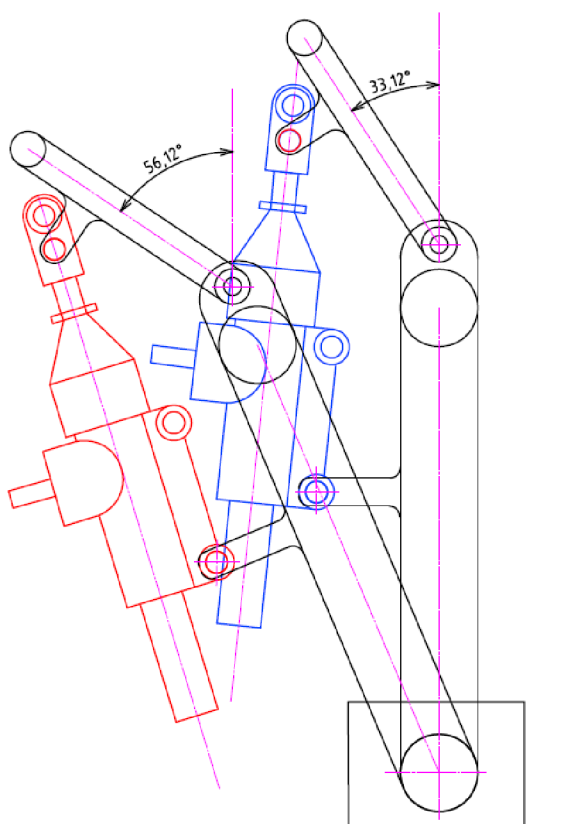


Obrázok 29. Aktuálna konštrukcia brzdového pedálu

Aby sme mohli porovnať stavy, pri ktorých dochádza k maximálnym výchylkám a porovnať ich, sme pomocou programu AutoCAD vytvorili náčrt aktuálnej zostavy aj nového návrhu. Na obrázku 30 je náčrt maximálnych výchyliek smerového riadidla pôvodnej zostavy, pričom brzdový pedál sa nachádza v pozícii, kedy naň nepôsobí žiadna vonkajšia sila. Obrázok 31 znázorňuje náčrt, kedy je výchylka smerového riadidla aj výchylka brzdového pedálu maximálna.



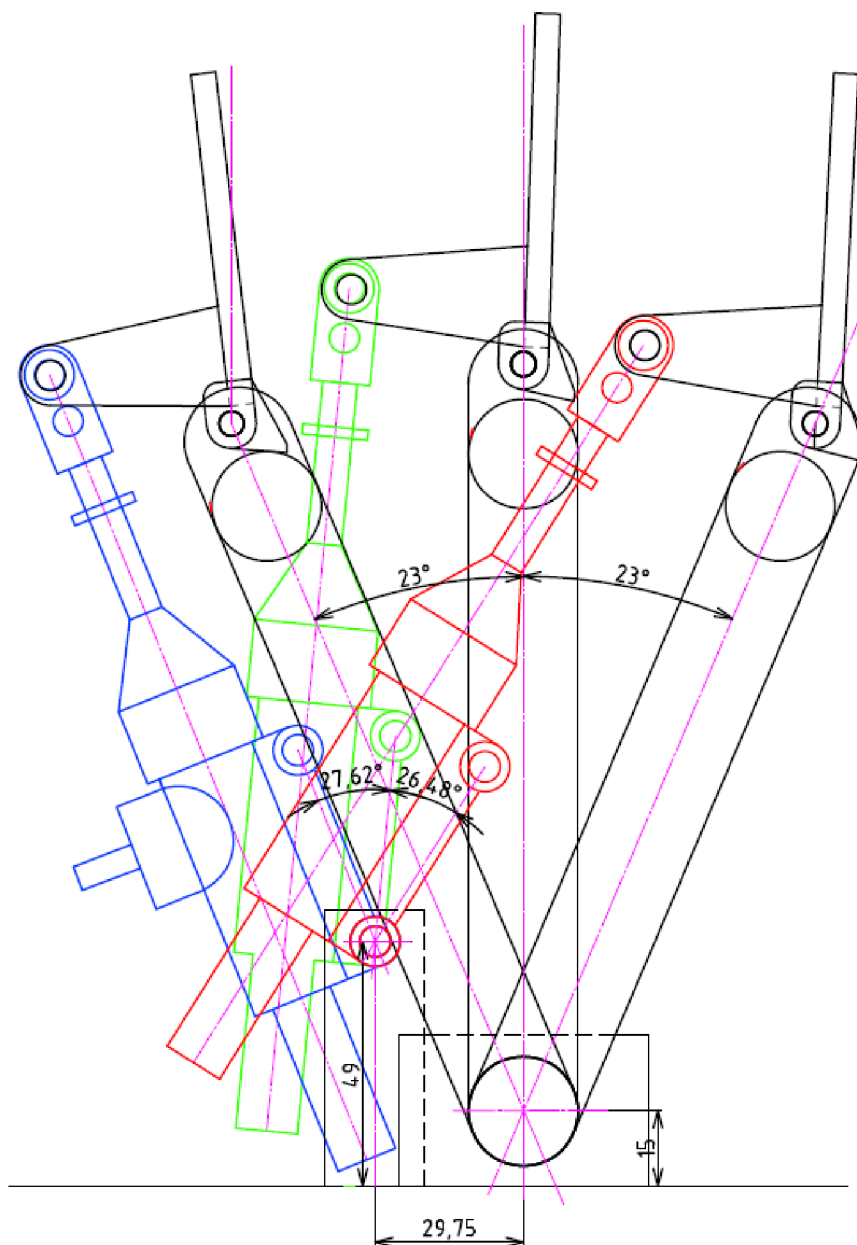
Obrázok 30. Pozícia brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla aktuálnej zostavy



Obrázok 31. Maximálna výchylka brzdového pedálu pri maximálnej výchylke smerového riadidla aktuálnej zostavy

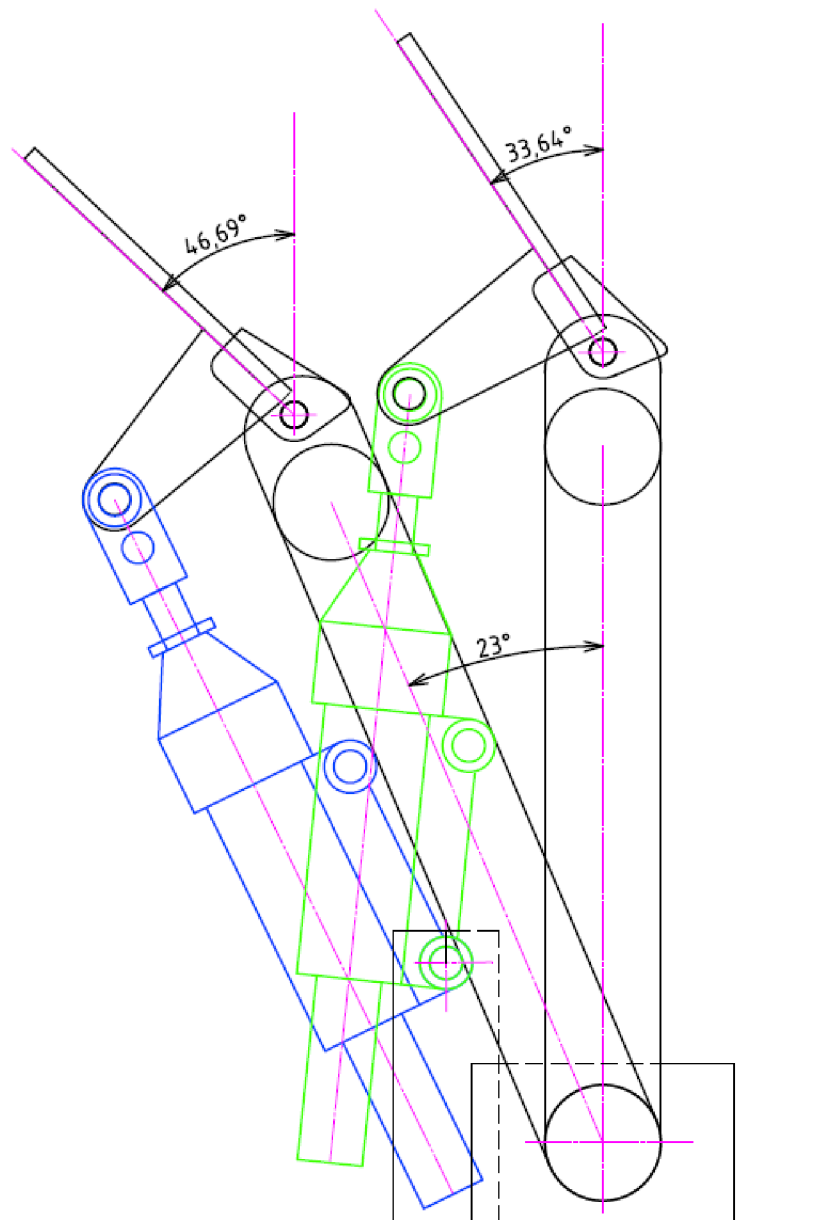
Pri návrhu novej možnej konštrukcie celkového zostavenia brzdového pedálu a smerových riadidiel, sme sa snažili zlepšiť celkovú ergonómiu ovládania brzdového pedálu a zároveň zachovať pôvodné smerové kormidla, čo by uľahčilo reálne prevedenie nového návrhu. Z tohto dôvodu sme sa rozhodli vylúčiť ovládanie brzdového systému pomocou päty alebo pomocou rozdeľovača tlaku v brzdovom systéme.

Návrh zostavy brzdových pedálov a ich maximálne výchylky môžeme vidieť na obrázkoch 32. a 33.



Obrázok 32. Pozícia brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla navrhutej zostavy

Porovnaním obrázkov 32 a 30 je zrejmé, že pomocou paralelogramu, využitého v návrhu zostavy, je poloha brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla voči chodidlu pilota nemenná. To zaručuje, že v každej výchylke smerového riadidla, bude pilotovi zaručené komfortné použitie brzdového pedálu.

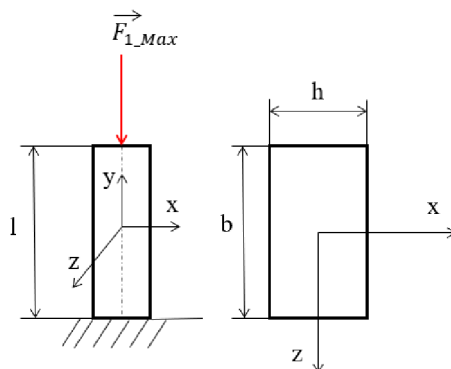


Obrázok 33. Maximálne výchylky brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla navrhovanej zostavy

Z obrázkov 31 a 33 môžeme určiť uhly natočenia brzdového pedálu, ktoré určujú polohu brzdového pedálu voči pilotovi. Pri aktuálnej zostave je uhol natočenia brzdového pedálu pri ktorom dôjde k maximálnej výchylke  $56,12^\circ$ . Navrhnutá zostava redukuje tento maximálny uhol natočenia na hodnotu  $46,64^\circ$ . Pilot teda pri situácii, kedy bude musieť použiť maximálnu výchylku smerového riadidla aj brzdového pedálu, nebude nútený natáčať chodidlo do neprirodzených pozícií, čo mu zaručí lepšie koncentrovanie sa na ostatné úkony počas pristávania.

## 8.1. Kontrola držiaka hlavného brzdového valca

Valec je upevnený na držiaku, ktorý je pevne priskrutkovaný k podlahe lietadla a udržuje hlavný brzdový valec v danej pozícii. Výkres držiaka sa je priložený v prílohách tejto práce (Príloha 2.). Je nutné previesť výpočet, či pridanom maximálnom zaťažení nedôjde k vybočeniu časti držiaka, čo by malo za následok nefunkčnosť celého brzdového systému. Držiak budeme považovať za prút s obdĺžnikovým prierezom a danou dĺžkou, pričom na jednej strane bude vetknutý (priskrutkovaný k podlahe) a druhá strana bude voľná. Piest ho zťaží excentricky, čo znamená, že predpokladáme že nositeľka zaťažujúcej sily bude prechádzať osou držiaka. Rozbor úvahy je na obrázku 34.



Obrázok 34. Zaťaženie držiaka hlavného brzdového valca

Výpočet kritickej sily, pri ktorej dôjde k vyoseniu držiaka vypočítame pomocou rovnice:

$$F_{\text{krit}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot J_z}{l^2}$$

Kde: E... je Youngov modul, pre oceľ E=207GPa

$J_z$ ... je kvadraticky moment prierezu k ose z

l... je dĺžka držiaka

Kvadratický moment prierezu k ose z vypočítame vzorcom, v ktorom použijeme hodnoty odčítane z výkresu držiaka:

$$J_z = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{15 \cdot 5^3}{12} = 156,25 \text{ mm}^4$$

Následne dostaneme:

$$F_{\text{krit}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 207 \cdot 156,25}{5^2} = 75.12 \text{ kN}$$

V našom prípade, maximálna sila pôsobiaca na držiak valca je

$$F_{1\_Max} = F_{Pmax} \cdot \frac{x_1}{x_2} = 1800 \text{ N}$$

Platí, že  $F_{1\_Max} \ll F_{\text{krit}}$ , takže k vyoseniu držiaka nedôjde.

## 9. Aplikácia poznatkov na výpočet brzdnej sily

V tejto časti bakalárskej práce budú prevedené výpočty podľa úvah a poznatkov vysvetlených v teoretickej časti bakalárskej práce.

### Technické parametre lietadla

Pre výpočet a stanovenie príslušných hodnôt vplyvajúcich brzdiacich síl na lietadlo, musíme poznať technické parametre lietadla. Tie môžeme získať z technickej knižky daného lietadla. V tejto bakalárskej práci budeme používať hodnoty jednotlivých parametrov z tabuľky umiestnenej v prílohe 4.

V tabuľke 4. sú popísané jednotlivé parametre komponentov brzdovej zostavy a hodnoty jednotlivých koeficientov trení, použitých pri výpočtoch.

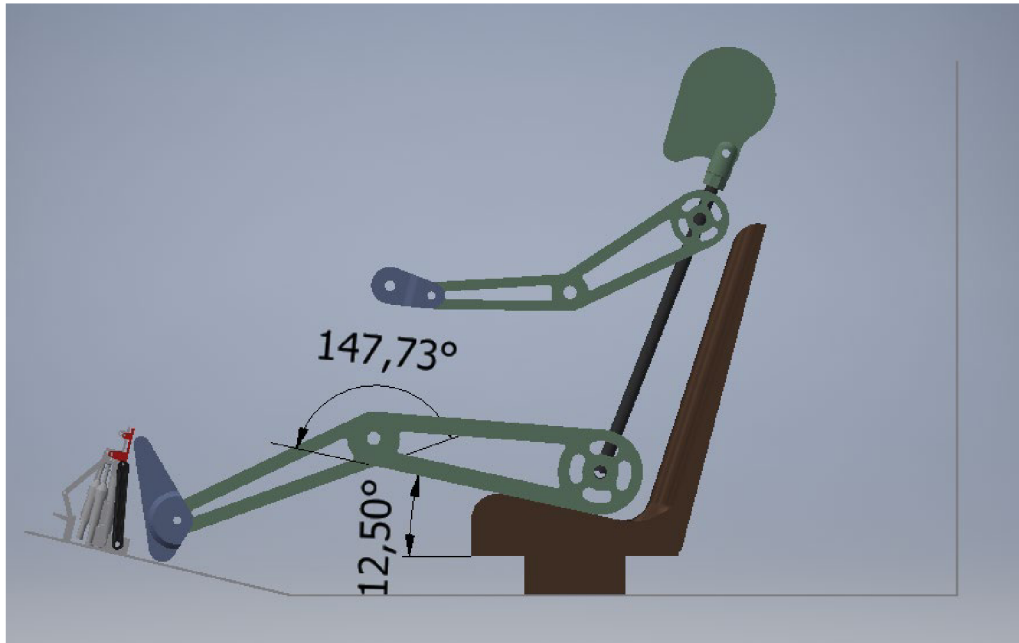
Tabuľka 4. Zoznam použitých hodnôt pri výpočtoch daných vzťahov

Označenie	Hodnota	Popis
$D_1$	12 mm	Priemer hlavného brzdového valca
$D_2$	42 mm	Priemer pracovného valca
$S_1$	113 mm <sup>2</sup>	Obsah plochy hlavného brzdového valca
$S_2$	1385 mm <sup>2</sup>	Obsah plochy pracovného valca
$\mu_{SB}$	0,6	Koeficient statického trenia brzdovej zostavy
$\mu_{DB}$	0,4	Koeficient dynamického trenia brzdovej zostavy
$\mu_{S P+B}$	0,8	Koeficient statického trenia, pneumatika + beton
$\mu_{S P+T}$	0,5	Koeficient statického trenia, pneumatika + tráva
$R_D$	92mm	Účinný polomer brzdy
$R_T$	175mm	Polomer pneumatiky

### 9.1. Maximálna sila vyvinutá na brzdový pedál

Od sily, ktorú je pilot schopný vyvinúť na brzdový pedál, závisí celková brzdná sila brzdovej zostavy. Ako bolo uvedené v kapitole 5.3., sila vyvinutá na brzdový pedál je závislá na posede pilota a na umiestnení nožných riadiel. Poloha sedačky a nožného ovládania teda definujú veľkosti uhlov  $\alpha$  a  $\beta$ , podľa ktorých môžeme z grafu 1 . určiť približnú veľkosť sily, ktorou je pilot schopný pôsobiť na brzdový pedál. Pre presnejšie stanovenie uhlov  $\alpha$  a  $\beta$  sme pomocou programu Inventor vytvorili maketu kokpitu, do ktorej sme umiestnili siluetu pilota. Následne sme boli schopní určiť hodnoty uhlov  $\alpha$  a  $\beta$  a odčítaním z grafu aj výslednú maximálne možnú silu pôsobiacu na pedál vyvolanú pilotom. Obrázok 34.



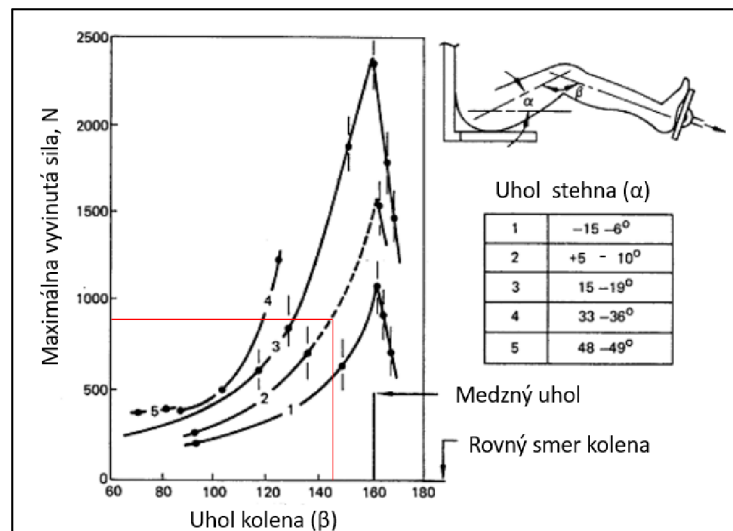


Obrázok 35. Posed pilota v kokpíte lietadla

Z obrázka34. môžeme určiť uhly  $\alpha$  a  $\beta$ .

Kde:  $\alpha = 12,50^\circ$

$\beta = 147,73^\circ$



Z grafu 1. sme následne schopní odčítať pomocou uhlov  $\alpha$  a  $\beta$  približnú silu pôsobiacu na pedál.

$$F_{Pmax} = 900N$$

Tým je čiastočne splnená podmienka predpisu UL-2. Pilot z hľadiska ergonómie usadenia v kokpíte dokáže vyvinúť väčšiu silu, ako je minimálna sila stanovená predpismi. Avšak ostáva určiť silu, ktorou musí pilot pôsobiť na brzdoý pedál, ak chce lietadlo zastaviť. Výsledná sila, ktorou bude pilot pôsobiť na brzdoý pedál nesmie prekročiť hodnotu 400 N, stanovenú predpismi.

### Sila pôsobiaca na hlavný brzdový valec

Použitím rovnice (5.) vypočítame maximálnu silu pôsobiacu na hlavný brzdový valec. Hodnoty  $x_1$  a  $x_2$  odčítame z návrhového výkresu pedálu (Príloha 1). Po dosadení daných parametrov dostaneme:

$$F_{1\_Max} = F_{Pmax} \cdot \frac{x_1}{x_2} = 1800 \text{ N}$$

### Prítlačná sila brzdového obloženia

Maximálna prítlačná sila  $F_{2\_Max}$ , pôsobiaca na brzdové obloženie pri maximálnej vyvinutej sile na pedál  $F_{Pmax}$ , je vypočítaná pomocou rovnice (9.), v ktorej sa použijú dané hodnoty parametrov z tabuľky 3.

$$F_{2\_Max} = F_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} = 22,06 \text{ kN}$$

## 9.2. Výpočet brzdnej sily pri maximálnom ťahu lietadla

Pri výpočte maximálnej brzdnej sily pri maximálnom ťahu, sa budeme riadiť postupom uvedeným v kapitole 8.1. Vyčíslením rovnice (14.) v ktorej použijeme vypočítanú maximálnu prítlačnú silu  $F_{2\_Max}$ , dostaneme maximálnu celkovú treciu silu medzi brzdovým kotúčom a platničkami.

$$F_{BK\_Max} = P \cdot S_2 \cdot \mu = F_{2\_Max} \cdot \mu_{SB} = 13,24 \text{ kN}$$

$$F_{BCK\_Max} = 2 \cdot F_{BK\_Max} = 26,48 \text{ kN}$$

Pri zatlačení na oba brzdové pedále maximálnou silou  $F_{Pmax}$ , sú zabrzdené obidva kolesa hlavného podvozku a sila  $F_{BCK\_Max}$  je teda dvojnásobná. Brzdový systém teda generuje maximálnu brzdnu silu vyjadrenú ako:

$$F_T = 2 \cdot F_{BCK\_Max} \cdot \frac{R_D}{R_T} = 27,8 \text{ kN}$$

Aby lietadlo pri maximálnych otáčkach vrtule ostalo zabrzdené, musí platiť vzťah z rovnice (17.), kde  $F_{TAH} = 1200 \text{ N}$ :

$$F_T > F_{TAH}$$

Tento vzťah platí, z čoho môžeme usúdiť, že brzdová sústava generuje dostatočnú brzdnu silu na to, aby lietadlo pri maximálnom ťahu motora ostalo v nehybnom stave. Môže však nastať situácia, kde pneumatiky nebudú schopné preniesť brzdnu silu brzdovej sústavy na povrch zeme, čoho následkom by bol pohyb lietadla avšak so zablokovanými kolesami (šmyk kolies). Tento dej môže nastať, ak koeficient trenia medzi pneumatikami a plochou bude nízky (ľad, sneh)

Vypočítané hodnoty sú maximálne, čo je z pohľadu komfortnosti brzdzenia nevyhovujúce, avšak dokazujú, že brzdový systém je v stave udržať lietadlo v nehybnom stave aj pri maximálnom ťahu motora. Minimálnu silu pôsobiacu na oba brzdové pedále, pričom tato sila je na oboch pedáloch rovnaká, určíme z rovnice (23.)

$$F_{P\_Tah} = \frac{x_2 \cdot S_1 \cdot R_T \cdot F_{Tah}}{x_1 \cdot S_2 \cdot R_D \cdot \mu_{SD}} = 155,2N$$

Pri udržaní lietadla v nehybnom stave, musí teda pilot vyvinúť minimálnu silu o hodnote 155,2N na oba pedále súčasne. V porovnaní s maximálnou silou  $F_{Pmax}$ , ktorú je pilot schopný vyvinúť na brzdoý pedál, predstavuje sila  $F_{P\_Tah}$  približne 8% sily  $F_{Pmax}$ , čo je z hľadiska ergonomie vyhovujúce. Súčasne veľkosť sily  $F_{P\_Tah}$  vyhovuje aj z hľadiska podmienky danej predpismi UL2, keďže platí:

$$F_{P\_Tah} < 400 N$$

Vyčíslením rovnice (21.) môžeme určiť hodnotu tlaku v hydraulickom systéme pri pôsobení sily  $F_{P\_Tah}$  na brzdoý pedál. Dostaneme:

$$P_{Tah} = \frac{F_{Tah} \cdot R_T}{S_2 \cdot R_D \cdot \mu_{SD}} = 2,747 MPa$$

### 9.3. Výpočet maximálnej brzdoej sily pri pristávaní.

Z hľadiska výpočtu veľkosti brzdoej sily je najdôležitejší stav, pri ktorom môže dôjsť k preklopeniu lietadla na nos. Ako bolo uvedené v teórii, výsledná brzdoá sila je závislá na polohe ťažiska lietadla, ktoré definuje hraničnú podmienku koeficientu trenia, pri ktorom môže dôjsť k preklopeniu lietadla. Dosadením do rovnice (38.) dostaneme:

$$\mu_s \geq \frac{340mm}{1300mm} \geq 0,26$$

$\mu_s = 0,26$  určuje hraničnú podmienku. Tento kritický koeficient trenia, je skoro vo všetkých prípadoch pristávania, či už na trávinatej alebo betónovej dráhe, menší, z čoho môžeme usúdiť, že pri pevných povrchoch vzniká stále riziko preklopenia lietadla na nos. Kritickú brzdoú silu, pri ktorej ešte nedôjde k preklopeniu lietadla, vypočítame z rovnice (51.).

$$F_{BPKmax} = \frac{a}{h} \cdot F_G = 1257 N$$

Na jednom kolese hlavného podvozku teda môže byť vyvinutá maximálna sila daná vzťahom (53.)

$$F_{BPKmax1} = \frac{F_{BPKmax}}{2} = 628.5 N$$

Pri vyvinutí sily  $F_{BPKmax1}$  bude na hlavný brzdoý valec pôsobiť sila

$$F_{1Max_{v_{s0}}} = \frac{F_{BPKmax1} \cdot S_1}{S_2 \cdot \mu_{DB} \cdot 2} = 64N$$

Maximálna sila, ktorú môže pilot pri pristávaní pôsobiť na brzdoý pedál, aby nedošlo k preklopeniu lietadla je daná rovnicou (59.) z ktorej po vyčíslení obdržíme:

$$F_{Pmax_{v_{s0}}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{S_1}{S_2 \cdot \mu_D} \cdot \frac{a}{h} \cdot F_G = 32N$$

Z hľadiska ergonomie, nie je problém vyvinúť silu  $F_{Pmax_{v_{s0}}}$ , ktorá predstavuje približne 2% maximálnej sily, ktorú je pilot schopný vyvolať na brzdoý pedál. Z dôvodu, že hodnota sily

$F_{P_{\max_{v_{s0}}}}$  je nízka, môžeme usúdiť, že riziko preklopenia lietadla na nos je vysoké. Pri riziku preklopenia musí byť pilot lietadla pripravený zasiahnuť pomocou výškového kormidla, aby pri silnom zatlačení na brzdové pedále nedošlo k preklopeniu lietadla na nos. AJ v tomto prípade je splnená podmienka daná predpisom UL2, keďže platí:

$$F_{P_{\max_{v_{s0}}} < 400 \text{ N}$$

Pri pristávaní, bude maximálny tlak v hydraulickom systéme podľa rovnice (59.)

$$P_{\text{Max}_{v_{s0}}} = \frac{\frac{a}{2 \cdot h} \cdot F_G}{S_2 \cdot \mu_{DB} \cdot 2} = 0,56 \text{ MPa}$$

Maximálny brzdový moment dostaneme vyčíslením rovnice (61.)

$$M_{\text{Bmax}_{v_{s0}}} = \frac{a}{h} \cdot F_G \cdot R_D = 115,66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Podľa rovnice (44.) môžeme vypočítať spomalenie lietadla

$$a_{\text{Bmax}} = \frac{F_{\text{BPKmax}}}{m} = \frac{a \cdot F_G}{h \cdot m} = 2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Brzdnú dráhu pri zanedbaní ďalších vonkajších síl, pôsobiacich proti smere pohybu, môžeme určiť podľa:

$$S = \frac{v_0^2}{2 \cdot a_{\text{Bmax}}} = 74 \text{ m}$$

### Výpočet pohltenej kinetickej energie

Brzdové kotúče spolu s brzdovým obložením musia byť schopné pohltiť vzniknuté teplo v dôsledku premeny kinetickej energie lietadla. Pri stanovení výslednej teploty kotúčov po brzdení využijeme jednotlivé vzťahy z kapitol 2 a 3.

Použitím rovnice (1.) dostaneme:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \frac{m \cdot V^2}{N} = 41,9 \text{ kJ}$$

Výpočet navýšenia teploty brzdového kotúča dostaneme pomocou rovnice (3.)

$$\Delta T = \frac{E_{\text{kin}}}{c \cdot m_{\text{RK}}} = 193 \text{ }^\circ\text{C}$$

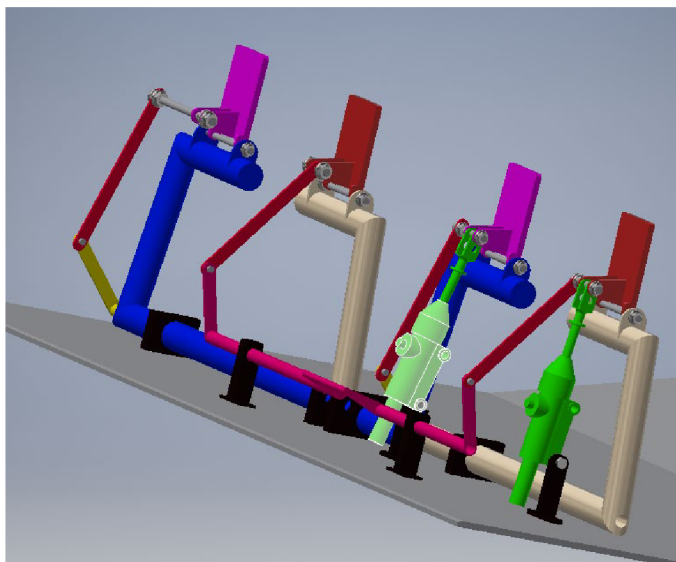
Kde:

$$m_{\text{RK}} = \pi \cdot (R_p - r_p)^2 \cdot t_k \cdot \rho = 0,47 \text{ kg}$$

Výsledná hodnota navýšenia teploty  $\Delta T$  je však iba orientačná a v praxi nedôjde, aby sa kotúče na danom lietadle zahriali o  $200^\circ\text{C}$ , iba ak by pristávalo na vyššej rýchlosti). A to z dôvodu, že sme nezapočítali ostatné faktory, ktoré znižujú kinetickú energiu lietadla (aerodynamický odpor) alebo zapríčiňujú disipáciu tepla do okolia (chladenie brzd pomocou obtekajúceho vzduchu, šírenie tepla celým materiálom a nie len v kontakte s brzdovým obložením)

## 9.4.Návrh dvojitého riadenia brzdových pedálov

Pre návrh zdvojeného riadenia brzdového systému sme použili dva rôzne prístupy k problematike. Na obrázku 35. je znázornený koncept zdvojeného riadenia pomocou tiahiel, ktoré mechanicky prenášajú silové momenty z jedného pedálu na druhy. Nevýhodou tohto prevedenia, je jeho komplikovanosť z hľadiska prepákovania, čo vedie k zníženiu tuhosti celkového systému dvojitého riadenia a bol by príčinou mŕtvych chodov pedálov kopilota.



Obrázok 36 Zdvojené riadenie brzdových pedálov pomocou tiahiel

Praktickejšia možnosť prevedenia dvojitého riadenia je využitie prepojenia pedálov pomocou hydraulického vedenia a hydraulických valcov. Prepojenie pomocou hydraulického systému je výhodnejšie, či už z hľadiska hmotnosti alebo konštrukčných prevedení. Výhodou hydraulického systému je, že nenastávajú skoro žiadne mŕtve chody prepojených pedálov ani oneskorená odozva pri brzdení. Systém hydraulického prepojenia je zobrazený na obrázku 16. Pri prepojení hydraulickým systémom, by bolo nutne zakúpiť ďalšie dva hlavné hydraulické valce. Z katalógov predajcov sú k dispozícii rôzne hydraulické valce rôzneho prevedenia s rôznym priemerom hlavného valca.

## **Záver**

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť ovládanie brzdového systému, pričom mali byť zlepšené charakteristiky ergonomie ovládania. Nová koncepcia uloženia brzdového pedála a jeho prepojením s hydraulickým systémom pomocou paralelogramu zjednodušila ovládanie brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla. Zlepšená ergonomia ovládania je základom toho, aby bol pilot schopný vyvolať v každej výchylke smerového riadidla a za každých okolností dostatočnú silu, a tým aj dostatočný tlak v hydraulickom systéme pri brzdení. Zároveň sme stanovili maximálne sily, ktorými môže pilot na danom lietadle a za daných okolností pôsobiť na brzdové pedále, aby nedošlo k preklopeniu lietadla na nos. Taktiež môžeme poukázať na to, že systém zdvojeného riadenia prevedený pomocou ťahiel nie je v tomto prípade výhodný. Najlepšie riešenie teda bude nainštalovať dvojité riadenie pomocou hydraulického prepojenia jednotlivých hlavných hydraulických valcov.

## Zoznam použitej literatúry a ďalších zdrojov

- [1] OLŠANSKÝ, Oldřich a Jiří MATĚJČEK. *Konstrukce a výpočet ultralehkých letounů: Příručka pro amátorské stavitele*. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 1999.
- [2] GUDMUNDSSON, Snorri. *General Aviation Aircraft Design - Applied Methods and Procedures*. 2014. Elsevier. ISBN 978-0-12-397308-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGAADAMP8/general-aviation-aircraft/general-aviation-aircraft>
- [3] *Předpis UL 2 – Část I. Požadavky letové způsobilosti SLZ: Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. Praha: Ke Kablu 289, 2019. Dostupné z: [http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I\\_26.3.2019.pdf](http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf)
- [4] *CERTIFIKAČNÍ SPECIFIKACE PRO LETOUNY KATEGORIE NORMÁLNÍ, CVIČNÁ, AKROBATICKÁ A PRO SBĚRNOU DOPRAVU:CS-23 [online]*. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>
- [5] *Aircraft systems tech: Aircraft Brakes [online]*. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: [https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes\\_9081.html](https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes_9081.html)
- [6] *Učebnice pilota*. Arnošt MOUCHA ,SVĚT KRÍDEL, 2016. ISBN 978-80-87567-89-0
- [7] JANCO, Marcel. *Autorubrik: Brzdy a brzdový systém automobilu [online]*. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/brzdy-a-brzdovy-system-automobilu/>
- [8] *Product Catalog: Cleveland Wheels & Brakes*. 2018. AWBPC0001-25/USA. Dostupné z: <https://www.parker.com/literature/Aircraft%20Wheel%20&%20Brake%20Division/AWB%20Static%20Files%20for%20Literature/AWBPC0001.pdf>
- [9] CURREY, Norman S.. (1988). *Aircraft Landing Gear Design - Principles and Practices*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpALGDPP06/aircraft-landing-gear/aircraft-landing-gear>
- [10] KLEJCH, Petr. *Výpočet kotoučových brzd [online]*. Praha, 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70718/F2-BP-2017-Klejch-Petr-bakalarska\\_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70718/F2-BP-2017-Klejch-Petr-bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová.
- [11] *Dixcel : Advanced brake technology [online]*. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <http://www.dixcel.co.jp/en/subcontent/literature/literature03.html>
- [12] *WoodWorkerB: 240Z – Parking Brake Refurbish [online]*. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://woodworkerb.com/home/datsun-240z-rebuild/datsun-240z-parking-brake-refurbish/>
- [13] *FlyGerry: Brake/Hydraulic System [online]*. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.flygerry.com/aircraft-systems/brake-hydraulic-system>

- [14] NASA.gov: *Leg Strength at Various Knee and Thigh Angles* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section04.htm>
- [15] Limpert, Rudolf. (2011). *Brake Design and Safety (3rd Edition)*. SAE International. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBDSE0003/brake-design-safety-3rd/brake-design-safety-3rd>
- [16] Hodges, Peter Keith Brian. (1996). *Hydraulic Fluids*. Hanser Publishers. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHF000001/hydraulic-fluids/hydraulic-fluids>
- [17] *Brake Fluid: What You Should Know (Part I)* [online]. 2017. Dostupné z: <https://greenlab.lt/wp-content/uploads/2017/05/Brake-Fluid-what-you-should-know.pdf>  
<http://www.rocheoil.com/sds/249.pdf>
- [18] *Aeroshell Hydraulic fluids* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [https://www.shell.com/business-customers/aviation/aeroshell/knowledge-centre/the-aeroshell-book/jcr\\_content/par/textimage\\_1433441235.stream/1519764659863/50dd52fd4fce5d8a22ec69e7db85f0d7d26c50ca/aeroshell-book-6hydraulics.pdf](https://www.shell.com/business-customers/aviation/aeroshell/knowledge-centre/the-aeroshell-book/jcr_content/par/textimage_1433441235.stream/1519764659863/50dd52fd4fce5d8a22ec69e7db85f0d7d26c50ca/aeroshell-book-6hydraulics.pdf)
- [19] *Brake system design and theory* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://groveaircraft.com/braketheory.pdf>
- [20] *WaBis: Bremsweg eines Verkehrsflugzeugs* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://walter.bislins.ch/aviatik/index.asp?page=Bremsweg+eines+Verkehrsflugzeugs>
- [21] BIELMEIER, Carsten. *Fahrradphysik*. 2012. Dostupné z: [https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11010700/\\_imported/fileadmin/11010700/Didaktik/Zulassungsarbeiten/HA\\_1622196\\_Bielmeier\\_Carsten.pdf](https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11010700/_imported/fileadmin/11010700/Didaktik/Zulassungsarbeiten/HA_1622196_Bielmeier_Carsten.pdf). Schriftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Vedoucí práce Thomas Geßner.



## **Zoznam tabuliek**

Tabuľka 1. Fyzikálne charakteristiky ocele brzdových kotúčov [10].....	24
Tabuľka 2. Charakteristické vlastnosti syntetických kvapalín [16].....	38
Tabuľka 3. Kompatibilita, znášateľnosť hydraulických kvapalín s inými materiálmi [17].....	39
Tabuľka 4. Zoznam použitých hodnôt pri výpočtoch daných vzťahov .....	56

## Zoznam obrázkov

Obrázok 1. Podvozok s ostrohovým kolesom [1].....	15
Obrázok 2. Podvozok predného typu [1].....	16
Obrázok 3. Zaťaženie brzdeného kolesa [1].....	17
Obrázok 4 Jednoduchá kotúčová brzda .....	18
Obrázok 5. Bubnová čeľušťová brzda [6].....	19
Obrázok 6. Dušičková (komorová) brzda [6].....	20
Obrázok 7. Podrobný pohľad na kotúčovú brzdu s plávajúcim strmeňom [8].....	21
Obrázok 8. Plávajúci strmeň [7] .....	22
Obrázok 9. Kotúčová brzda s plávajúcim diskom [5].....	23
Obrázok 10. Samočinné nastavovanie brzdy (upravené) [5].....	23
Obrázok 11. Ovládanie brzdových pedálov cez špičku .....	25
Obrázok 12. Poloha brzdových pedálov v maximálnych výchylkách smerového kormidla...	25
Obrázok 13. Brzdový systém ovládaný päťami .....	26
Obrázok 14. Systém riadenia tiahlom (upravené) [5].....	27
Obrázok 15. Sústava lanového riadenia (upravené) [12].....	28
Obrázok 16. Sústava hydraulického riadenia brzd (upravené) [13] .....	28
Obrázok 17. Dvojité nožne riadenie - za sebou a vedľa seba .....	29
Obrázok 18. Pôsobenie síl na pedál (upravené) [2].....	30
Obrázok 19. Znázornenie Pascalovho zákona pomocou hydr. lisu .....	31
Obrázok 20. Prepojenie hlavných brzdových valcov s pedálmi riadenia (upravené) [5].....	33
Obrázok 21. Hydraulický okruh s jedným rezervoárom hydraulickej kvapaliny (upravené) [5] .....	34
Obrázok 22. Hlavný brzdový valec so vzdialeným rezervoárom hydraulickej kvapaliny (upravené) [5].....	35
Obrázok 23. Brzdový valec s integrálnym zásobníkom (upravené) [5] .....	36
Obrázok 24. Ťah a trecia sila pôsobiaca pri štarte (upravené)[19] .....	40
Obrázok 25. Závislosť medzi polomerom brzdy a polomerom brzdeného kolesa (upravené) [19] .....	41
Obrázok 26. Statická rovnováha lietadla (upravené) [19] .....	42
Obrázok 27. Vplyv brzdnej sily na dynamiku lietadla (upravené) [19] .....	45
Obrázok 28. Vplyv ďalších vonkajších síl pôsobiacich na lietadlo pri pristávaní (upravené) [19] .....	49
Obrázok 29. Aktuálna konštrukcia brzdového pedálu.....	51

Obrázok 30. Pozícia brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla aktuálnej zostavy.....	52
Obrázok 31. Maximálna výchylka brzdového pedálu pri maximálnej výchylke smerového riadidla aktuálnej zostavy .....	52
Obrázok 32. Pozícia brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla navrhutej zostavy .....	53
Obrázok 33. Maximálne výchylky brzdového pedálu pri maximálnych výchylkách smerového riadidla navrhovanej zostavy .....	54
Obrázok 34. Zaťaženie držiaka hlavného brzdového valca .....	55
Obrázok 35. Posed pilota v kokpite lietadla .....	57
Obrázok 36. Zdvojene riadenie brzdových pedálov pomocou tiahiel .....	61

## Zoznam použitých skratiek a symbolov

Značka	Jednotky	Popis
$E_{kin}$	[J]	Kinetická energia na koleso
$m$	[kg]	Návrhová pristávacia hmotnosť
$V$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Rýchlosť lietadla
$N$		Počet kolies hlavného podvozku
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$c$	[J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Merná tepelná kapacita
$\lambda$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivosť materiálu
$Q$	[J]	Teplo
$\Delta T$	[°C]	Zmena teploty
$\mu_{DB}$		Koeficient dynamického trenia kotúča a brzdových platničiek
$\mu_{SB}$		Koeficient statického trenia kotúča a brzdových platničiek
$M$	[N · m]	Točivý moment
$F_p$	[N]	Sila pôsobiaca na pedál
$F_1$	[N]	Sila pôsobiaca na hlavný brzdový valec od pedálu
$x_1, x_2$	[m]	Charakteristické rozmery pedálu
$S_1$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah plochy hlavného brzdového valca
$S_1$	$S_1$	Obsah plochy pracovného brzdového valca
$\Delta l_1, \Delta l_2$	[m]	posun (zdvih) valcov
$F_{Tah}$	[N]	Ťah motora
$F_T$	[N]	Celková brzdna sila
$F_{BCK}$	[N]	Výsledná brzdna sila segmentov pri max. ťahu motora
$R_D$	[m]	Účinný polomer brzdy
$M_B$	[N · m]	Brzdiaci moment
$R_T$	[m]	Polomer pneumatiky
$F_G$	[N]	Tiažová sila lietadla
$F_{PK}$	[N]	Reakčná sila predného kolesa
$F_{ZK}$	[N]	Reakčná sila zadného kolesa
$a, b, h, c$	[m]	Jednotlivé rozmery lietadla
$F_{BCmax}$	[N]	Maximálna brzdna sila
$F_{BC}$	[N]	Celková brzdna sila
$\mu_S$		Koeficient statického trenia medzi pneu. a podložkou

$F_{BPKmax}$	[N]	Maximálna brzdná sila na predných kolesách
$a_{Bmax}$	$[m \cdot s^{-2}]$	Maximálne spomalenie pri brzdení
$F_{PK1}$	[N]	Zaťaženie jedného kolesa na prednom podvozku
$F_{TBS}$	[N]	Trecia sila brzdneho systému jedného kolesa
$F_{BPKmax1}$	[N]	Max. brzdná sila jedného kolesa hlavného podvozku
$F_{Pmax\_vo}$	[N]	Max. sila pôsobiaca na pedál pri pristávacej rýchlosti
$P_{Max\_vs0}$	[Pa]	Maximálny hydraulický tlak pri pristávaní
$M_{Bmax\_vs0}$	$[N \cdot m]$	Maximálny brzdový moment
$E$	[GPa]	Youngov modul pružnosti
$J_z$	$[mm^4]$	Kvadratický moment prierezu k ose z

## **Zoznam príloh**

Príloha 1. Výkres brzdového pedálu .....	A
Príloha 2. Graf 1. Veľkosť vyvinutej sily na pedál z hľadiska posedu pilota (upravené) [14] ...	B
Príloha 3. Výkres držiaka hlavného brzdového valca .....	C
Príloha 4. Technické parametre lietadla .....	D