VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH ŘÍZENÉHO PŘÍĎOVÉHO PODVOZKU PRO LETOUN PS-28 CRUISER

FRONT LANDING GEAR DESIGN OF PS-28 CRUISER AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Peter Marcinko**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Tomáš Katrňák**
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	**Bc. Peter Marcinko**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	**Ing. Tomáš Katrňák**
Akademický rok:	2015/16

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

Návrh řízeného příďového podvozku pro letoun PS-28 Cruiser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte konstrukční řešení řízeného příďového podvozku pro jednomotorový letoun PS-28 Cruiser dle předpisu CS-LSA. Typově certifikovaný cvičný letoun PS-28 Cruiser je v leteckých školách intenzivně využíván pro výcvik pilotů. Jeho příďový podvozek je neřízený, vlečeného typu. Řízení letounu na zemi je prováděno brzdami hlavních podvozkových kol, což vede ke zvýšenému opotřebování brzdového obložení. Při provozu z travnatých ploch je příďový podvozek zatěžován tvrdším provozním zatížením, které je třeba eliminovat.

Cíle diplomové práce:

- Navrhnout příďový podvozek řízeného typu.
- Zlepšit absorpční charakteristiky příďového podvozku.
- Na základě dodaného měření spektra zatížení příďového podvozku provést konstrukční návrh olejo-pneumatického tlumiče s výkresy hlavních konstrukčních detailů.
- Zpracovat výpočtovou zprávu návrhu tlumiče a jeho uchycení.
- Zpracovat výkresy konstrukční sestavy a hlavních detailů podvozku.
- Zpracovat základní pevnostní analýzu podvozkové nohy a jejího uchycení.

Seznam literatury:

Mertl, V. (2000): Konstrukce a projektování letadel, VUT-FSI, Brno.

Daněk, V. (2000): Projektování letadel, VUT-FSI, Brno.

Torenbeek, E. (1976): Synthesis of Subsonic Airplane Design, Delft University.

Roskam, J. (1989): Airplane Design (Parts), University of Kansas.

Letecký stavební předpis CS-LSA, EASA, 2011.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Tato práca sa zaoberá návrhom riadeného predného podvozku s hydropneumatickým tlmičom určeného pre letún PS-28 Cruiser. V Práci je spracovaný návrh podvozkov a výber vhodnej varianty. V práci je ďalej spracovaný návrh hydropneumatického tlmiča a porovnanie s nameraným zaťažením. V závere práce bol vytvorený konštrukčný návrh predného podvozku.

Kľúčové slová

Ľahký športový letún, hydropneumatický tlmič, návrh podvozku, riadený podvozok

Abstract

This diploma thesis deals with the design of the front landing gear with steering nose leg and hydropneumatic shock absorber, designed for aircraft PS - 28 Cruiser. In the thesis there was created design of basic types of front landing gear and the best option was selected. The work is further elaborated design of hydropneumatic shock absorber and comparise with the measured load. At the end of the work it was created the structural design of the front landing gear.

Keywords

Light sport aircraft, hydropneumatic shock absorber, landing gear design, steerable landing gear

Bibliografická citácia

MARCINKO, P. *Návrh řízeného příďového podvozku pro letoun PS-28 Cruiser*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Katrňák.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že tuto prácu som vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho diplomovej práce Ing. Tomáša Katrňáka. s použitím uvedených zdrojov.

....

V Brně dňa Peter Marcinko

Poďakovanie

V prvom rade ďakujem za pomoc, návrhy a pripomienky vedúcemu diplomovej práce Ing. Tomášovi Katrňákovi. Ďalej by som chcel poďakovať pánovi Ing. Jiřímu Konečnému za poskytnutie podkladov pre vypracovanie diplomovej práce.

Obsah

1 Úvod 6

2 Pristávacie zariadenie 7

2.1 Požiadavky kladené na podvozky 7

2.2 Koncepčné usporiadanie podvozku 7

2.2.1 Pristávacie zariadenie s ostruhovým kolesom 7

2.2.2 Podvozok predného typu 8

2.2.3 Tandemové usporiadanie podvozku 8

2.2.4 Zaťahovací a pevný podvozok 9

2.3 Podvozkové tlmiče 9

2.3.1 Pružinové tlmiče 9

2.3.2 Gumové tlmiče 10

2.3.3 Hydraulické tlmiče 10

2.3.4 Hydropneumatické tlmiče 10

3 Prehľad používaných typov podvozkov ultraľahkých lietadiel 12

3.1.1 TL-2000 Sting 12

3.2 TL- 3000 Sirius 14

3.2.1 Zenith Zodiac CH 650 16

3.2.2 Bristell NG-5 LSA 17

3.2.3 WT9 Dynamic 17

4 Popis letúna PS-28 Cruiser 20

5 Základná technická špecifikácia letúna 21

5.1 Predný podvozok 21

6 Návrh variant predného podvozku 23

6.1 Model pôvodného variantu podvozku 23

6.2 Návrh č 1: Kyvný riadený podvozok 23

6.3 Návrh č. 2: Teleskopický riadený podvozok s uchytením na prepážku 25
6.4 Návrh č.3: Teleskopický riadený podvozok s uchytením na uloženie motora 27
6.5 Návrh č. 4: Pákový riadený podvozok s uchytením na prepážku 29
6.6 Návrh č. 5: Pákový riadený podvozok s uchytením na uloženie motora 30
..... 30
..... 31
6.7 Zhodnotenie návrhov a výber výslednej varianty 31
7 Detailný návrh podvozku 33
7.1 Výpočet zaťaženia podvozku letúna pri státí na zemi 33
7.1.1 Výpočet silových reakcií podvozku pre prednú centráž 34
7.1.2 Výpočet silových reakcií pre zadnú centráž 35
7.1.3 Výsledky statického zaťaženia podvozku 35
7.2 Voľba pneumatiky predného podvozku 35
7.3 Návrh hydropneumatického tlmiča 38
7.3.1 Výpočet maximálneho zdvihu tlmiča 40
7.3.2 Výpočet priemeru piestu 40
7.3.3 Výpočet objemu plynu vo valci 42
7.3.4 Pracovný diagram tlmiča 43
7.4 Návrh riadenia podvozku 45
7.5 Návrh uloženia podvozku 46
8 Výpočet zaťaženie podvozku 48
8.1 Výpočet násobku 48
8.2 Zaťaženie pri vodorovnom pristátí so sklonenými reakciami 49
8.2.1 Výpočet vertikálnej zložky tiažovej sily 50
8.2.2 Výpočet horizontálnej zložky tiažovej sily 50
8.2.3 Výpočet zaťaženia podvozku pri prednej centráži 50
8.2.4 Výpočet zaťaženia podvozku pri zadnej centráži 50

8.2.5 Zhodnotenie výsledkov výpočtu ... 51
8.3 Dodatočné zaťaženie predného podvozku ... 52
8.3.1 Výpočet zaťaženia podvozku pri prednej centráži ... 53
8.3.2 Výpočet zaťaženia podvozku pri zadnej centráži ... 53
8.3.3 Zhodnotenie výsledkov výpočtu ... 54
8.4 Určenie maximálneho zaťaženia podvozku ... 54
8.5 Porovnanie vypočítaného zaťaženia s nameraným spektrom zaťaženia ... 55
9 Zostava predného podvozku ... 57
10 Záver ... 59
11 Zoznam použitých zdrojov ... 60
12 Prílohy ... 62

1 Úvod

Pristávacie zariadenie, inak nazývané podvozok je dôležitou súčasťou letúna. Umožňuje totiž letúnu operovať so zeme a pohyb letúna na zemi. V dôsledku toho sú na podvozky kladené vysoké nároky na funkčnosť a spoľahlivosť. Podvozok musí splňovať požiadavky na pevnosť a tuhosť konštrukcie a zároveň si zachovať minimálnu hmotnosť. Podvozky letúnov sa koncepčne delia na tri základné kategórie a to na podvozky s ostruhovým kolesom, podvozky s predným podvozkom a tandemové podvozky. Podvozky sa ďalej môžu deliť na pevné a zaťahovacie. Zaťahovacie podvozky majú výhodu v znížení aerodynamického odporu počas letu v dôsledku uloženia podvozku v trupe alebo krídlach letúna.

Pri pristátí letúna dochádza k zaťaženiu konštrukcie letúna. Pri kontakte so zemou pôsobia na podvozok reakčné sily od zeme, ktoré je potrebné minimalizovať. Za účelom zníženia pristávacích síl pôsobiacich na podvozok boli navrhnuté systémy, ktoré umožňujú absorbovať časť energie nárazu a premeniť ju na inú formu energie. Za týmto účelom došlo k používaniu podvozkových tlmičov. Podvozkové tlmiče sú podľa typu akým absorbujú energiu rozdelené do viacerých skupín.

Podvozky malých športových letúnov sa vyznačujú jednoduchou konštrukciou a minimálnymi požiadavkami na údržbu. Základom konštrukcie podvozku môžu byť tri základné typy. Pevná podvozková noha, ktorá môže byť uložená kyvne alebo uchytená kolmo na osu nohy. Najpoužívanejším typom predného podvozku v kategórii malých športových letúnov je teleskopická podvozková noha. Tá sa vyznačuje jednoduchou konštrukciou a umožňuje požitie širokej škály tlmičov. Posledným používaným typom je pákový podvozok, ktorého výhodou je nízka stavebná výška a nižšie opotrebenie tlmiča.

2 Pristávacie zariadenie

Pristávacie zariadenie umožňuje státie a pohyb letúna po dráhe ale hlavne umožňuje rozjazd a dojazd letúna po pristávacej dráhe . Za letu kladie podvozok dodatočný odpor a pridáva hmotnosť k celkovej hmotnosti letúna, čím negatívne prispieva k letovým výkonom a letovým vlastnostiam. Z toho dôvodu sú na pristávacie zariadenia inak pomenované ako podvozky letúnov kladené vysoké požiadavky.

2.1 Požiadavky kladené na podvozky

Medzi základné požiadavky kladené na pristávacie zariadenia môžeme zaradiť:

- Podvozok musí zabezpečiť, aby sa žiadna iná časť konštrukcie nedostala do kontaktu zo zemou
- Dostatočná pevnosť, tuhosť a životnosť konštrukcie pri zachovaní minimálnej hmotnosti
- Minimálny aerodynamický odpor a z toho vyplývajúce minimálne rozmery podvozku
- Schopnosť absorbovať energiu pri pristátí a dostatočne ju utlmiť
- Dostatočne spomaliť letún brzdením pri dojazde
- Zaistenie stability a riadenia letúna pri pohybe na zemi
- Zaistenie dostatočnej priechodnosti letúna na pristávacích dráhach, kde bude používané
- Vysoká úroveň spoľahlivosti
- Jednoduchá údržba

2.2 Koncepčné usporiadanie podvozku

Podvozky letúnov môžeme z koncepčného hľadiska rozdeliť na tri základné typy.

2.2.1 Pristávacie zariadenie s ostruhovým kolesom

Usporiadanie podvozku s ostruhovým kolesom sa vyznačuje umiestnením hlavného podvozku pred ťažisko letúna. V zadnej časti sa nachádza ostruhové koleso, ktoré môže byť voľne pohyblivé, alebo riaditeľné. Toto usporiadanie sa v súčasnosti používa u malých športových a poľnohospodárskych letúnov z dôvodu nižšej hmotnosti menšieho aerodynamického odporu a zároveň je jednoduchšej konštrukcie, čím vykazuje vysokú mieru spoľahlivosti. Medzi hlavné nevýhody patrí zhoršený výhľad pilota pri štarte a pohybe letúna po pristávacej dráhe a možnosť preklopenia smerom dopredu pri nadmernom brzdení.

Obr. 1.1 Letún s ostruhovým kolesom DC 3 [1]

2.2.2 Podvozok predného typu

Usporiadanie tohto typu podvozku je charakteristické tým, že hlavný podvozok je umiestnený za ťažiskom letúna a v prednej časti je doplnený o prednú podvozkovú nohu. Predná podvozková noha býva vo väčšine prípadov riadená. Podvozok musí mať dostatočnú výšku od zeme aby nedošlo napríklad ku kontaktu vrtule so zemou. Tá je definovaná v leteckých predpisoch. Z konštrukčného hľadiska je podvozok zložitejší, ako predchádzajúci typ, má vyššiu hmotnosť a vyžaduje častejšiu kontrolu a údržbu. Medzi hlavné výhody patrí dobrý výhľad pilota pri vzlete, pristátí a pri pohybe po zemi. U tohto typu taktiež nehrozí preklopenie smerom dopredu pri nadmernom brzdení. V súčasnosti sa jedná o najpoužívanejší typ podvozku u všetkých kategórií letúnov.

Obr. 1.2 Letún s predným podvozkom L410 [2]

2.2.3 Tandemové usporiadanie podvozku

Usporiadanie tandemového podvozku sa vyznačuje umiestnením predného a hlavného podvozku za sebou. Bolo použité napríklad u bombardérov B-45 a B-52, kvôli ich hornoplošnému usporiadaniu krídel a umiestneniu pumovnice v trupe letúna. Toto riešenie bolo použité aj u stíhacieho letúna Hawker Harrier a špionážneho letúna U2. U tohto usporiadania je potrebné zabezpečiť stranovú stabilitu pri pohybe na zemi. Tá bola zabezpečená použitím prídavného pomocného podvozku umiestneného na konci krídel. S týmto usporiadaním sa môžeme taktiež stretnúť u niektorých vetroňov, ktoré majú koleso hlavného podvozku uchytené do trupu.

Obr. 1.3 Letún s tandemovým usporiadaním podvozku B52 [3]

2.2.4 Zaťahovací a pevný podvozok

Podvozky môžeme ďalej rozdeliť na pevný podvozok a zaťahovací podvozok, ktorý je možné počas letu zasunúť do vytvorených priestorov v draku alebo krídle letúna. Pevný podvozok sa najčastejšie používa u malých pomaly letiacich letúnov, pretože negatívny dopad prídavného aerodynamického odporu nie je taký veľký. Na zníženie aerodynamického odporu sa vo väčšine prípadov používajú aerodynamické kryty kolies a podvozkových nôh. S narastajúcou rýchlosťou letu sa aerodynamický odpor zvyšuje natoľko, že je nutné použitie zaťahovacieho podvozku aj na úkor zvýšenia celkovej hmotnosti letúna. To umožňuje let vyššou rýchlosťou a zároveň značne zvyšuje jeho dolet.

Obr. 1.4 WT-9 Dynamic zo zaťahovacím podvozkom (vľavo) a pevným podvozkom (vpravo) [4], [5]

2.3 Podvozkové tlmiče

Jednou zo základných požiadavkou na podvozky je, aby boli schopné pohltiť a dostatočne utlmiť nárazy pri pristáti alebo pohybe lietadla po pristávacej dráhe. K tomuto účelu boli vyvinuté rôzne formy tlmičov. Základné druhy tlmičov rozdeľujeme na:

- Pružinové tlmiče
- Gumové tlmiče
- Hydropneumatické tlmiče
- Hydraulické tlmiče

2.3.1 Pružinové tlmiče

Pružinové tlmiče znižujú energiu nárazu ohybom pružiny na bezpečnú úroveň a prenesú ju do konštrukcie lietadla, kde sa utlmí. Následne sa vráti pružina do pôvodnej polohy. V súčasnosti je tento systém rozšírený u hlavného podvozku malých športových lietadiel. Pružiny hlavného podvozku sú pevne uchytené k draku lietadla. Sú vyrobené z oceli, titánových zliatin alebo v súčasnosti čoraz rozšírenejších kompozitných materiálov. Tie sa vyznačujú nižšou hmotnosťou, vysokou pevnosťou a odolnosťou voči korózii. Medzi výhody pružinových tlmičov patrí nízka hmotnosť, jednoduchá konštrukcia a vysoká spoľahlivosť a jednoduchá kontrola. Pri poškodení alebo poruche je nutné vymeniť celý pružinový tlmič.

2.3.2 Gumové tlmiče

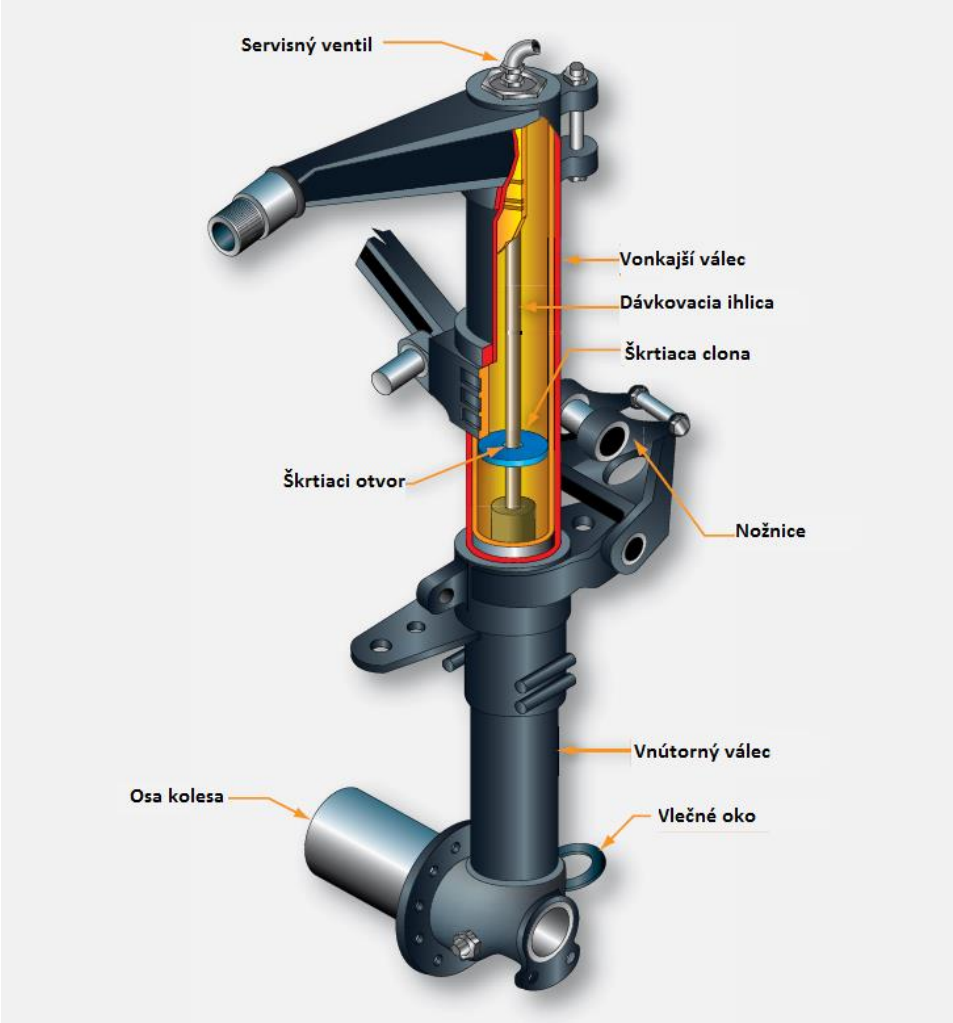
V kategórii gumových tlmičov rozlišujeme dva základné typy a to na gumené povrazce a gumové elementy. Gumové povrazce tlmia energiu nárazu tak, že dôjde k natiahnutiu a následnému vráteniu povrazca do pôvodnej polohy. Gumové elementy sú vhodne usporiadané a medzi jednotlivé elementy sú vložené podložky. Tie zabezpečia správnu pružnú deformáciu jednotlivých elementov. Pomocou voľby počtu a veľkosti jednotlivých elementov je možné rôzne upravovať parametre tlmiča tak, aby sme dosiahli požadované vlastnosti. Dôležité pri použití týchto tlmičov je dôkladná a pravidelná kontrola a údržba. Pri poškodení tlmiča je možná výmena jednotlivých poškodených elementov, čo znižuje náklady na údržbu.

2.3.3 Hydraulické tlmiče

V hydraulickom tlmiči pruženie a tlmenie zabezpečuje pracovná kvapalina. Kvapalina v pracovnom valci je v tomto prípade braná ako stlačiteľná a zabezpečuje pruženie podvozku. Zároveň kvapalina preteká malými otvormi pri pohybe piestu, čím dochádza k tlmeniu kinetickej energie, ktorá sa premieňa na teplo. Hydraulické tlmiče sa používajú u veľkých dopravných a nákladných lietadiel, kde sa prejaví stlačenie kvapaliny v dôsledku ich vysokej hmotnosti.

2.3.4 Hydropneumatické tlmiče

V hydropneumatickom tlmiči je energia nárazu pohltená stlačením plynu pri súčasnom prietoku kvapaliny otvormi (katarakty). Pri prietoku kvapaliny otvormi sa časť energie premieňa na teplo a dochádza k tlmeniu. Ako kvapalina sa väčšinou používa lieho-glycerinová zmes alebo špeciálne oleje. Plyn v tlmiči slúži na pruženie tlmiča. Pri stlačení plynu dochádza k akumulácii energie, ktorá sa uvoľní po vyčerpaní zaťaženia a vráti piest do pôvodnej polohy. Ako plyn sa najčastejšie používa stlačený dusík alebo vzduch. Tlmič sa skladá z dvoch základných častí. Pohyblivou časťou je piest, ktorý sa pohybuje vo vnútri valca. Nepohyblivá časť je tvorená valcom, ktorý je uchytený k draku lietadla. Na nasledujúcom obrázku je znázornená konštrukcia podvozkovej nohy s hydropneumatickým tlmičom. Nožnice umiestnené na tlmiči slúžia na uchytenie piestu k valcu tlmiča a zaistenie piestu voči samovoľnému otáčaniu.



Obr. 1.5 Konštrukcia podvozkovej nohy s hydropneumatickým tlmičom [6]

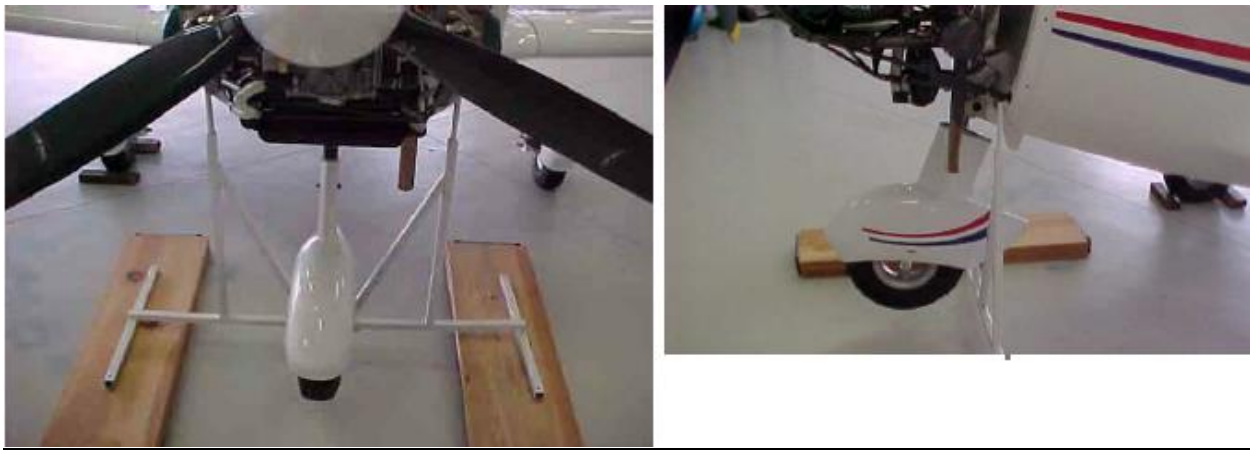
3 Prehľad používaných typov podvozkov ultraľahkých lietadiel

Letún PS-28 Cruiser je certifikovaný v kategórii ľahkých športových lietadiel podľa predpisu CS-LSA a LSA. V tejto kapitole boli pre porovnanie volené letúny certifikované v rovnakej kategórii a bola popísaná konštrukcia predného podvozku. Samotná konštrukcia predného podvozku letúna PS-28 Cruiser je uvedená v kapitole 3.

3.1.1 TL-2000 Sting

Tl-2000 Sting je celokompozitové ultraľahké lietadlo pre dvojčlennú posádku. Je vyrábané v dvoch verziách. Verzia pod označením Tl-2000 Sting RG je vybavená zaťahovacím podvozkom predného typu s riaditeľným predným kolesom.

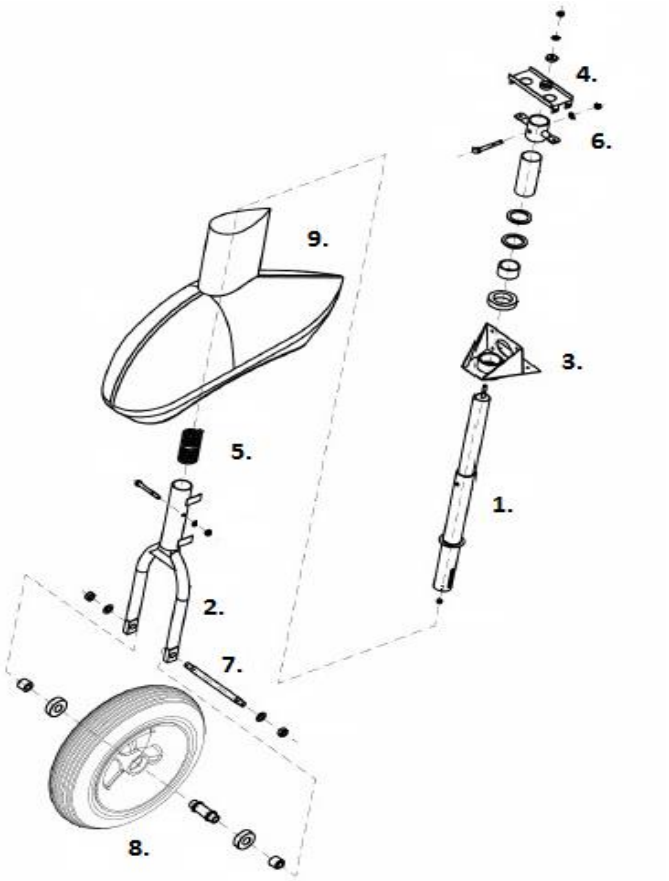
Druhá verzia pod označením Tl-2000 Sting S4 je vybavená pevným podvozkom vybaveným aerodynamickými krytmi kolies z riaditeľnou prednou podvozkovou nohou s pružinovým tlmičom.



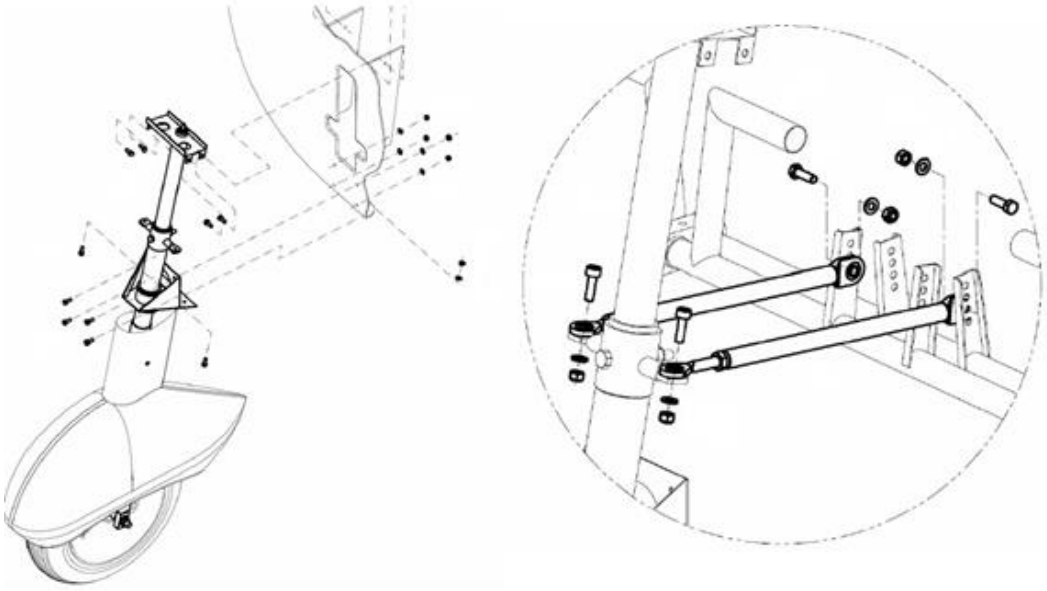
Obr. 2.1 Predný podvozok lietadla TL 2000 Sting S4 [7]

Predný podvozok lietadla je tvorený podvozkovou nohou, ktorá je otočne uložená a pomocou spodného a horného úchytu prednej nohy uchytená k prepážke trupu. Spodný úchyt je upevnený na vonkajšiu stenu prepážky. Horný úchyt je upevnený do vytvorenej zástavby podvozkovej nohy. Spodnú časť predného podvozku tvorí vidlica v ktorej je uložené koleso predného podvozku. Podvozková noha a vidlica sú spolu spojené pomocou šrubového spoja. Pruženie podvozkovej nohy zabezpečuje pružina, ktorá je umiestnená vo vnútri vidlice. Riadenie predného podvozku je realizované pomocou riadiacich pedálov, ktoré sú spojené pomocou tiahel s pákou na prednej nohe. Predný podvozok je vybavený aerodynamickým krytom na zníženie odporu. Na obr. 2.2 je zobrazená zostava prednej podvozkovej nohy letúna s popisom jednotlivých častí. Uchytenie podvozku k trupovej prepážke je zobrazené na obr. 2.3 s detailom systému riadenia.

Číslo pozície	Názov
1.	Podvozková noha
2.	Vidlica
3.	Spodný úchyt
4.	Horný úchyt
5.	Pružina
6.	Páka prednej nohy
7.	Osa predného kolesa
8.	Predné koleso
9.	Aerodynamický kryt



Obr. 2.2 Zostava predného podvozku lietadla TL 2000 Sting S4 [8]



Obr. 2.3 Uchytenie predného podvozku lietadla TL 2000 Sting S4 (vľavo), detail riadenia podvozku (vpravo) [8]

3.2 TL- 3000 Sirius

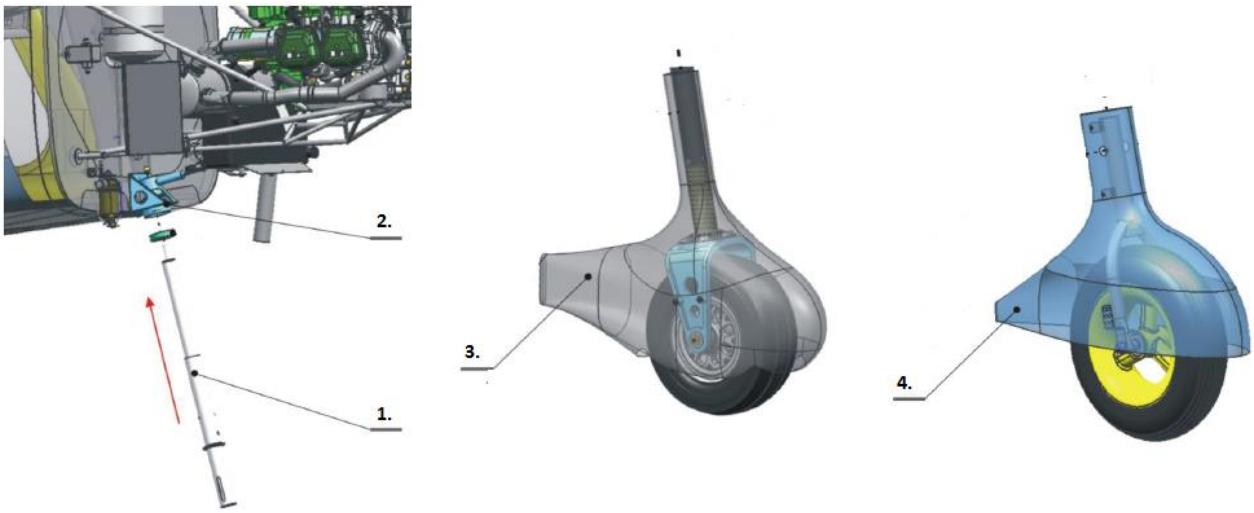
Jedná sa o celokompozitový hornoplošník určený pre dvojčlennú posádku kategórie LSA a CS-LSA. Lietadlo je vybavené podvozkom z prednou riaditeľnou podvozkovou nohou s pružinovým tlmičom. Podvozok je vybavený aerodynamickými krytmi. Obrázok predného podvozku je na obr. 2.4.

Obr. 2.4 Predný podvozok lietadla TL 3000 Sirius [9]

Predný podvozok lietadla TL 3000 Sirius je vyrábaný v dvoch verziách. Prvá verzia podvozku je tvorená predným a hlavným podvozkovým kolesom o rozmeroch 400 x 100 mm. Predný podvozok je neriadený a vybavený systémom tlmenia shimmy. Lietadlo je na zemi riadené pomocou striedavého brzdenia hlavného podvozku pomocou riadiacich pedálov. Druhá verzia podvozku je tvorená predným podvozkom s kolesom o priemere 11 x 4 a hlavným podvozkom s kolesami o rozmeroch 15 x 6. Predný podvozok je riadený pomocou oceľových lán, ktoré sú spojené s nožným systémom riadenia. Obe verzie predného podvozku sú vybavené aerodynamickými krytmi. Na obr. 2.5 sú zobrazené varianty predného podvozku letúna.

Obr. 2.5 Neriadený predný podvozok (vľavo) a riadený predný podvozok (vpravo) [10]

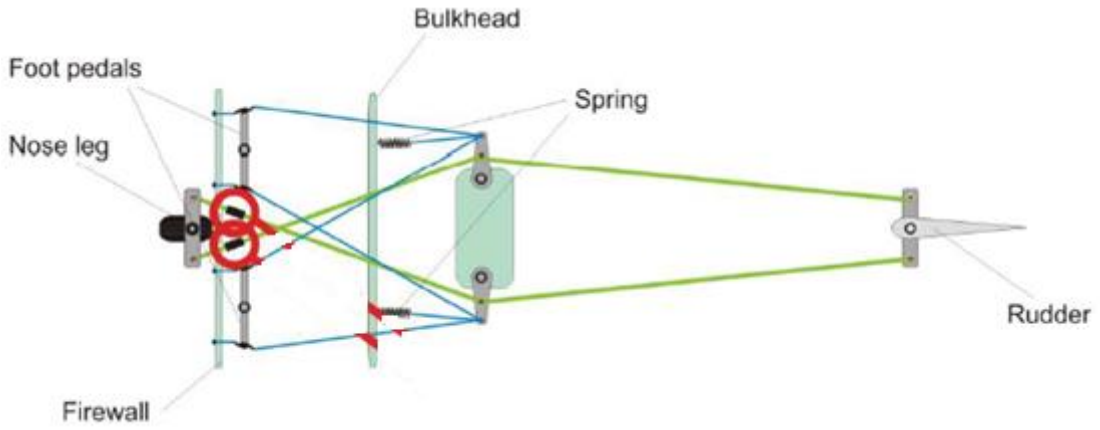
Podvozok sa skladá z prednej podvozkovej nohy, ktorá je uchytená k protipožiarnej prepážke trupu pomocou spodného a horného úchytu. Spodný úchyt je pripevnený pomocou šrubov z prednej strany prepážky. Noha ďalej pokračuje otvorom v prepážke a je uchytená z druhej strany prepážky pomocou horného úchytu do zástavby podvozku. Neriadená verzia podvozku je vybavená systémom tlmenia shimmy, ktorý je tvorený pružinami a tlmičom. Riadená verzia podvozku je vybavená pákou, ku ktorej sú pripojené laná riadenia. Konštrukcia podvozkovej nohy s popisom základných častí je na obr. 2.6.



1- Trubka podvzokovej nohy 2- spodný úchyt podvozku 3- spodná časť podvozku riadeného podvozku (4- neriadeného podvozku)

Obr. 2.6 Podvozok letúna TL-3000 [10]

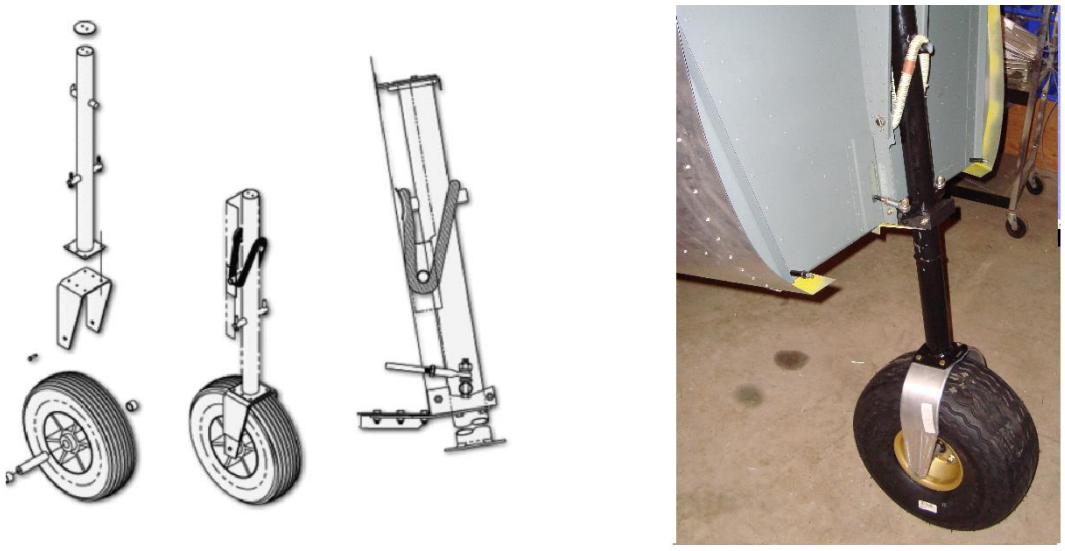
Spodnú časť podvozku tvorí vidlica, ktorá je pripojená k podvozkovej nohe. U riadenej verzie je vidlica pripevnená k trubke, ktorá je následne spojená s podvozkovou nohou. Vo vnútri vidlice (trubky) je uložená pružina. Systém riadenia predného podvozku je zobrazený na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Systém riadenia predného podvozku [10]

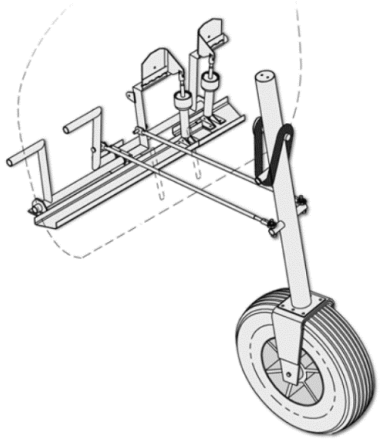
3.2.1 Zenith Zodiac CH 650

Jedná sa o celokovový dolnoplošník kategórie LSA. Letún je vybavený podvozkom predného typu. Hlavný podvozok je tvorený pružinou z hliníkovej zliatiny a je vybavený hydraulickými brzdami. Predný podvozok je tvorený trubkou na ktorej konci je pomocou šrúbov pripojená vidlica, v ktorej je uložené koleso podvozku. Na pruženie podvozku slúži robustný gumový povrazec, ktorý je uchytený na podvozkovej nohe za kolík a pripevnený do uloženia podvozkovej nohy. Podvozková noha je uchytená na prednú prepážku lietadla do vytvorenej zástavby. Zobrazenie konštrukcie podvozku je uvedené na obr. 2.8.



Obr. 2.8 Schéma konštrukcie predného podvozku (vľavo), predný podvozok (vpravo) [11] [12]

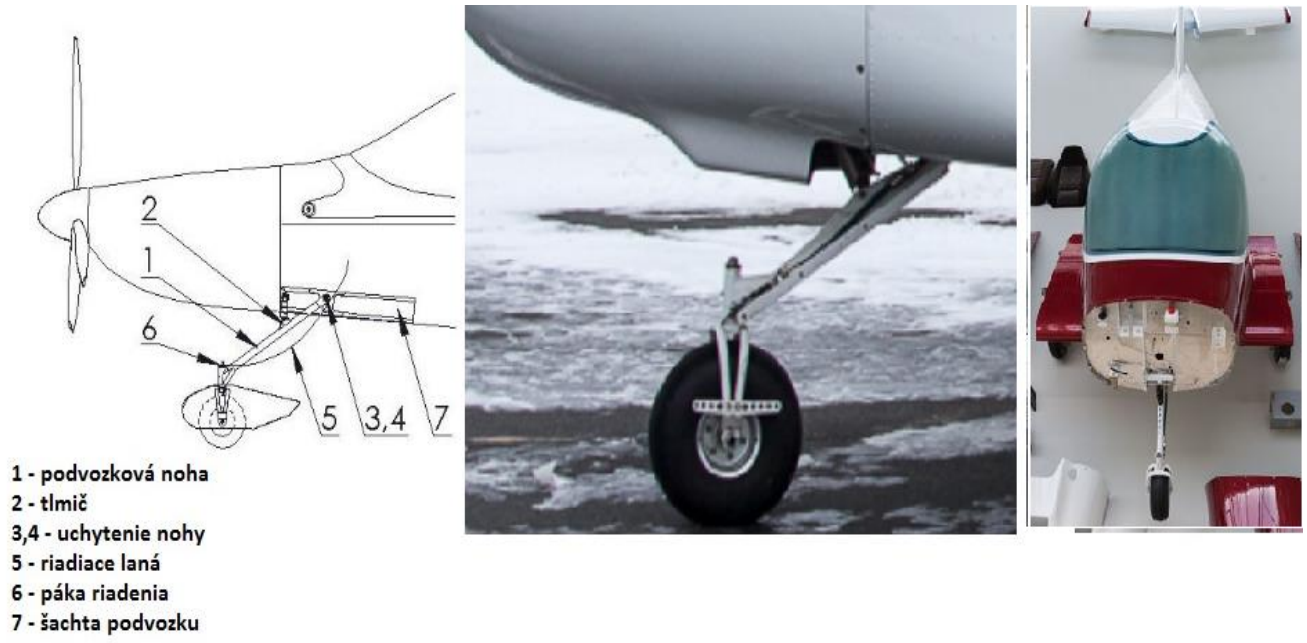
Riadenie podvozku (obr. 2.9) je realizované prostredníctvom tiahel, ktoré vedú od riadiacich pedálov cez prepážku trupu a sú upevnené na podvozkovej nohe. K riadeniu lietadla na zemi prispieva diferenciálny systém bŕzd hlavného podvozku, ktorý tak zlepšuje manévrovacie schopnosti lietadla na zemi.



Obr. 2.9 Systém riadenia predného podvozku [12]

3.2.2 Bristell NG-5 LSA

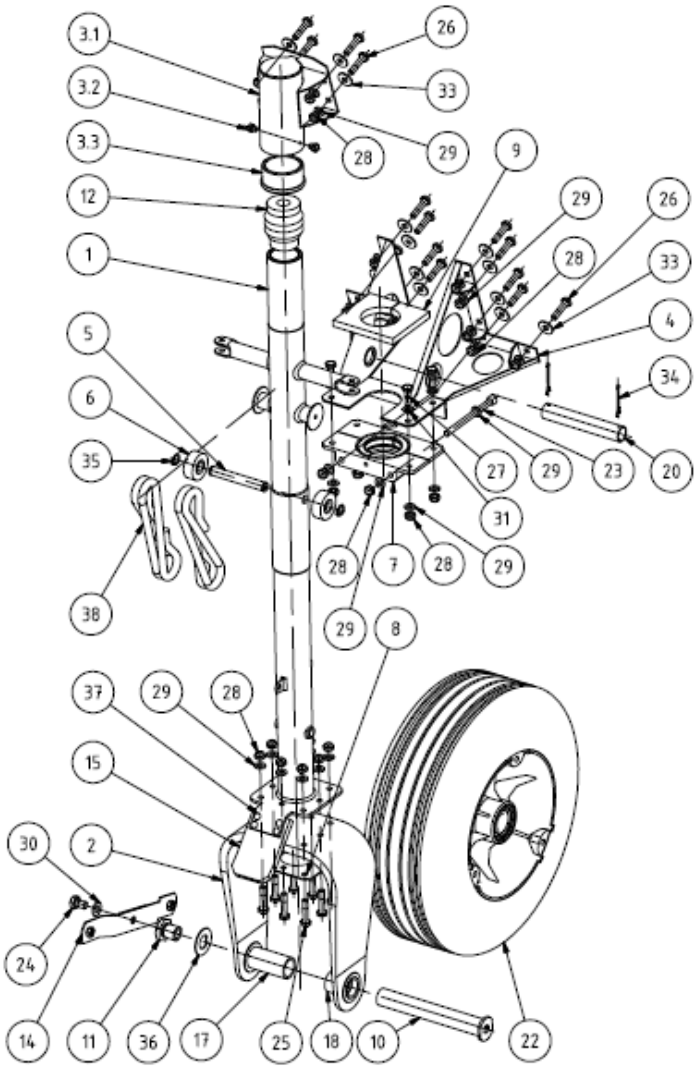
Jedná sa o celokovový dolnoplošník kategórie LSA. Verzia letúna pod označením Classic je vybavená pevným podvozkom predného typu s riadeným predným podvozkom. Hlavný podvozok letúna tvoria kompozitné podvozkové nohy. Kolesá hlavného podvozku sú brzdené hydraulickými brzdami. Predný podvozok je tvorený oceľovou podvozkovou nohou na ktorú je v spodnej časti pomocou otočného závesu uchytená oceľová vidlica, v ktorej je uchytené koleso predného podvozku. Podvozková noha je pomocou konzol uchytená v šachte predného podvozku, ktorý je umiestnený medzi prednou prepážkou trupu a hlavným nosníkom krídla. Podvozková noha je vybavená tlmičom, ktorý tvoria gumené valčeky, medzi ktorými sú umiestnené oceľové podložky. Riadenie podvozkovej nohy je zabezpečené pomocou oceľových laniek, ktoré sú na jednom konci pevne uchytené k páke umiestnenej na otočnom závese prednej podvozkovej nohy a na druhom konci sú uchytené k riadiacim pedálom. Predný podvozok je vybavený aerodynamickými krytmi na zníženie odporu. Konštrukcia predného podvozku letúna je zobrazená na obr. 2.10.



Obr. 2.10 Schéma a detail predného podvozku letounu Bristell NG-5 LSA [13] [14] [15]

3.2.3 WT9 Dynamic

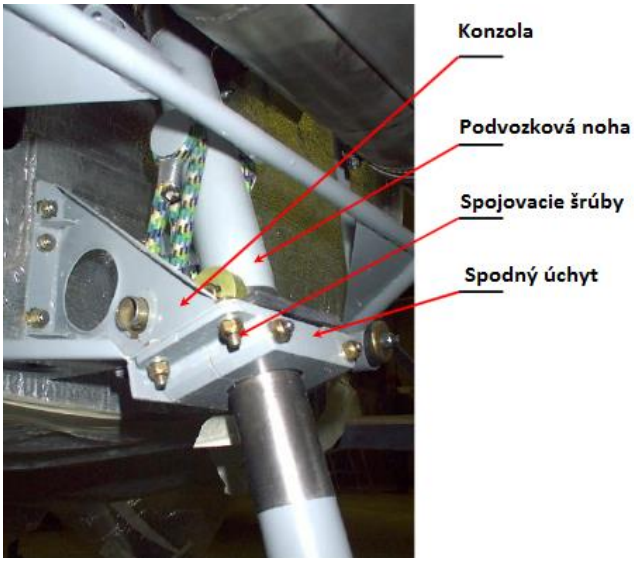
Letún WT9 Dynamic je celokompozitový dolnoplošík kategórie LSA s podvozkom predného typu. Letún sa vyrába v dvoch verziách. Základná verzia pod označením Club je vybavená pevným podvozkom a verzia Speed je vybavená zaťahovacím podvozkom. Zostava predného podvozku je znázornená na obrázku 2.11.



Poz.	Popis
1	PREDNÁ PODVOZKOVÁ NOHA PP
2	UHLÍKOVÁ VIDLICA
3.1	ÚCHYT-OBR.
3.2	SKRUTKA M5x5 - ÚPRAVA
3.3	PÚZDRO HORNÉHO ÚCHYTU
4	SPODNÝ ÚCHYT
5	OSKA VOD.KOLIEČOK
6	VODIACE KOLIEČKO
7	ZVIERKA
8	PODLOŽKA
9	GUMA POD VODIACE KOLIEČKO
10	OSKA PREDNEJ PODVOZKOVEJ NOHY
11	MATICA NA OSKU
12	PENOVÝ TLMIČ PPN
14	ÚCHYT KRYTU KOLESA PPN
15	BRZDIČ PREDNÉHO KOLESA
17	ROZPERNÁ RÚRKA PPN VEĽKÁ
18	ROZPERNÁ RÚRKA PPN MALÁ
20	RÚRKA PPN
22	KOLESO PREDNÉHO PODVOZKU
23	SKRUTKA S VALCOVOU HLAVOU
24	SKRUTKA
25	SKRUTKA
26	SKRUTKA
27	SKRUTKA
28	MATICA SAMOPOISTNÁ
29	PODLOŽKA
30	PODLOŽKA
31	PODLOŽKA DISTANČNÁ
32	PODLOŽKA VEĽKOPLOŠNÁ
33	PODLOŽKA VEĽKOPLOŠNÁ
34	ZÁVLAČKA
35	POISTNÝ KRÚŽOK
36	PODLOŽKA POISTNÁ
37	NIT TRHACÍ (DURAL)
38	GUMOVÝ POVRAZ

Obr. 2.11 Zostava predného podvozku [16]

Predná podvozková noha u základnej verzie Club je zložená z oceľovej trubky. Na spodnú stranu trubky je pomocou šrúbov upevnená compozitová vidlica s podvozkovým kolesom. Predný podvozok je upevnený k prednej prepážke trupu pomocou horného a spodného úchytu. Tlmenie nárazu pri pristáti zabezpečuje dvojica gumových povrazov uchytených na spodný úchyt a z oboch strán podvozkovej nohy. V hornom úchyte je umiestnený penový tlmič, ktorý zabezpečuje dodatočné tlmenie. Riadenie predného podvozku je riešené prostredníctvom tiahel, ktoré vedú od riadiacich pedálov a sú pripojené k úchytom na podvozkovej nohe. Podvozok je vybavený aerodynamickými krytmi. Detail uchytenia predného podvozku je na obr. 2.12.



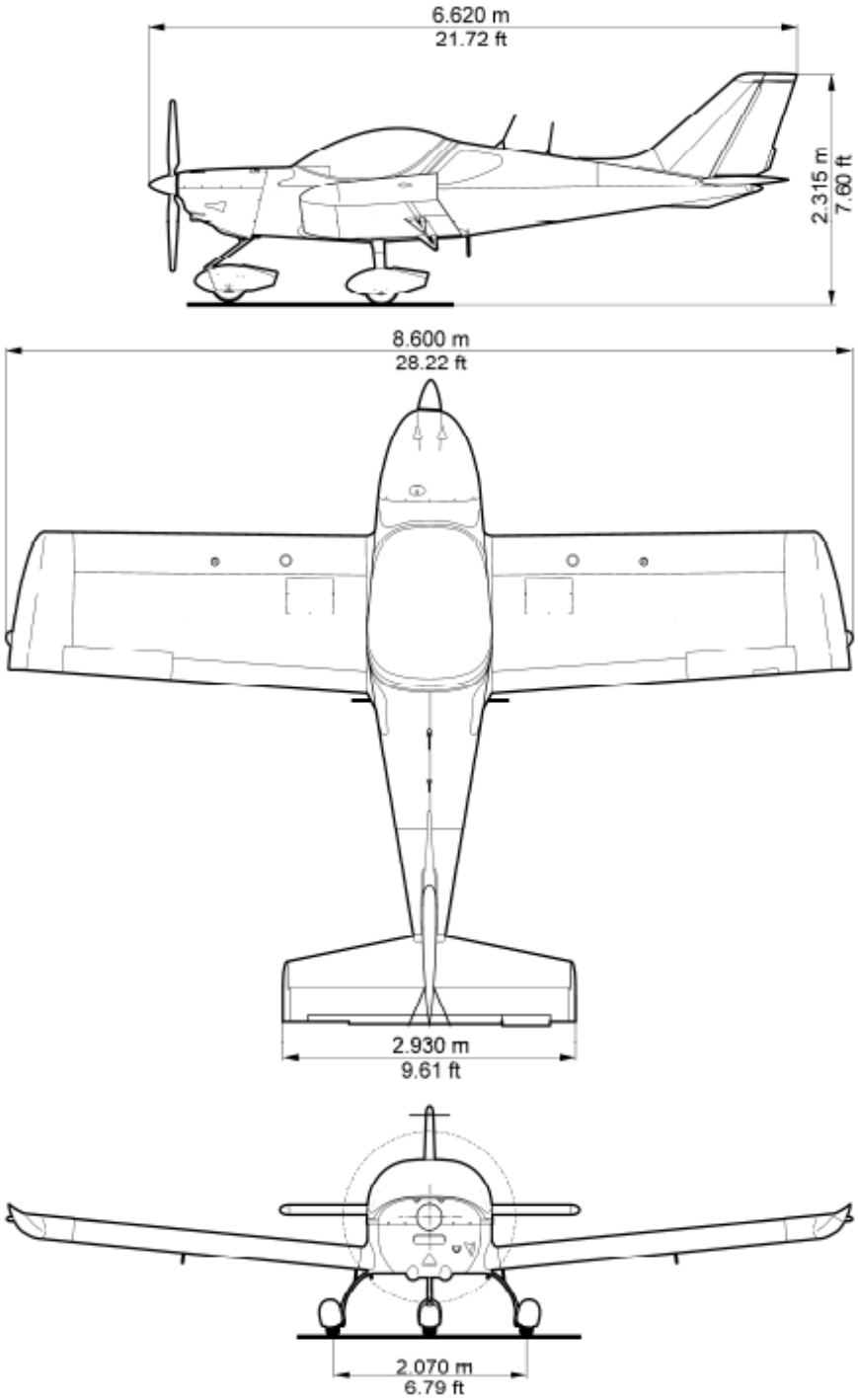
Obr. 2.12 Detail uchytenia pevného podvozku [17]

Zaťahovací podvozok verzie Speed je tvorený podvozkovými nohami pákového usporiadania. Zaťahovanie zabezpečujú hydraulické válce. Predný podvozok je tvorený dutou podvozkovou nohou, ku ktorej je pripojený záves predného kolesa. Tlmenie zabezpečuje polyuretanový válec, ktorý je na jednom konci uchytený vo vnútri podvozkovej nohy a na druhom k závesu predného kolesa. Predný podvozok je uchytený na uloženie motora. Zaťahovanie podvozku smerom dozadu je realizované pomocou hydraulického valca, ktorý je pripojený na zalamovaciu vzperu. Funkciu núdzového vysunutia podvozku zabezpečuje pneumaticky poháňaný válec, ktorý vysunie zalamovaciu vzperu do uzamknutej polohy. Riadenie podvozkovej nohy je riešené pomocou oceľových káblov uchytených k riadiacim pedálom. Zaťahovací podvozok je zobrazený na obr. 2.13.

Obr. 2.13 Detail zaťahovacieho predného podvozku [17] [18]

4 Popis letúna PS-28 Cruiser

PS-28 Cruiser je celokovový dvojmiestny dolnoplošník s usporiadaním sedadiel vedľa seba s pevným podvozkom predného typu. Trup je navrhnutý ako pološkrupinová konštrukcia z kompozitovým rámom kokpitu a prekrytu kabiny. Hlavný podvozok je tvorený dvoma pružinami, ktoré sú uchytené na spodný rám trupu. Riadenie lietadla na zemi je zabezpečené diferenciálnym systémom hydraulických bŕzd umiestnených na hlavnom podvozku riadených pomocou riadiacich pedálov.



Obr. 3.1 Trojpohľadový nákres letúna [20]

5 Základná technická špecifikácia letúna

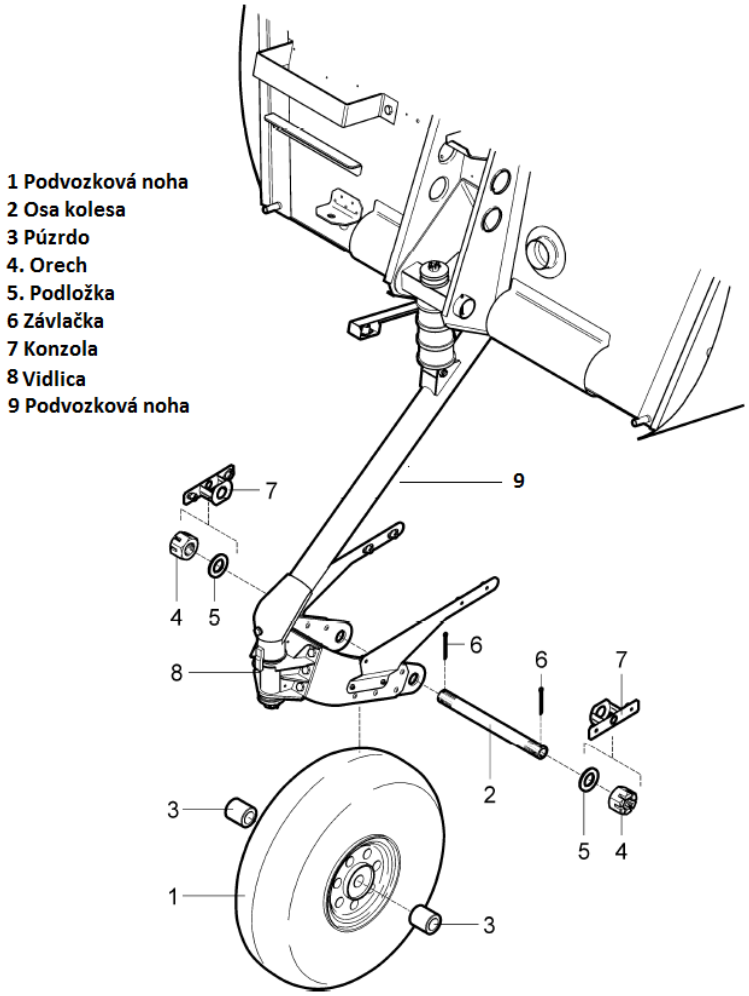
Rozmery lietadla	
Dĺžka	6,62 m
Výška	2,315 m
Rozpätie krídel	8,6 m
Plocha krídel	12,3 m^2
Hmotnosti	
Maximálna vzletová hmotnosť	600 kg
Prázdna hmotnosť	381 kg
Rýchlosti IAS	
Maximálna horizontálna rýchlosť	220 km/h
Maximálna neprekročiteľná rýchlosť	255 km/h
Pádová rýchlosť s klapkami	55 km/h
Pohonná jednotka	
Motor	Rotax 912 ULS2
Výkon	73,5 kW
Objem nádrží	114 l
Dolet (rezerva 30 min.)	948 km

Tab. 3.1 Technická špecifikácia letúna PS-28 Cruiser a obrázok letúna

5.1 Predný podvozok

Predný podvozok je vlečného typu. Podvozok je zobrazený na obr. 3.2. Základom podvozku je oceľová podvozková noha. V prednej časti nohy je pripevnená hliníková vidlica, v ktorej je uložené koleso podvozku. Podvozková noha je k prepážke trupu uchytená pomocou konzoly do vystuženej časti prednej prepážky. Na podvozkovej nohe sa nachádza uchytenie tlmiča. Ten je zložený z trubky na ktorej sú navlečené gumené valčeky oddelené podložkami. K podvozkovej nohe je uchytený pomocou šrubu a matice. Druhý koniec prechádza trubkou a je zaistený na konci pomocou orecha. Trubka prechádza otvorom v konzole na trupovej prepážke a je zaistená závlačkami proti vypadnutiu. Schéma predného podvozku letúna je zobrazená na obr. 3.3.

Obr. 3.2 Predný podvozok letúna PS 28 Cruiser [19]



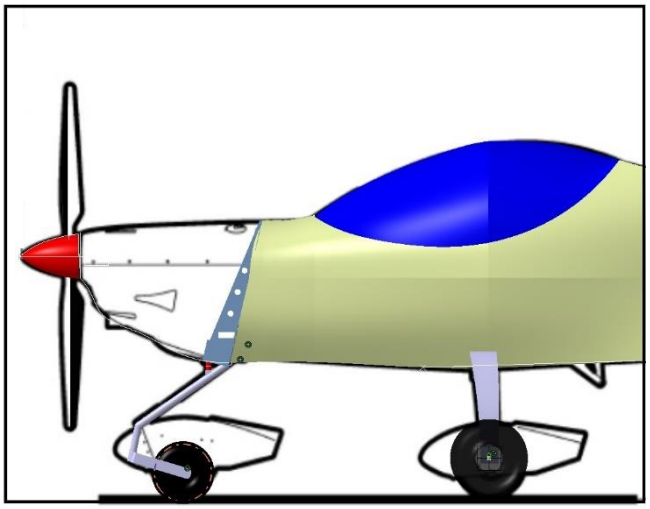
Obr. 3.3 Schéma predného podvozku [20]

6 Návrh variant predného podvozku

Cieľom návrhu novej varianty predného podvozku bolo vytvoriť riadenú podvozkovú nohu s hydropneumatickým tlmičom. Pri tvorbe návrhov sme použili model vytvorený na základe bokorysu z trojpohľadového nákresu letúna.

6.1 Model pôvodného variantu podvozku

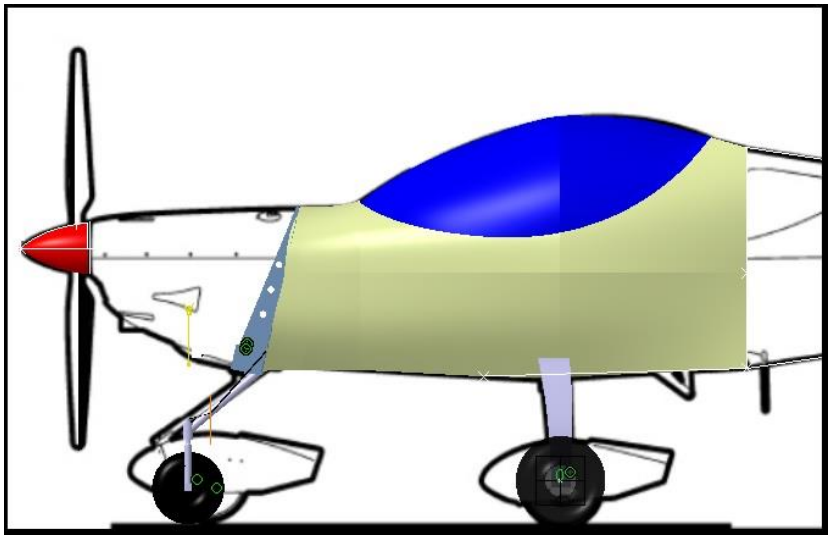
Konštrukcia a popis základných častí pôvodného variantu predného podvozku letúna je popísaný v predchádzajúcej kapitole. Tento typ predného podvozku sa vyznačuje jednoduchou konštrukciou a údržbou. Podvozok bol pôvodne určený pre pristátie na pevných VPD, na čo bol navrhnutý aj tlmič. Pruženie tlmiča je preto tuhé a pri pristáti na nespevnenom povrchu nie je tlmenie úplne dostatočné, čo sa prejavuje na zvýšenom namáhaní konštrukcie. Ako bolo uvedené podvozok je neriadený a preto bolo zvolené riadenie pomocou diferenciálneho brzdenia kolies hlavného podvozku. To vedie k zvýšenému opotrebovaniu bŕzd a k častejšej výmene brzdových doštičiek. Výhodou tohto systému riadenia je, že v prípade keď nastane shimmy pri vzlete alebo pristátí nedôjde k prenosu síl, ktoré vzniknú, do riadiacej sústavy. To môže viesť až k porušeniu celej konštrukcie letúna. Koleso predného podvozku je umiestnené vďaka tomuto usporiadaniu dostatočne ďaleko od ťažiska letúna čo zabezpečuje dobrú statickú stabilitu letúna na zemi (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Geometria pôvodného podvozku

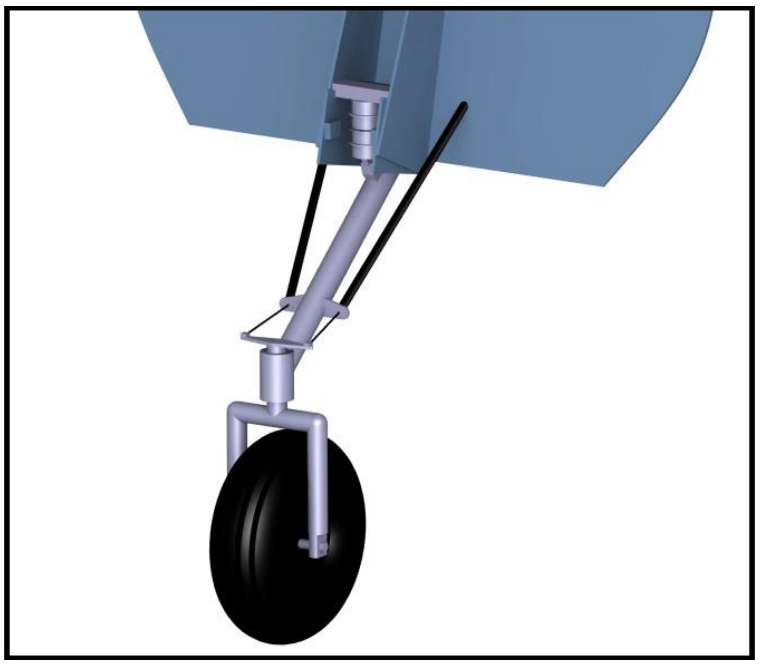
6.2 Návrh č 1: Kyvný riadený podvozok

Konštrukcia tohto návrhu vychádza z pôvodného riešenia podvozku. Podvozkovú nohu sme upravili tak, aby bolo možné zabezpečiť riadenie letúna na zemi. Poloha predného kolesa sa posunula smerom dopredu aby bola zabezpečená dostatočná dĺžka a sklon podvozkovej nohy. Geometria podvozku je zobrazená na obr. 4.2. Pri zachovaní pôvodnej vzdialenosti by nebolo možné umiestniť tlmič tak aby bol uchytený v pôvodnej zástavbe predného podvozku.



Obr. 4.2 Geometria kyvného podvozku

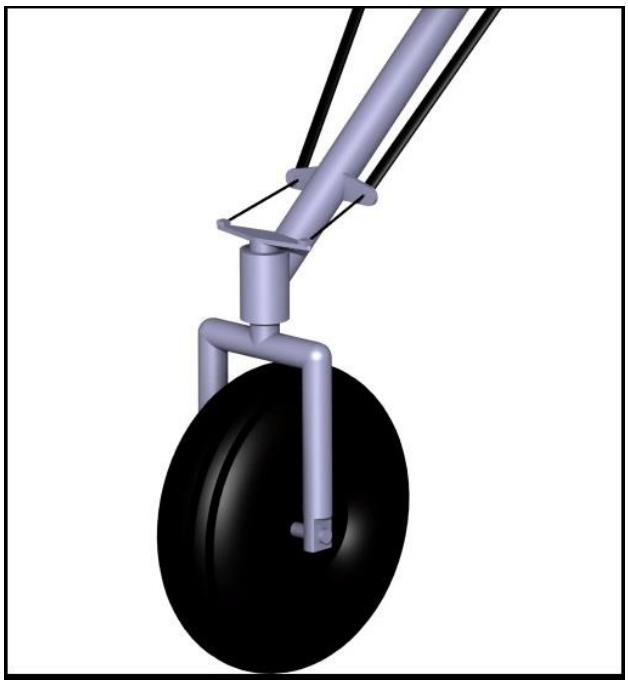
Predný podvozok sa skladá z podvozkovej nohy na konci ktorej sú navarené trubky, ktoré tvoria záves vidlice a podvozku. V prednej časti je trubka navarená v smere kolmom sa osu kolesa aby bolo možné zabezpečiť riadenie. Koleso podvozku je uchytené vo vidlici, ktorá je upevnená do závesu vidlice. Podvozková noha je uchytená pomocou čapu a horného závesu podvozku do pôvodnej zástavby. Tlmič je rovnako ako u pôvodnej varianty zložený z gumových valčekov s rovnakým typom uchytenia k podvozku ako u pôvodnej varianty. Na zlepšenie tlmiacich vlastností podvozku boli použité väčšie gumové valčeky. Model variantu je na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Model riadeného podvozku s kyvnou nohou

Riadenie podvozku je vedené pomocou bowdenov od riadiacich pedálov k páke umiestnenej na konci otočnej vidlice. Do trupovej prepážky bolo potrebné vytvoriť otvory, ktorými prechádzajú bowdeny.

Na podvozkovej nohe sú bowdeny uchytené pomocou vytvorených úchytov, z ktorých vedie lanko priamo na páku riadenia na podvozkovej nohe. Detail systému riadenia je na obr. 4.4.



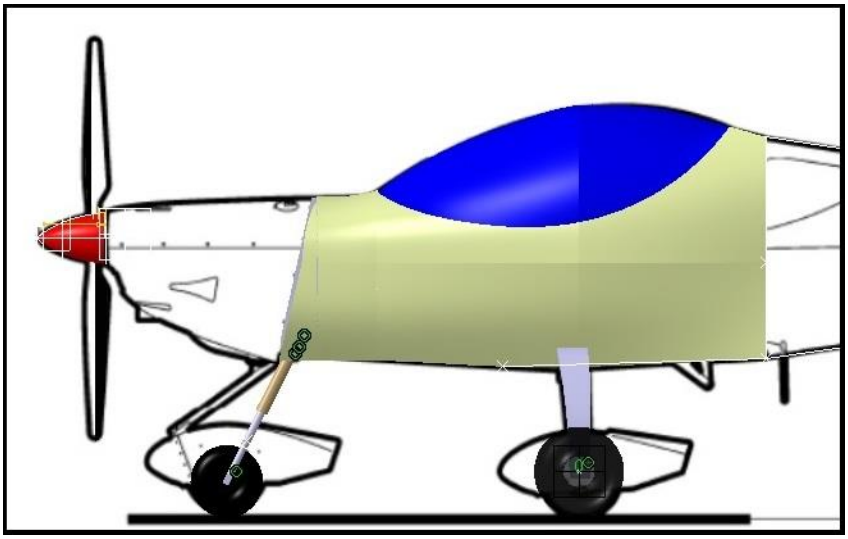
Obr. 4.4 Detail systému riadenia kyvného podvozku

Hlavná výhoda oproti systému riadenia pomocou tiahel je nižšia hmotnosť. Nutné je zabezpečiť, aby bolo lanko medzi úchytom bowdenu a pákou stále napnuté. Nevýhoda spočíva v tom, že keď dôjde k roztrhnutiu jedného lanka, podvozok sa stane neriaditeľným.

Toto riešenie podvozku nie je z hľadiska zástavby hydropneumatického vhodné. Oproti klasickým gumovým tlmičom má hydropneumatický tlmič väčšiu stavebnú výšku a zdvih, čo by viedlo k problémom uchytenia tlmiča k zástavbe na prepážku trupu.

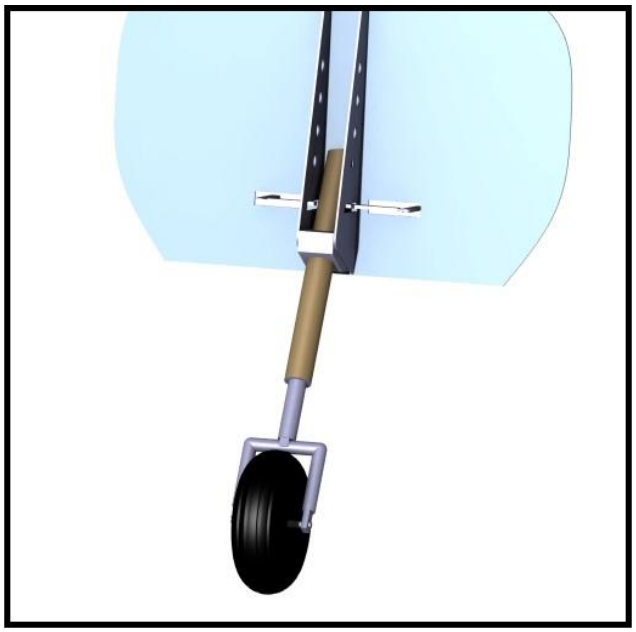
6.3 Návrh č. 2: Teleskopický riadený podvozok s uchytením na prepážku

V tomto návrhu bol vytvorený teleskopický podvozok s hydropneumatickým tlmičom. Polohu kolesa sme volili rovnakú ako je na pôvodnej variante. Geometria podvozku je zobrazená na obr. 4.5.



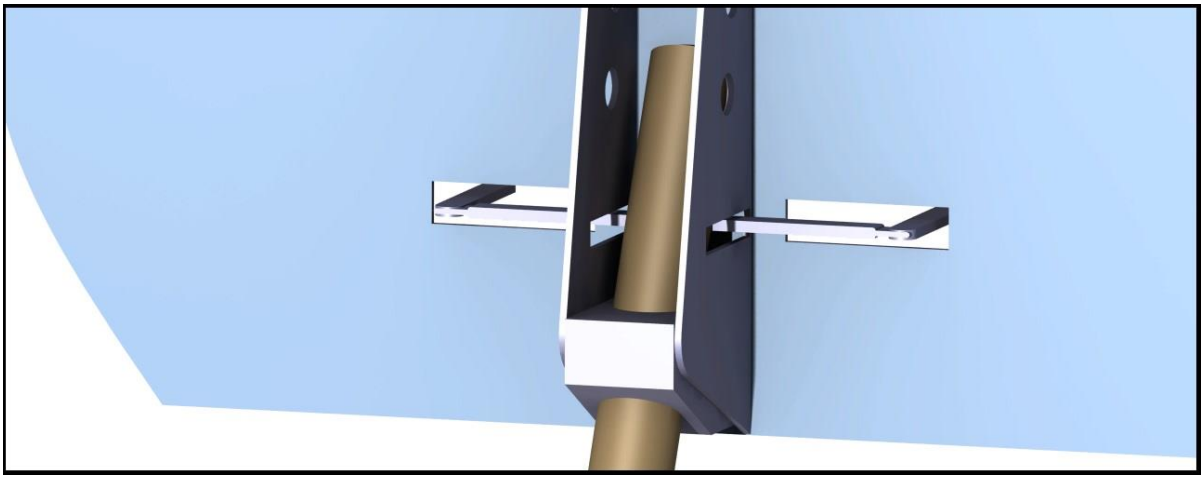
Obr. 4.5 Geometria teleskopického podvozku s uchytením na prepážku

Podvozková noha je zložená z dvoch základných častí, valca a piestu. K spodnej časti piestu je uchytená vidlica, v ktorej je uložené koleso. Piest je umiestnený vo valci, ktorý tvorí telo hydropneumatického tlmiča. Použitie hydropneumatického tlmiča bolo zvolené z ohľadom na zlepšenie charakteristík tlmenia. Model tohto variantu je na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Model teleskopického podvozku s uchytením na prepážku

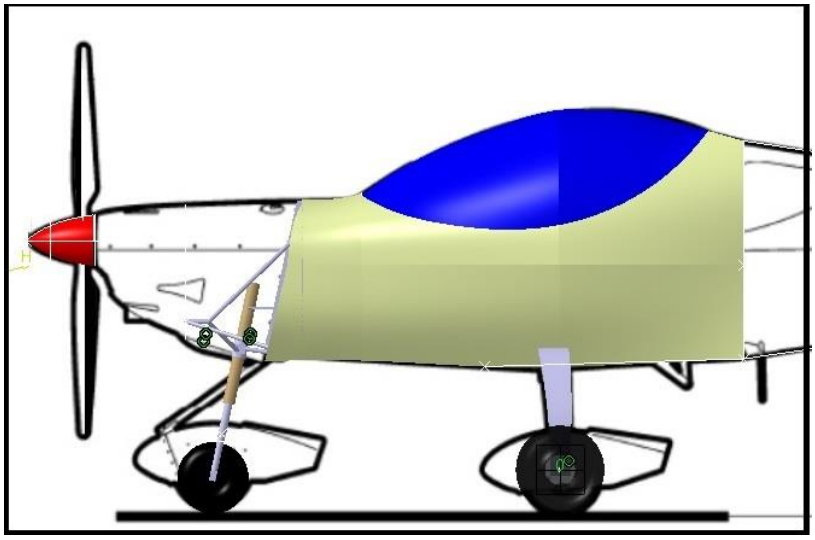
Podvozková noha je uchytená pomocou úchytu k pôvodnej zástavbe na trupovej prepážke. Riadenie podvozku je riešené použitím tiahel, ktoré sú napojené na riadiace pedále. Tiahla prestupujú skrz vytvorené otvory v prepážke a sú napojené na páku riadenia, ktoré je privarené k valcu. Detail uloženia a riadenia je na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Detail uloženia podvozku

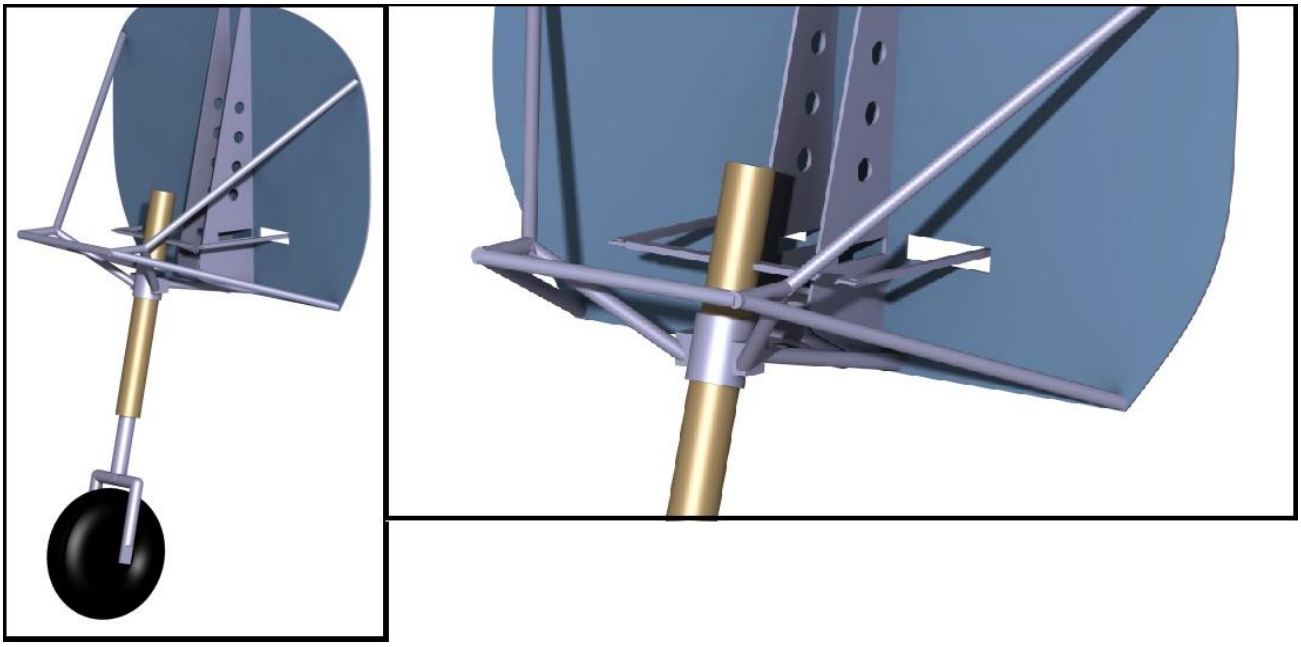
6.4 Návrh č.3: Teleskopický riadený podvozok s uchytením na uloženie motora

Podobne ako v predchádzajúcom návrhu bol vytvorený teleskopický riadený podvozok s hydropnematickým tlmičom. Tento variant sa líši od predchádzajúceho uchytením podvozkovej nohy z dôvodu zmenšenia odklonu podvozkovej nohy od vertikálnej osy. Toto riešenie bolo volené z cieľom zmenšenia namáhania podvozku ohybom a zlepšenia účinnosti tlmenia. Poloha kolesa bola volená rovnaká ako u pôvodného variantu (obr. 4.8).



Obr. 4.8 Geometria uchytenia podvozku na uloženie motora

Hlavnou zmenou oproti predchádzajúcemu návrhu je uchytenie podvozkovej nohy na uloženie motora. K pôvodnému uloženiu motora bola navrhnutá prídavná prutová konštrukcia privarená k pôvodnej a uchytená na prepážku trupu. Podvozková noha je upevnená v úchyte, ktorý je privarený k prídavnej konštrukcii. Model podvozku je zobrazený na obr. 4.9 (vľavo).

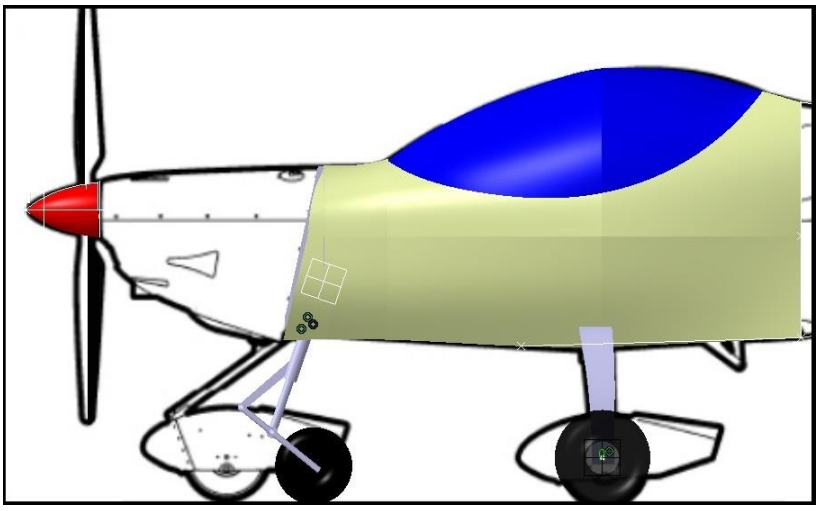


Obr. 4.9 Model podvozku (vľavo), detail uchytenia (vpravo)

Riadenie podvozku je zabezpečené pomocou tiahel, ktoré sú vedené od riadiacich pedálov a napojené k páke na podvozkovej nohe. Umiestnenie uchytenia podvozku na uloženie motora má svoje nevýhody. Najväčšou je zaťaženie uloženia motora od podvozku. Uloženie by bolo potrebné navrhnúť tak, aby okrem síl prenášaných od zaťaženia motora bolo schopné preniesť sily od prídavného zaťaženia podvozku. V prípade, že nastane shimmy, môže byť toto zaťaženie natoľko veľké, že môže viesť k poruche uloženia motora, čo môže mať ďalšie negatívne následky. Riadenie pomocou tiahel nie je úplne ideálne z dôvodu ich väčšej dĺžky oproti predošlému návrhu, čo vedie k požiadavku na ich zvýšenú pevnosť, čo vedie k zväčšeniu rozmerov a zvýšeniu celkovej hmotnosti.

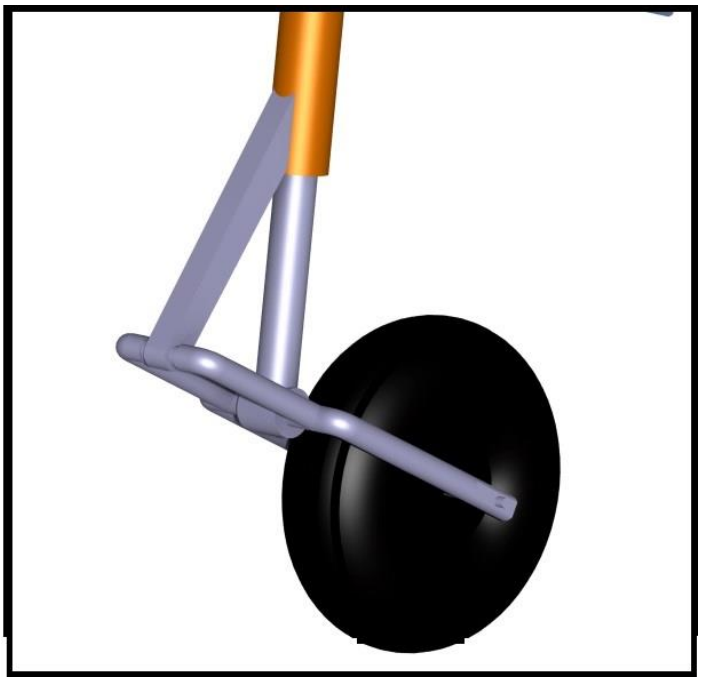
6.5 Návrh č. 4: Pákový riadený podvozok s uchytením na prepážku

V tomto návrhu bol vytvorený pákový podvozok s hydropneumatickým tlmičom.



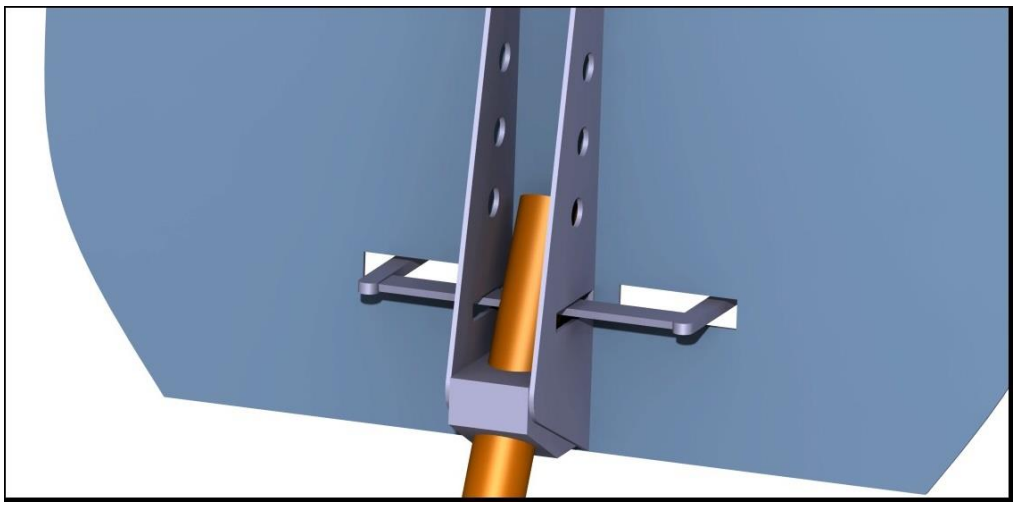
Obr. 4.10 Geometria uchytenia podvozku na prepážku

Pri uchytení na prepážku bolo potrebné posunúť polohu predného kolesa smerom dozadu k hlavnému podvozku letúna. Podvozok je zložený z troch základných častí. Prvú tvorí valec hydropneumatického tlmiča. K spodnej časti valca je privarené rameno, ktoré slúži na uchytenie kyvnej vidlice. Na kyvnej vidlici boli vytvorené dva body na uchytenie vidlice. Prvý bod slúži na uchytenie vidlice do ramena valca pomocou čapu. Druhý bod slúži na uchytenie k piestu pomocou čapu. Pri pristáti sa vidlica otáča okolo uchytenia v ramene valca a zároveň pomocou druhého bodu uchytenia prenáša zaťaženie na piest tlmiča, ktorý sa stláča. Na konci vidlice je uchytené koleso. Model podvozku je na obr. 4.11.



Obr. 4.11 Model podvozkovej nohy pákového podvozku

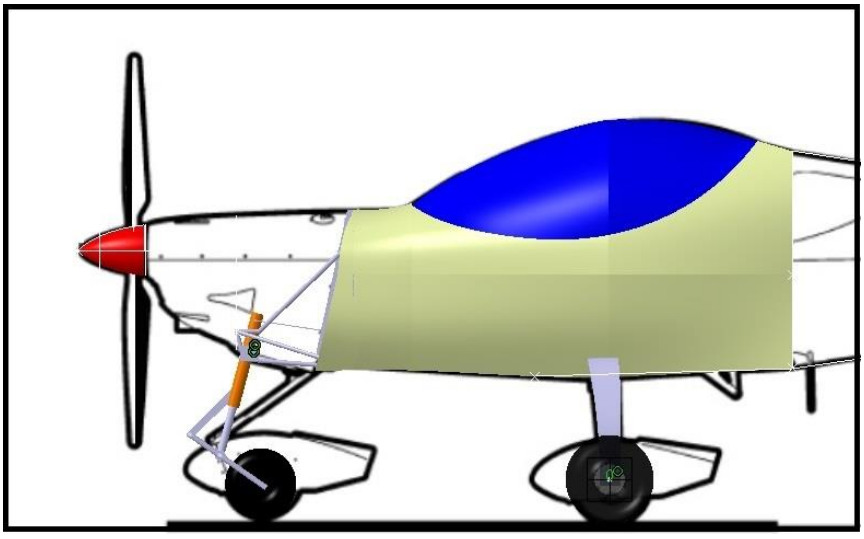
Podvozková noha je uchytená pomocou úchytu v zástavbe predného podvozku rovnako ako v návrhu č.3. K valcu na hornej strane je privarená páka riadenia, na ktoré sú napojené tiahla vedúce od riadiacich pedálov skrz vytvorené otvory v trupovej prepážke. Detail uchytenia je na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Detail uchytenia pákového podvozku na prepážku

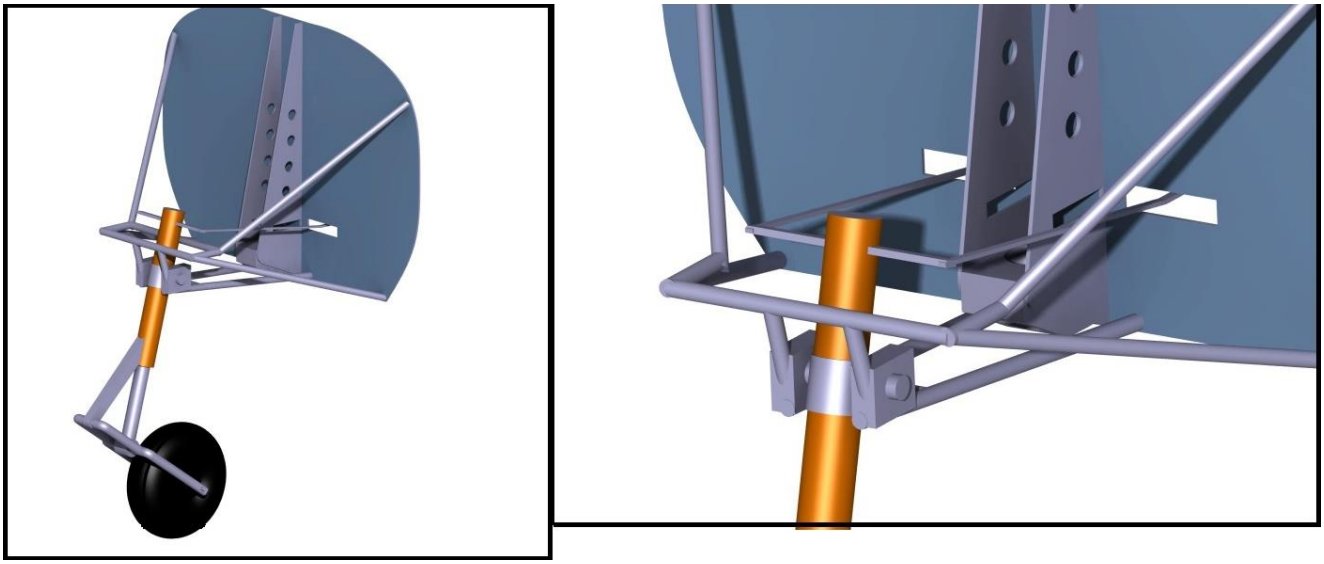
6.6 Návrh č. 5: Pákový riadený podvozok s uchytením na uloženie motora

Ako posledný návrh podvozku bolo zvolené uchytenie pákového podvozku s hydropneumatickým tlmičom na uloženie motora. Týmto riešením bolo dosiahnuté zachovanie pôvodnej polohy kolesa (obr. 4.13).



Obr. 4.13 Geometria uchytenia podvozku na uloženie motora

Konštrukcia podvozkovej nohy je totožná z predchádzajúcim návrhom. Hlavnou zmenou je uloženie podvozku. K uloženiu motora bola vytvorená prídavná konštrukcia do ktorej je uchytená podvozková noha. Model podvozkovej nohy a detail uloženia je na obr. 4.14.



Obr. 4.14 Model podvozku (vľavo), detail uchytenia (vpravo)

Hlavnou výhodou návrhu okrem zachovania polohy predného kolesa voči hlavnému podvozku je, že tlmič u pákového podvozku je zaťažovaný iba osovou silou. Ostatné sily a ohybové momenty pôsobiace na podvozkovú nohu sú prenášane pomocou ramena, v ktorom je uchytená vidlica. Prídavná konštrukcia uchytenia na uloženie motora je oproti teleskopickému podvozku väčšia, čo znamená zvýšenie hmotnosti konštrukcie. Riadenie je riešené pomocou tiahel, ktoré na rozdiel od predchádzajúceho návrhu majú väčšiu dĺžku. Ideálne by bolo v tomto prípade použiť riadenie pomocou lán alebo bowdenov. V prípade keď nastanú shimmy sa v tomto návrhu prejavia rovnaké nedostatky ako u teleskopického podvozku v návrhu č. 3.

6.7 Zhodnotenie návrhov a výber výslednej varianty

Z predchádzajúceho popisu jednotlivých konštrukčných návrhov predného podvozku boli popísané výhody a nevýhody jednotlivých riešení. Predný podvozok s riadenou kyvnou nohou by bol ideálnou voľbou s uvážením najmenšieho počtu konštrukčných zmien oproti ostatným návrhom. U tohto návrhu by bolo potrebné vytvoriť otvory v prednej prepážke trupu, aby bol zabezpečený prechod bowdenov od riadiacich pedálov k páke na podvozkovej nohe. Podvozkovú nohu by bolo potrebné skrátiť v prípade požiadavku na zachovanie rovnakej polohy predného kolesa voči ťažisku letúna. V prednej časti podvozkovej nohy by bolo potrebné vytvoriť otočný záves predného kolesa, v ktorom by bola uložená vidlica pripojená k riadiacemu mechanizmu. Uloženie podvozkovej nohy by v tomto prípade nevyžadovalo žiadne zmeny. Tým by sme dosiahli minimálny počet úprav na zmenu predného podvozku. Toto riešenie má však svoje nevýhody v použití hydropneumatického tlmiča namiesto tlmiča zloženého z gumových valčekov. Hydropneumatický tlmič by v tomto prípade musel byť umiestnený namiesto gumového tlmiča. U kyvnej nohy je gumový tlmič umiestnený blízko osi okolo ktorej sa noha pohybuje. Preto v tomto prípade je požadované použiť tlmenie s malým zdvihom. V hydropneumatickom tlmiči je veľkosť absorbovanej energie úmerná stlačeniu tlmiča. K tlmeniu energie dochádza prietokom kvapaliny cez prietočné otvory . V prípade keď zmenšíme zdvih tlmiča, dôjde k úbytku pohltenej energie . Z toho vyplýva, že by nedošlo k zlepšeniu tlmenia. U návrhov teleskopického a pákového podvozku je tlmič umiestnený v tele podvozkovej nohy, čím je možné dosiahnuť ďaleko väčšieho zdvihu a tým aj k zvýšeniu účinnosti tlmenia. Teleskopický

podvozok má oproti pákovému výhodu v tom, že je konštrukčne jednoduchší čím dosiahneme nižšiu hmotnosť. Pri uchytení teleskopického podvozku na trupovú prepážku je potrebné vytvoriť nové uchytenie nohy. Pri použití páky riadenia na podvozkovej nohe je potrebné vytvoriť otvory v pôvodnej zástavbe . Praktickejším riešením by bolo rozdeliť uchytenie podvozku na prepážku na dve časti medzi ktorými by bol umožnený pohyb páky. Aby bolo možné podvozok riadiť, je potrebné u tohto návrhu použiť nožnice na rozdiel od pákového podvozku. Pákový podvozok má výhodu oproti teleskopickému v tom, že vďaka pákovému mechanizmu je tlmič namáhaný iba osovou silou, takže dochádza k menšiemu opotrebeniu tesnenia. Ostatné zaťaženie sa prenáša cez rameno páky. Ďalšou výhodu je, že použitie nevyžaduje nožnice. Podvozky uchytené na uloženie motora nie sú vhodné, pretože požadujú vytvoriť prídavný úchyt na uloženie motora.

Po zhodnotení všetkých návrhov podvozku bol zvolený riadený teleskopický podvozok. Na podvozku bude potrebné vykonať nasledujúce úpravy. Záves podvozku bude rozdelený na dve časti a to na spodný a horný záves, aby nebolo potrebné vytvárať otvory v uchytení podvozkovej nohy pre páku riadenia. Ďalšou zmenou bude použitie nožníc na spojenie valca tlmiča s piestom. Detailnému návrhu zvoleného podvozku sa bude venovať kapitola 5.

7 Detailný návrh podvozku

7.1 Výpočet zaťaženia podvozku letúna pri státí na zemi

Pri výpočte síl pôsobiacich na podvozok letúna pri statickom zaťažení tzn. státí na zemi vychádzame so silovej rovnováhy. Tiažová sila pôsobiaca na letún je rovná súčtu síl pôsobiacich na predný a hlavný podvozok (silové reakcie na podvozok od zeme).

G - tiažová sila pôsobiaca na letún [N]

$\mathbf{F_{ps}}$ - silová reakcia predného podvozku od tiažovej sily [N]

$\mathbf{F_{hs}}$ - silová reakcia hlavného podvozku od tiažovej sily [N]

Silovú rovnováhu sme zapísali v nesledujúcom tvare.

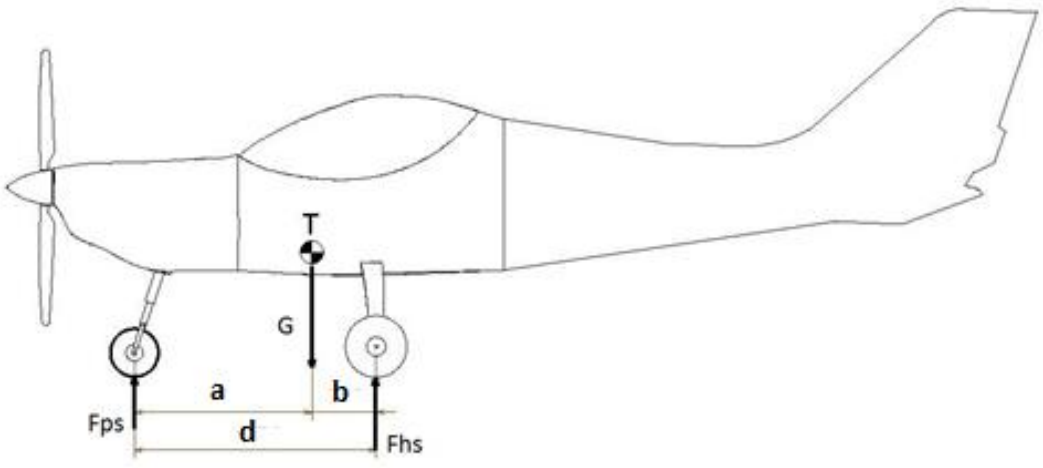
$$G = F_{ps} + F_{hs} \tag{5.1}$$

Výpočet jednotlivých zložiek síl prevedieme pre prednú a zadnú centráž letúnu. Pre výpočet vychádzame zo zadanej polohy podvozku voči ťažisku letúna zobrazenej na obr. 5.1.

a - vzdialenosť predného podvozku od ťažiska letúna [m]

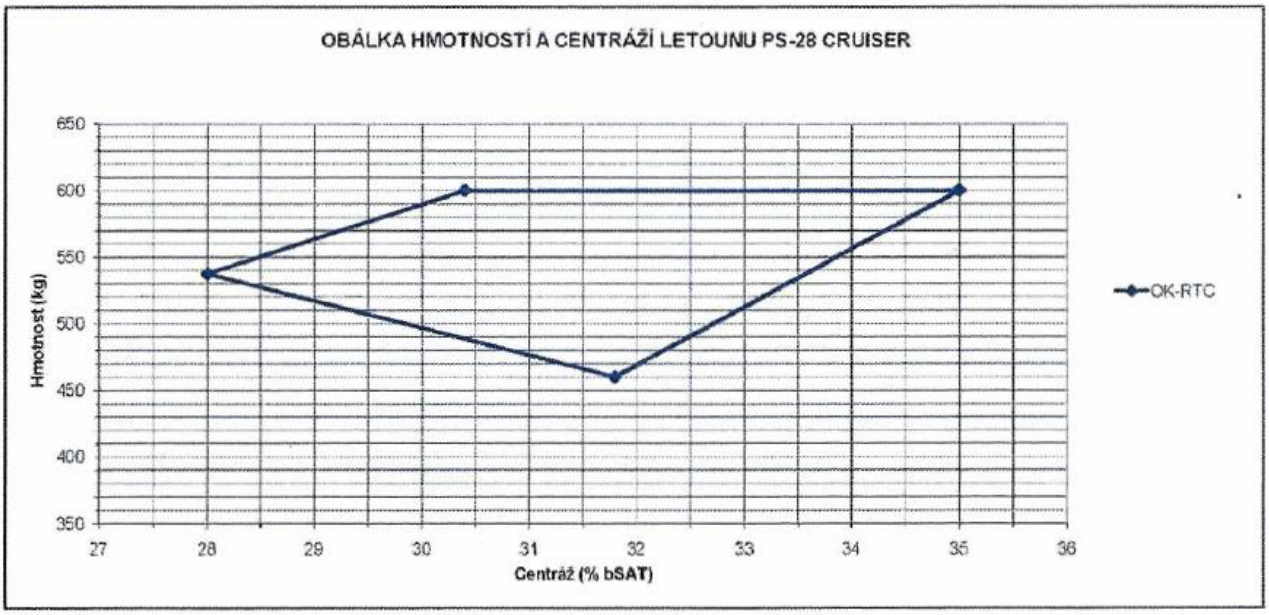
b - vzdialenosť hlavného podvozku od ťažiska letúna [m]

d - rázvor podvozku [m]



Obr. 5.1 Statické reakcie do podvozku

Hodnoty jednotlivých vzdialeností boli určené na základe podkladov od firmy Czech Sport Aircraft pre prednú a zadnú centráž, ktorú sme určili z obálky hmotnosti a centráží letúna. Obálka vznikla bola vytvorená na základe letových meraní letúna OK-RTC pre 4 konfigurácie letúna. Pre výpočty boli použité predná a zadná centráž pri maximálnej vzletovej hmotnosti.



Obr. 5.2 Obálka centráží a hmotností

Z obálky bola určená predná centráž letúna, ktorá je pri maximálnej vzletovej hmotnosti m_{TOW} 30,4% z b_{sat} a zadnú centráž, ktorá je 35% z b_{sat}. Zo znalosti centráží a geometrie podvozku boli určené jednotlivé vzdialenosti a, b a d pre zadané centráže. Hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Vzdialenosť	Predná centráž		Zadná centráž	
a	1221	mm	1286	mm
b	250	mm	185	mm
d	1471	mm	1471	mm

Tab. 5.1 Poloha podvozku voči ťažisku

7.1.1 Výpočet silových reakcií podvozku pre prednú centráž

Predný podvozok

$$F_{ps1} = \frac{b_1}{d} \cdot G = \frac{b_1}{d} \cdot m_{TOW} \cdot g = \frac{250}{1471} \cdot 600 \cdot 9{,}81 = 1002\ N \qquad (5.2)$$

Hlavný podvozok

$$F_{hs1} = \frac{a_1}{d} \cdot G = \frac{a_1}{d} \cdot m_{TOW} \cdot g = \frac{1221}{1471} \cdot 600 \cdot 9{,}81 = 4884\ N \tag{5.3}$$

7.1.2 Výpočet silových reakcií pre zadnú centráž

Predný podvozok

$$F_{ps2} = \frac{b_2}{d} \cdot G = \frac{b_2}{d} \cdot m_{TOW} \cdot g = \frac{185}{1471} \cdot 600 \cdot 9{,}81 = 740\ N \tag{5.4}$$

Hlavný podvozok

$$F_{hs2} = \frac{a_2}{d} \cdot G = \frac{a_2}{d} \cdot m_{TOW} \cdot g = \frac{1286}{1471} \cdot 600 \cdot 9{,}81 = 5146\ N \tag{5.5}$$

7.1.3 Výsledky statického zaťaženia podvozku

Výsledné hodnoty zaťaženia pre jednotlivé centráže sú uvedené v tabuľke 5.2.

Podvozok	Predná centráž		Zadná centráž	
Predný	1002	N	740	N
Hlavný	4884	N	5146	N

Tab. 5.2 Zaťaženie podvozku pri prednej a zadnej centáži

Z vypočítaných hodnôt uvedených v tabuľke vidíme, že najväčšie zaťaženie predného podvozku pri státí na zemi je pri prednej centráži a najväčšie zaťaženie hlavného podvozku je pri zadnej centráži letúnu.

7.2 Voľba pneumatiky predného podvozku

Pneumatiku pre predný podvozok bola zvolená na základe pneumatiky použitej u pôvodného podvozku letúna. Podľa katalógu výrobcu sa jedná o pneumatiku pod označením GoodYear Flight Special II 5.00-5. Technické parametre a základné rozmery boli získané z katalógu výrobcu pneumatiky uvedeného v prílohách. Hodnoty sú uvedené v tab. 5.3.

Základné rozmery	Vonkajší priemer	**D**	361	mm
	Šírka	**w**	126	mm
Technické parametre	Maximálne dovolené zaťaženie	$F_{PN,dov}$	3561	N
	Maximálna sila pri úplnom stlačení	$F_{PN,max}$	9790	N
	Polomer pri statickom stlačení	$R_{PN,stat}$	145	mm
	Polomer pri maximálnom stlačení	$R_{PN,max}$	109	mm
	Tlak	p_{PN}	0,214	Mpa

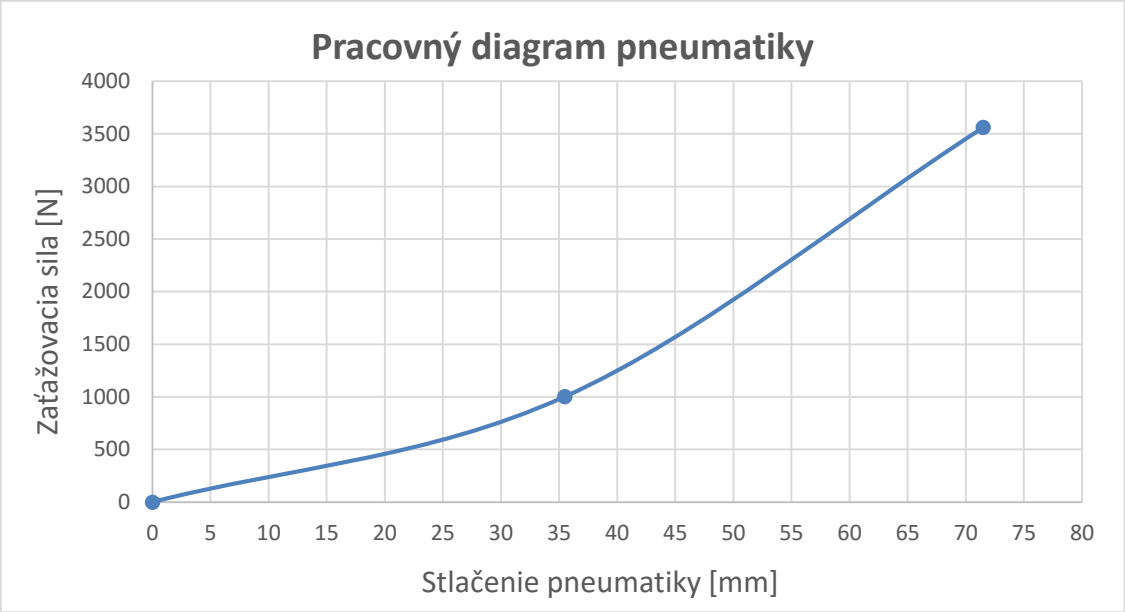
Tab. 5.3 Rozmery a technické parametre zvolenej pneumatiky

Na základe uvedených hodnôt je možné z vonkajšieho priemeru pneumatiky a polomeru pri jednotlivých stlačeniach vypočítať stlačenie pneumatiky.

$$\delta_{PN,stat} = \frac{D}{2} - R_{PN,stat} = \frac{361}{2} - 145 = \ 36\ mm \tag{5.6}$$

$$\delta_{max} = \frac{D}{2} - R_{max} = \frac{361}{2} - 109 = 72\ mm \tag{5.7}$$

Pri statickom zaťažení pôsobí na pneumatiku sila F_{ps1}, ktorá ju stlačí o hodnotu $s_{PN,stat}$. Pri maximálnom zaťažení je pneumatika stlačená o hodnotu s_{max} silou $F_{PN,dov}$. Z vypočítaných hodnôt sme vytvorili pracovný diagram pneumatiky, ktorý je zobrazený ma obr.5.3. Pracovný diagram pneumatiky nám znázorňuje závislosť zaťažovacej sily, ktorá pôsobí na pneumatiku na stlačení pneumatiky. Z diagramu môžeme jednoducho určiť aké stlačenie pneumatiky zodpovedá danej zaťažovacej sile. Maximálna dovolená sila na pneumatiku je 3561 N a pneumatika je v dôsledku zaťaženia stlačená o 72 mm. Pri zaťažení letúna pri státi na zemi je stlačenie pneumatiky 36 mm. Toto stlačenie sme uvažovali pri prednej centráži letúna.



Obr. 5.3 Pracovný diagram pneumatiky

Prevádzkový násobok pneumatiky je dôležitou vstupnou veličinou pre návrh hydropneumatického tlmiča a jeho hodnotu sme získali podielom maximálneho dovoleného zaťaženia a statického zaťaženia pneumatiky. Hodnotu sme zaokrúhlili na najbližší vyšší prevádzkový násobok.

$$n_{prov,PN} = \frac{F_{PN,dov}}{F_{ps1}} = \frac{3561}{1002} = 3{,}55 \approx 3{,}6 \tag{5.8}$$

Uvažujeme, že maximálny prevádzkový násobok tlmiča je rovný maximálnemu prevádzkovému násobku pneumatiky.

$$n_{prov,tl} = n_{prov,PN} = 3{,}6 \tag{5.9}$$

Účinnosť pneumatiky je daná pomerom skutočnej a ideálnej práce, ktorú pneumatika vykoná pri maximálnom dovolenom zaťažení. Skutočná práca je úmerná ploche pod krivkou v pracovnom diagrame pneumatiky. Účinnosť pneumatiky vyjadruje plnosť pracovného diagramu a podľa literatúry býva v rozmedzí 0,45 ÷ 0,5. Na základe predpisu volíme hodnotu účinnosti pneumatiky 0,5, čo približne zodpovedá hodnote danej pracovným diagramom. Práca pneumatiky je daná súčinom maximálneho dovoleného zaťaženia a maximálneho stlačenia pneumatiky vynásobeného účinnosťou. Na základe toho sme vypočítali prácu pneumatiky predného podvozku pri prednej centráži letúna.

$$A_{PN} = \eta_{PN} \cdot F_{PN,dov} \cdot \delta_{max} = 0{,}5 \cdot 3561 \cdot 0{,}072 = 128{,}2\ J \tag{5.10}$$

7.3 Návrh hydropneumatického tlmiča

Podvozok letúna musí pri pristátí absorbovať energiu nárazu. Tlmič a pneumatika konajú prácu, ktorá sa musí rovnať vertikálnej zložke kinetickej energie letúna. Jedna časť tejto práce sa nevratne zmení na teplo. Druhá časť tejto práce je akumulovaná a je využitá pre návrat letúna do polohy danej statickým zaťažením.

Zvislú zložku kinetickej energie vypočítame zo vzťahu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_{TOW} \cdot v_y^2 \tag{5.11}$$

v_y - vertikálna zložka rýchlosti letúna

Rýchlosť v_y sme vypočítali podľa predpisu CS-VLA podľa paragrafu CS-VLA 473:

$$v_y = 0{,}51 \cdot \left(\frac{m_{TOW} \cdot g}{S}\right)^{0{,}25} = 0{,}51 \cdot \left(\frac{600 \cdot 9{,}81}{12{,}3}\right)^{0{,}25} = 2{,}4\, m \cdot s^{-1} \tag{5.12}$$

Vertikálnu zložku kinetickej energie vypočítame zo vzťahu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_{TOW} \cdot v_y^2 = \frac{1}{2} \cdot 600 \cdot 2{,}4^2 = 1707\, J \tag{5.13}$$

Práca, ktorú musí podvozok vykonať je rovná tejto kinetickej energii $A_{podv} \approx E_k$ a zároveň súčtu práce pneumatiky a tlmiča.

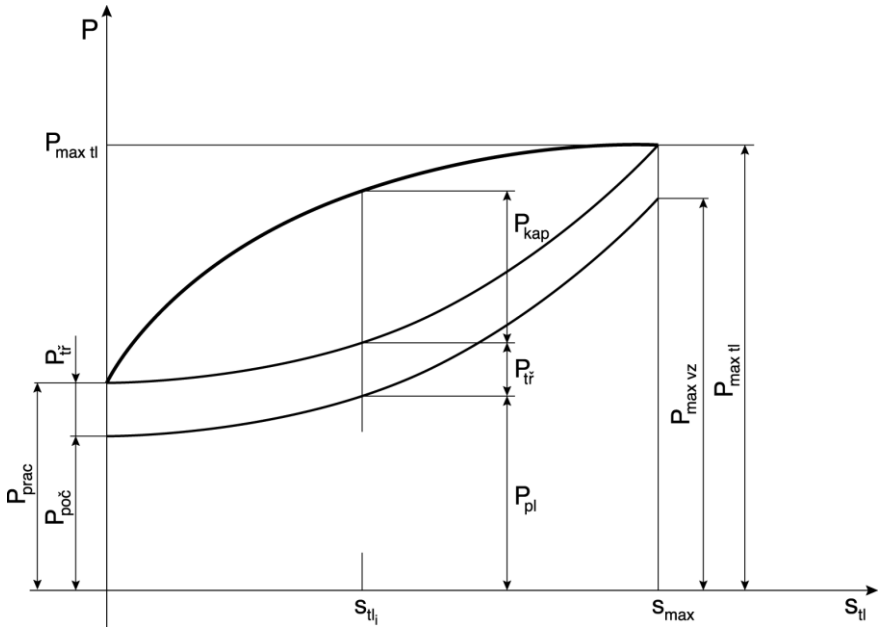
$$A_{podv} = A_{tl} + A_{pn} \tag{5.14}$$

Celková práca sa rozkladá na tri podvozkové nohy, dve nohy hlavného podvozku a jednu predného podvozku. Z toho dôvodu sme podelili celkovú prácu počtom podvozkových nôh a odčítali prácu pneumatiky predného podvozku. Výsledkom bola potom práca tlmiča predného podvozku.

$$A_{tl} = \frac{A_{podv}}{3} - A_{pn} = \frac{E_k}{3} - A_{pn} = \frac{1707}{3} - 128{,}2 = 440{,}8\, J \tag{5.15}$$

Základnou charakteristikou hydropneumatického tlmiča je pracovný diagram, ktorý vyjadruje rovnako ako u pneumatiky závislosť sily na okamžitom stlačení. Tento diagram je na obr. 5.4.

Okamžitá sila pôsobiaca na tlmič sa prenáša pomocou troch zložiek. Prvou zložkou je sila prenesená prostredníctvom plynu, druhá zložka je sila prenesená prostredníctvom kvapaliny a treťou zložkou je trecia sila tesnenia pôsobiaca proti pohybu piestu. Plocha pod krivkou okamžitej sily je rovná celkovej práci tlmiča a zároveň je rovná súčtu práce plynu, kvapaliny a tesnenia.



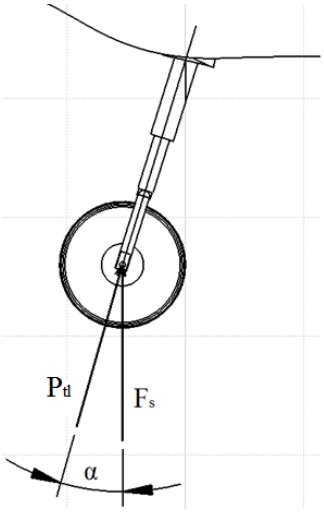
Obr. 5.4 Pracovný diagram hydropneumatického tlmiča

Pre výpočet sily pôsobiacej na tlmič predného podvozku pri státi na zemi sme vychádzali s rozkladu síl, ktorý vyplýva z obr. 5.5. Tlmič je zaťažovaný silou F_{tl} v smere jeho osy. Táto sila je jednou so zložiek vertikálnej sily od reakcie zeme na podvozok a označujeme ju F_s. Osa tlmiča je vychýlená od vertikálnej osy o uhol α, ktorý sme určili z navrhnutej geometrie podvozku. Silu pôsobiacu na tlmič sme určili podľa nasledujúceho vzťahu.

$$P_{tl} = F_s \cdot \cos\alpha \tag{5.16}$$

V predchádzajúcej rovnici nám člen cosα reprezentuje prevodový pomer φ, ktorý vypočítame nasledovne. Uhol bol volený z geometrie podvozkovej nohy pri návrhu variant.

$$\varphi = cos\alpha = \cos\left(15^{\circ}\right) = 0{,}966 \tag{5.17}$$



Obr. 5.5 Rozklad síl na prednom podvozku

7.3.1 Výpočet maximálneho zdvihu tlmiča

Pri výpočte maximálneho zdvihu tlmiča sme použili rovnicu pre prácu tlmiča. Práca tlmiča je rovná súčinu maximálnej sile pôsobiacej na tlmič P_{tlmax}, maximálnemu stlačeniu tlmiča s_{max} a plnosti diagramu, ktorá je prezentovaná účinnosťou tlmiča η_{tl}.

$$A_{tl} = P_{tlmax} \cdot s_{max} \cdot \eta_{tl} \tag{5.18}$$

Účinnosť hydropneumatického tlmiča sa pohybuje v rozmedzí 0,65÷0,8. Podľa predpisu CS-LSA sme zvolili účinnosť 0,65. Maximálne stlačenie sme počítali pre prednú centráž letúna, pretože na tlmič pôsobí najväčšia sila. Po dosadení do rovnice dostaneme výraz.

$$A_{tl} = F_{ps1} \cdot n_{prov,tl} \cdot \varphi \cdot s_{max} \cdot \eta_{tl} \tag{5.19}$$

Z predchádzajúcej rovnice sme určili maximálne stlačenie tlmiča.

$$s_{max} = \frac{A_{tl}}{F_{ps1} \cdot n_{prov,tl} \cdot \varphi \cdot \eta_{tl}} = \frac{440{,}8}{1002 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}966 \cdot 0{,}65} = 0{,}195 = 195\ mm \tag{5.20}$$

7.3.2 Výpočet priemeru piestu

Dôležitou návrhovou veličinou pri určení priemeru piestu je plniaci tlak plynu v tlmiči p_0. Tlak plynu pri počiatočnom zdvihu tlmiča je rovný podielu počiatočnej sily plynu P_{pl0} a vnútornej plochy valca S.

$$p_0 = \frac{P_{pl0}}{S_{piest}} \tag{5.21}$$

Silu P_{tl0} pôsobiacu na piest pri nulovom zdvihu sme vypočítali zo sily tlmiča P_{tl} vynásobenej súčiniteľom predpätia tlmiča ψ. Tento súčiniteľ je vyjadrený ako pomer počiatočnej sily pôsobiacej na podvozok pri nulovom zdvihu tlmiča k sile, ktorá pôsobí na tlmič pri státí na zemi. Pre zjednodušenie sme silu pri nulovom zdvihu tlmiča F_{s0} zvolili ako silu pôsobiacu na podvozok pri minimálnej hmotnosti letúna, ktorá je pri 31,5% b_{sat}. Na základe polohy ťažiska voči prednému podvozku pri tejto centráži sme určili výslednú reakčnú silu.

$$F_{s0} = m_{min} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 452 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{216}{1471} = 650\ N \tag{5.22}$$

Vzdialenosť	Pri m_{min}	
a_{min}	1255	mm
b_{min}	216	mm
d	1471	mm

Tab. 5.4 Poloha ťažiska voči podvozku letúna pri minimálnej hmotnosti

Z určenej sily sme vypočítali predpätie tlmiča a počiatočnú silu tlmiča pri nulovom zdvihu.

$$\Psi = \frac{F_{s0}}{F_{ps1}} = \frac{650}{1002} = 0{,}65 \tag{5.23}$$

$$P_{tl0} = P_{tl} \cdot \Psi = F_{ps1} \cdot \varphi \cdot \Psi = 1002 \cdot 0{,}966 \cdot 0{,}65 = 628\ \mathrm{N} \tag{5.24}$$

Pri stlačení tlmiča musí sila pôsobiaca na piest prekonať odporovú silu tesnenia, ktorá pôsobí proti pohybu piestu. Túto silu sme zvolili ako 15% počiatočnej sily pôsobiacej na tlmič. Následne sme určili počiatočnú silu plynu, ktorá predstavuje 85% počiatočnej sily.

$$P_{pl0} = P_{tl0} \cdot 0{,}85 = 628 \cdot 0{,}85 = 534\ N \tag{5.25}$$

Z určenej počiatočnej sily plynu pôsobiacu na piest sme vypočítali obsah piestu a následne jeho priemer. Plniaci tlak sme zvolili 0,4 MPa s ohľadom na rozmery valca.

$$S_{piest} = \frac{P_{pl0}}{p_0} = \frac{534}{0{,}4 \cdot 10^6} = 1335 \cdot 10^6\ m^2 = 1335\ mm^2 \tag{5.26}$$

$$D_{piest} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{piest}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1335}{3{,}14}} = 41\ mm \tag{5.27}$$

7.3.3 Výpočet objemu plynu vo valci

Pri výpočte objemu plynu vo valci sme vychádzali z predpokladu, že stlačovanie plynu prebieha podľa polytropického zákona. Objem plynu na počiatku zdvihu sa zmenší o objem, ktorý je rovný objemu stlačenia daného maximálnym zdvihom tlmiča.

$$p_0 \cdot {V_0}^n = p_{max} \cdot {V_{min}}^n \tag{5.28}$$

Tlak p_0 predstavuje počiatočný tlak plynu pri nulovom zdvihu tlmiča pri objeme plynu vo valci V_0 a tlak p_{max} predstavuje tlak plynu pri maximálnom stlačení tlmiča pri objeme plynu na konci stlačenia V_{min}. Exponent n predstavuje v rovnici polytropický exponent, ktorý má hodnotu 1,2. Tlak plynu p_{max} sme určili ako podiel maximálnej sily plynu pôsobiacej na piest a obsahu valca.

$$p_{max} = \frac{P_{plmax}}{S_{piest}} = \frac{F_{ps1} \cdot n_{prov,tl} \cdot \varphi - (P_{tl0} - P_{pl0})}{S_{piest}} \tag{5.29}$$

$$p_{max} = \frac{1002 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}966 - (650 - 628)}{1335 \cdot 10^{-6}} = 2{,}5 \cdot 10^6\ Pa = 2{,}5\ MPa \tag{5.30}$$

Výsledný vzťah pre určenie objemu plynu vo valci sme určili nasledovne.

$$V_0 = \frac{S_{piest} \cdot s_{max}}{1 - \left(\frac{p_0}{p_{max}}\right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{1335 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}195}{1 - \left(\frac{0{,}4}{2{,}5}\right)^{\frac{1}{1{,}2}}} = 336 \cdot 10^{-6}\ m^3 \tag{5.31}$$

Po vypočítaní celkového objemu plynu sme určili výšku plynu vo valci.

$$s_{valca} = \frac{V_0}{S_{piest}} - s_{max} = \frac{336 \cdot 10^{-6}}{1335 \cdot 10^6} - 0{,}195 = 0{,}055\ m = 55\ mm \tag{5.32}$$

7.3.4 Pracovný diagram tlmiča

Po vypočítaní potrebných parametrov tlmiča sme pristúpili k výpočtu pracovného diagramu. Pre zostrojenie závislosti sily pôsobiacej na tlmič na stlačení tlmiča sme potrebovali určiť jednotlivé zložky tejto sily. Dráhu tlmiča sme si rozdelili na úseky po 0,01 m a pre jednotlivé úseky vypočítali jednotlivé zložky síl a následne ich vyniesli do grafu.

Pri výpočte sily, ktorou pôsobí plyn na piest sme vychádzali z rovnice polytropického deja 5.28. Po stlačení plynu o vzdialenosť s_i sa zmenší počiatočný objem plynu o objem daný súčinom vzdialenosti s_i a plochy piestu. V tomto okamihu pôsobí plyn silou F_{ipl}. Vypočítali sme všetky tieto sily pre jednotlivé vzdialenosti.

$$p_0 \cdot {V_0}^n = \frac{P_i}{S_{piest}} \cdot \left(V_0 - S_{piest} \cdot s_i\right)^n \tag{5.33}$$

$$P_i = \frac{p_0 \cdot {V_0}^n \cdot S_{piest}}{\left(V_0 - S_{piest} \cdot s_i\right)^n} \tag{5.34}$$

Z rovnice 5.34 sme vypočítali sily plynu na piest v závislosti na stlačení tlmiča.

Treciu silu, ktorou pôsobí tesnenie proti pohybu piestu sme vypočítali ako 15 % z počiatočnej sily pôsobiacej na tlmič P_{tl0}.

$$P_{trenia} = 0{,}15 \cdot P_{tl0} = 0{,}15 \cdot 628 = 94\ N \tag{5.35}$$

Silu od trenia medzi tesnením a valcom sme pripočítali k sile plynu v jednotlivých stlačeniach a vznikla nám závislosť sily ktorá pôsobí na tlmič na stlačení tlmiča.

Závislosť sily kvapaliny na stlačení tlmiča zobrazuje krivka, ktorá ma tvar kubickej paraboly. Túto závislosť sme zapísali nasledovne.

$${P_{kvap}}^3 = k \cdot s_i \tag{5.36}$$

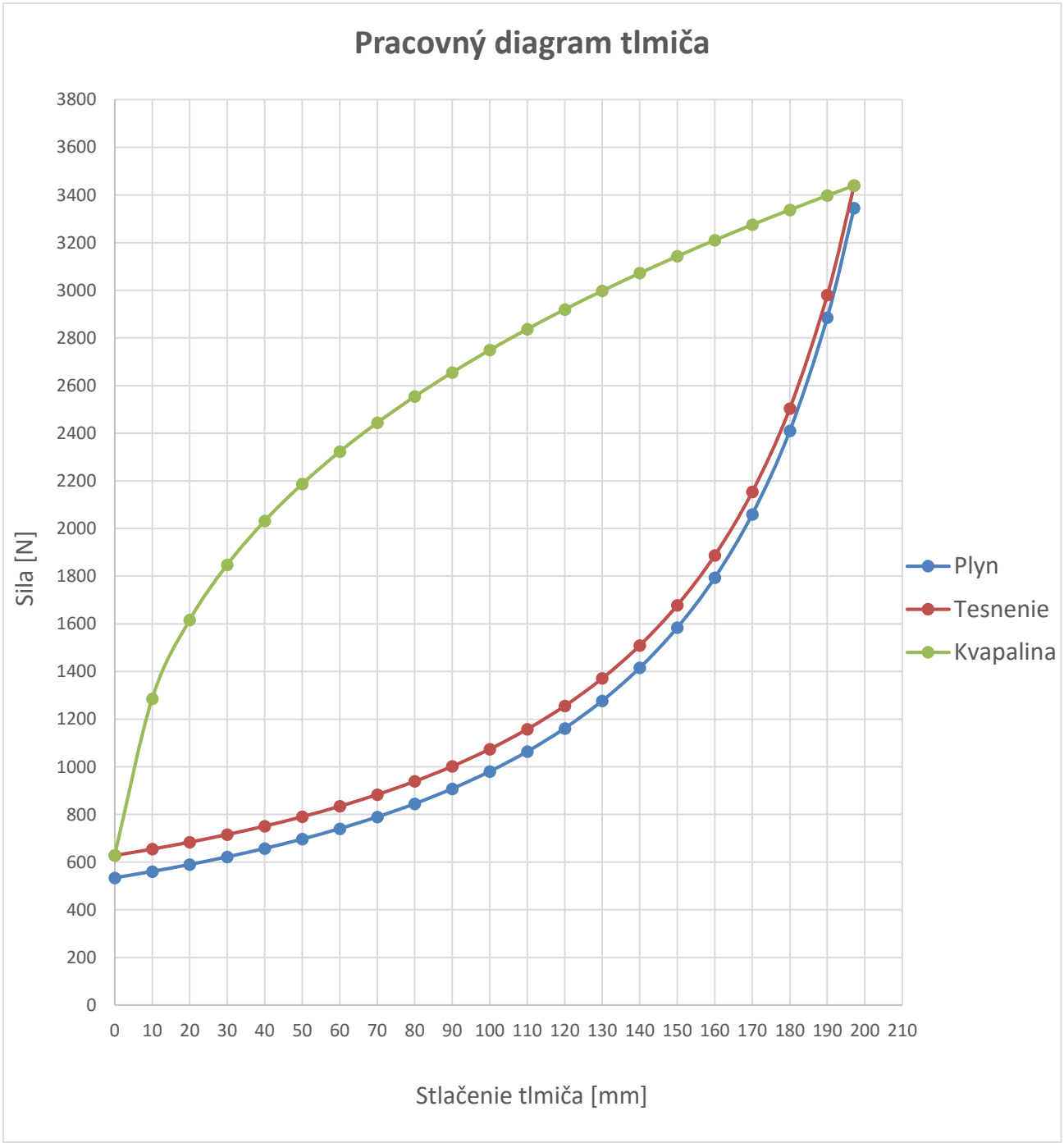
Pre vyjadrenie sily sme rov. 5.36 vyjadrili do nasledujúceho tvaru.

$$P_{kvap} = k^{1/3} \cdot s_i^{1/3} \tag{5.37}$$

Koeficient $k^{1/3}$ sme vyjadrili nasledujúcim vzťahom.

$$k^{1/3} = \frac{P_{maxtl}}{{s_{max}}^{1/3}} \tag{5.38}$$

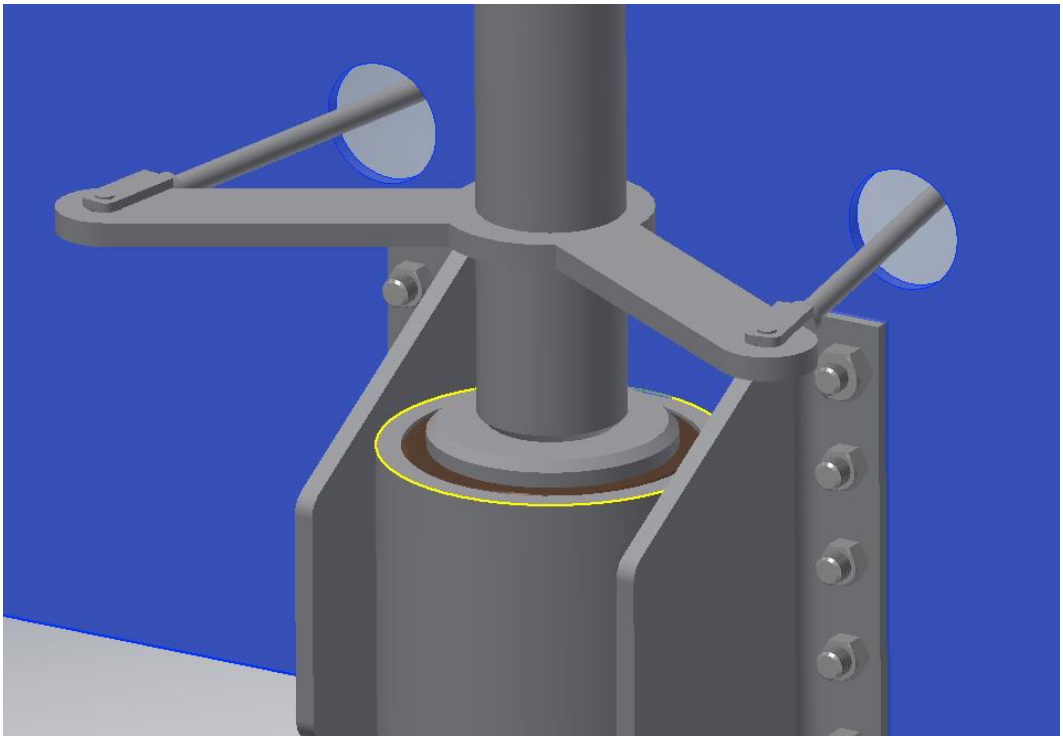
Súčtom všetkých troch zložiek síl sme dostali výslednú silu. Jednotlivé zložky síl sú pre znázornenie v diagrame vyznačené farebne. Pracovný diagram tlmiča je na obr. 5.6.



Obr. 5.6 Pracovný diagram hydropneumatického tlmiča

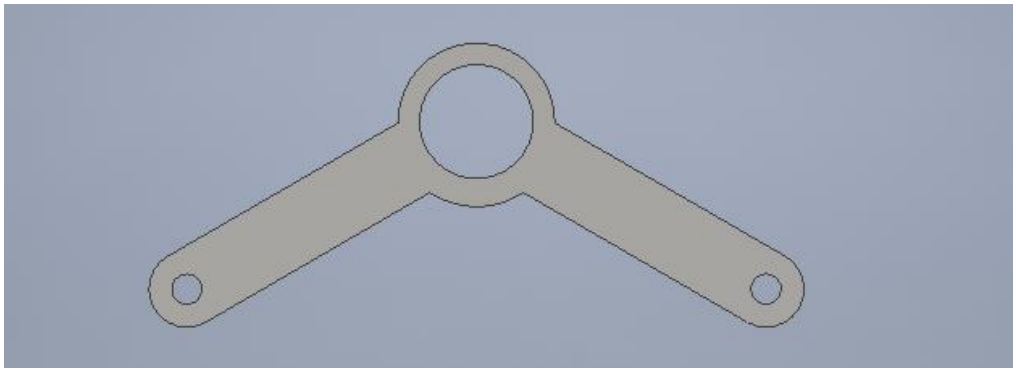
7.4 Návrh riadenia podvozku

Zo zvolenej varianty podvozku bol na základe požadovaných zmien vytvorený detailný návrh riadenia podvozkovej nohy. Riadenie bolo zvolené pomocou tiahel, ktoré sú napojené na pedále nožného riadenia. K hornej časti veka valca je navarená tyč riadenia, ktorá je spojená s pákou riadenia. Páka je na tyči taktiež navarená. Páka riadenia má jednotlivé ramená vychýlené smerom od trupovej prepážky, aby bol zabezpečený dostatočný pohyb páky a nedošlo ku kontaktu páky z prepážkou trupu pri krajných výchylkách. Zobrazenie riadenia podvozku je na obr. 5.7.



Obr. 5.7 Zobrazenie riadenia predného podvozku

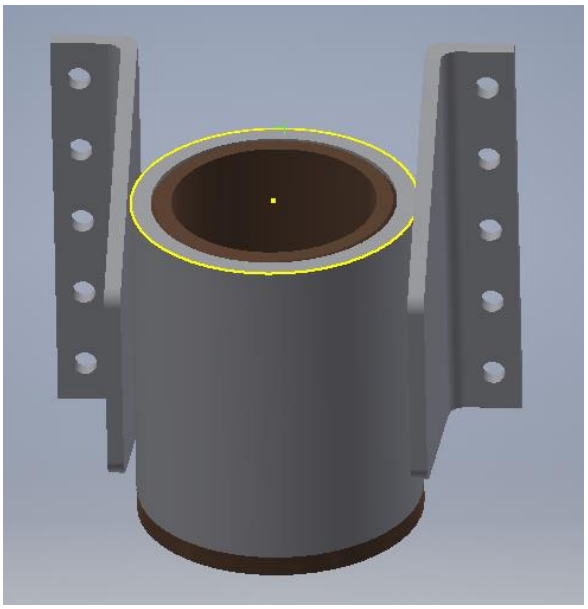
Na koncoch páky boli vytvorené otvory pre uchytenie tiahel riadiaceho mechanizmu. Tiahla od páky prestupujú prepážkou trupu smerom a sú napojené na riadiace pedále. Geometria páky riadenia je zobrazená na obr. 5.8.



Obr. 5.8 Páka riadenia

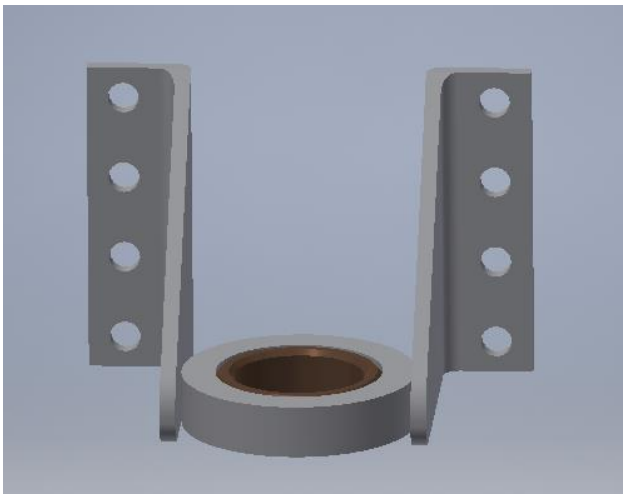
7.5 Návrh uloženia podvozku

Ako bolo popísané v návrhu výslednej varianty zástavbu bolo potrebné rozdeliť na dve časti aby bol vytvorený priestor pre páku riadenia. Spodný úchyt sa skladá z dvoch konzol medzi ktoré je navarená trubka. V trubke je zalisované klzné puzdro. Valec na konci ma zúženie ktoré je uložené v klznom puzdre. Na konci zúženia má valec zväčšený priemer. Tým bol vytvorený doraz vo vrchnej časti valca, ktorý fixuje jeho polohu. Spodný úchyt je zobrazený na obr. 5.9.



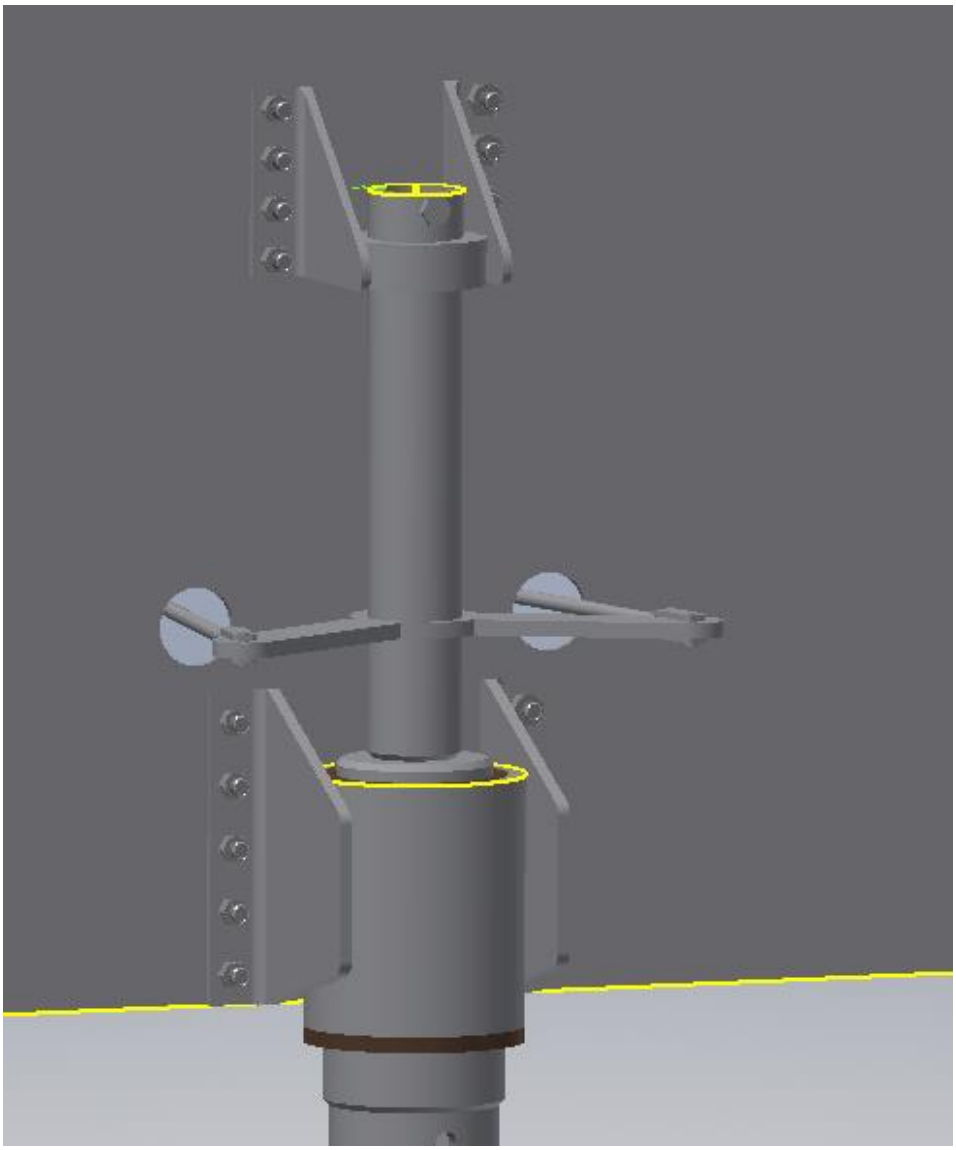
Obr. 5.9 Uloženie valca

Trubka riadenia pripojená k valcu prechádza horným úchytom, v ktorom je nalisované klzné puzdro a zaisťovacou podložkou. Tá je spojená s trubkou pomocou šrubu zaisteného na konci maticou. Zaisťovacia podložka sa spodnou stranou opiera o horný úchyt a tým zamedzuje vypadnutiu podvozkovej nohy. Horný úchyt podvozkovej nohy je na obr. 5.10.



Obr. 5.10 Horný úchyt

Horný a spodný úchyt sú k trupovej prepážke pripevnené pomocou šrubov zaistených maticou. Na uchytenie uloženia valca je použitých 10 šrúbov z toho 5 na každej strane konzoly o priemere 6 mm a horný záves je uchytený pomocou 4 šrubov na každej strane o priemere 6 mm. Detail uchytenia podvozku je na obr. 5.11.



Obr. 5.11 Detail uchytenia podvozkovej nohy

8 Výpočet zaťaženie podvozku

Na základe vypočítaných parametrov hydropneumatického tlmiča sme vypočítali zaťaženie podvozku pri pristátí podľa predpisu CS-LSA, ktorý vychádza z americkej normy ASTM F2245. Na podvozok v priebehu pristátia pôsobia najväčšie sily pri dotyku podvozku so zemou. Predpis udáva pre konfiguráciu letúna s predným podvozkom kontrolu celkovo troch prípadov pristátia. Ako prvé predpis udáva vodorovné pristátie so sklonenými reakciami, ako druhé pristátie s predným kolesom tesne nad zemou a posledný prípad je pristátie s veľkým uhlom nábehu. Pre náš prípad je potrebné určiť iba zaťaženie pri vodorovnom pristáti so sklonenými reakciami, pretože pre ostatné prípady pristátia uvádza predpis nulové zaťaženie predného podvozku. Pre predný podvozok predpis naviac vyžaduje výpočet dodatočného zaťaženia na predný podvozok.

8.1 Výpočet násobku

Pre výpočet zaťaženia podvozku je potrebné najprv určiť násobok od zotrvačných síl. Výpočet násobku je daný podľa normy ASTM v odstavci 5.8.1.1.

$$n_j = \frac{h + \frac{d}{3}}{ef \cdot d} \tag{6.1}$$

h – pádová výška [m]

d – celkové stlačenie podvozku (je rovné súčtu stlačenia pneumatiky a tlmiča) [m]

ef – účinnosť tlmenia (je rovná súčtu účinnosti tlmiča a pneumatiky) [-]

Pre výpočet násobku od zotrvačných síl v rov. 6.1 je potrebné určiť pádovú výšku. Predpis udáva, že pádová výška musí byť väčšia ako 23 cm. Výpočet výšky sme určili podľa predpisu.

$$h = 1{,}32 \cdot \sqrt{\frac{G}{S}} = 1{,}32 \cdot \sqrt{\frac{m_{TOW} \cdot g}{S}} = 1{,}32 \cdot \sqrt{\frac{600 \cdot 9{,}81}{12{,}3}} = 28{,}9\ cm \tag{6.2}$$

Požiadavka na pádovú výšku $h > 23\ cm$ je splnená. Pre výpočet násobku od nárazových síl môžeme použiť rovnicu 6.1. Účinnosť tlmenia je podľa predpisu udávaná 0,5 pre pneumatiku a 0,65 pre hydropneumatický tlmič.

$$n_j = \frac{h + \frac{d_{tire} + d_{shock}}{3}}{ef_{tire} \cdot d_{tire} + ef_{shock} \cdot d_{shock}} \tag{6.3}$$

ef_{tire} – účinnosť pneumatiky [-]

d_{tire} – stlačenie pneumatiky [-]

ef_{shock} – účinnosť tlmiča [-]

d_{shock} -stlačenie tlmiča [m]

Rovnicu 5.40 sme vypočítali na základe dosadených hodnôt z voľby pneumatiky a tlmiča predného podvozku.

$$n_j = \frac{0{,}289 + \frac{0{,}072 + 0{,}195}{3}}{0{,}5 \cdot 0{,}072 + 0{,}65 \cdot 0{,}195} = 2{,}32 \tag{6.4}$$

Pre výpočet maximálneho prevádzkového násobku vychádzame z predpokladu, že 2/3 hmotnosti letúna sú vyvážené vztlakom krídla.

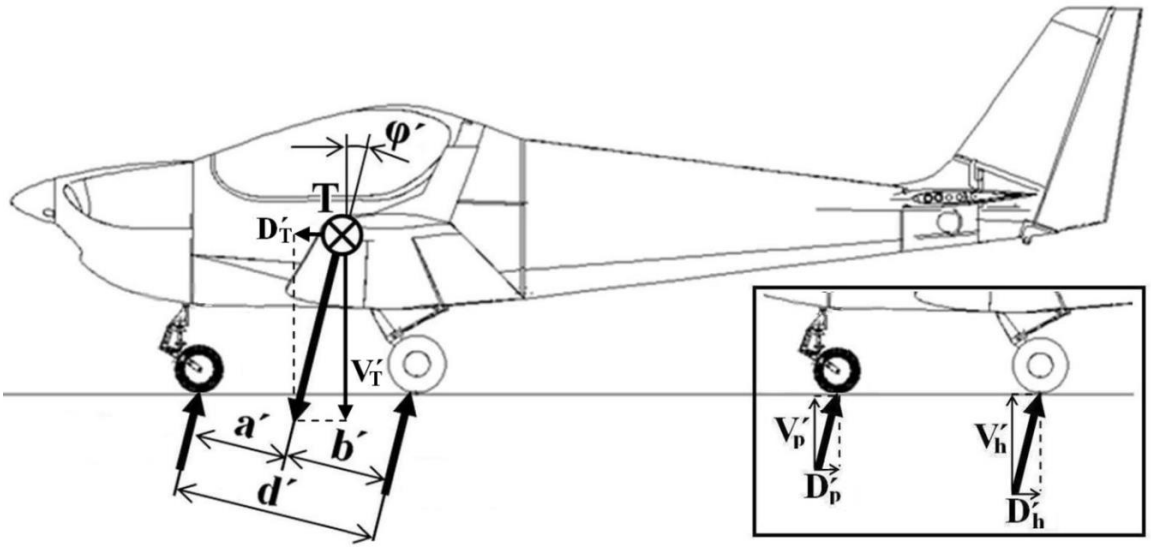
L = 2/3

$$n = L + n_j = \frac{2}{3} + 2{,}32 = 2{,}99 \approx 3 \tag{6.5}$$

Tento násobok sme použili pri výpočte zaťaženia podvozku pri zvolených pristávacích prípadoch.

8.2 Zaťaženie pri vodorovnom pristátí so sklonenými reakciami

Pri výpočte zaťaženia vychádzame z predpokladu, že letún pristane súčasne na predný a hlavný podvozok a pri dotyku so zemou budú naňho pôsobiť sklonené reakcie ako je znázornené na obr. 6.1. Uhol sklonu φ' je udávaný predpisom a má hodnotu 14°. Výpočet bol realizovaný podľa normy ASTM F2245 paragraf 5.8.1.1.



Obr. 6.1 Znázornenie silových reakcií na podvozku letúna [21]

Jednotlivé sily sme rozložili na dve zložky podľa smeru pôsobenia a to na horizontálnu zložku a vertikálnu zložku.

8.2.1 Výpočet vertikálnej zložky tiažovej sily

$$V'_T = n \cdot m_{tow} \cdot g = 3 \cdot 600 \cdot 9{,}81 = 17658\ N \tag{6.6}$$

8.2.2 Výpočet horizontálnej zložky tiažovej sily

$$D'_T = K \cdot n \cdot m_{tow} \cdot g = 0{,}25 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 9{,}81 = 4415\ N \tag{6.7}$$

Za člen K podľa predpisu dosadzujeme hodnotu 0,25.

Vzdialenosti a', b', d' sme vypočítali vynásobením pôvodných vzdialeností pri statickom zaťažení podvozku a, b , d členom cos(φ).

8.2.3 Výpočet zaťaženia podvozku pri prednej centráži

Zaťaženie predného podvozku od vertikálnej zložky

$$V'_P = (n - L) \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{b'}{d'} = \left(3 - \frac{2}{3}\right) \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{243}{1427} = 2337\ N \tag{6.8}$$

Zaťaženie predného podvozku od horizontálnej zložky

$$D'_P = K \cdot n \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{b'}{d'} = 0{,}25 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{243}{1427} = 751\ N \tag{6.9}$$

Zaťaženie hlavného podvozku od vertikálnej zložky

$$V'_H = (n - L) \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{a'}{d'} = \left(3 - \frac{2}{3}\right) \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{1184}{1427} = 11397\ N \tag{6.10}$$

Zaťaženie hlavného podvozku od horizontálnej zložky

$$D'_H = K \cdot n \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{a'}{d'} = 0{,}25 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{1187}{1427} = 3663\ N \tag{6.11}$$

8.2.4 Výpočet zaťaženia podvozku pri zadnej centráži

Zaťaženie predného podvozku od vertikálnej zložky

$$V'_P = (n - L) \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{b'}{d'} = \left(3 - \frac{2}{3}\right) \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{180}{1427} = 1727\ N \tag{6.12}$$

Zaťaženie predného podvozku od horizontálnej zložky

$$D'_P = K \cdot n \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{b'}{d'} = 0{,}25 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{180}{1427} = 555\ N \tag{6.13}$$

Zaťaženie hlavného podvozku od vertikálnej zložky

$$V'_H = (n - L) \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{a'}{d'} = \left(3 - \frac{2}{3}\right) \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{1248}{1427} = 12007\ N \tag{6.14}$$

Zaťaženie hlavného podvozku od horizontálnej zložky

$$D'_H = K \cdot n \cdot m_{tow} \cdot g \cdot \frac{a'}{d'} = 0{,}25 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{1248}{1427} = 3859\ N \tag{6.15}$$

8.2.5 Zhodnotenie výsledkov výpočtu

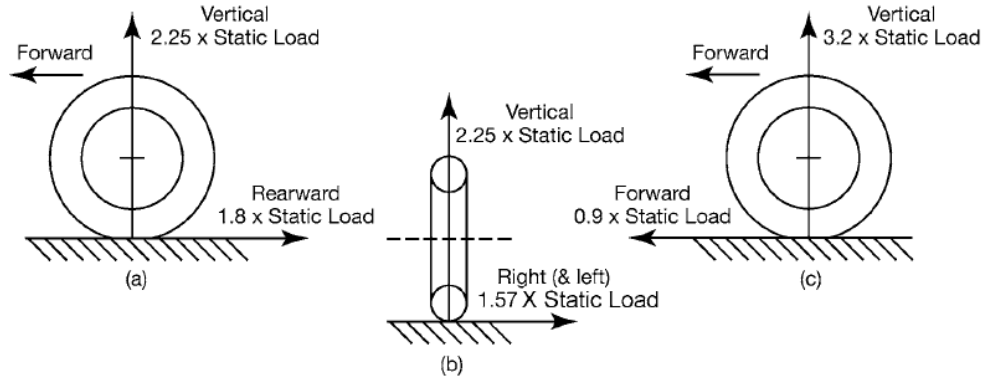
Po výpočte zaťaženia podvozku pri vodorovnom pristátí so sklonenými reakciami vidíme, že najväčšie zaťaženie predného podvozku je pri prednej centráži letúna, kedy je podvozok zaťažený silou 2337 N vo vertikálnom smere a 751 N v horizontálnom smere. Vypočítané hodnoty sú uvedené v tab. 6.1.

Zaťaženie pri vodorovnom pristáti so sklonenými reakciami					
	Vzdialenosť	Predná centráž		Zadná centráž	
	a'	1184	mm	1248	mm
	b'	243	mm	180	mm
	d'	1427	mm	1427	mm
Vertikálna zložka G	VT'	17658	N	17658	N
Horizontálna zložka G	DT'	4415	N	4415	N
Predný podvozok	Vp'	2337	N	1727	N
	Dp'	751	N	555	N
Hlavný podvozok	Vh'	11397	N	12007	N
	Dh'	3663	N	3859	N

Tab. 6.1 Výsledky výpočtu zaťaženia letúna pri vodorovnom pristátí so sklonenými reakciami

8.3 Dodatočné zaťaženie predného podvozku

Dodatočné zaťaženie predného podvozku bolo vypočítané podľa normy ASTM F2245 podľa odseku 5.8.1.7. Požadované prípady zaťaženia sú zobrazené na obr. 6.2. Výpočty boli prevedené pre prednú a zadnú centráž letúna. Pohyb dopredu je znázornený na obr. 6.2 a, bočné zaťaženie na obr. 6.2 b, a pohyb dozadu na obr. 6.2 c.



Obr. 6.2 Požiadavky na dodatočné zaťaženie predného podvozku

8.3.1 Výpočet zaťaženia podvozku pri prednej centráži

Zaťaženie predného podvozku od horizontálnej sily pri pohybe dozadu

$$D''_{Pr} = 1{,}8 \cdot F_{ps1} = 1{,}8 \cdot 1002 = 1083\ N \tag{6.16}$$

Zaťaženie predného podvozku od vertikálnej sily pri pohybe dozadu

$$V''_{Pr} = 2{,}25 \cdot F_{ps1} = 2{,}25 \cdot 1002 = 2254\ N \tag{6.17}$$

Zaťaženie predného podvozku od horizontálnej sily pri pohybe dopredu

$$D''_{pf} = 0{,}9 \cdot F_{ps1} = 0{,}9 \cdot 1002 = 901\ N \tag{6.18}$$

Zaťaženie predného podvozku od vertikálnej sily pri pohybe dopredu

$$V''_{pf} = 3{,}2 \cdot F_{ps1} = 3{,}2 \cdot 1002 = 3205\ N \tag{6.19}$$

Zaťaženie predného podvozku od bočnej sily

$$S''_{p} = 1{,}57 \cdot F_{ps1} = 1{,}57 \cdot 1002 = 1573\ N \tag{6.20}$$

8.3.2 Výpočet zaťaženia podvozku pri zadnej centráži

Zaťaženie predného podvozku od horizontálnej sily pri pohybe dozadu

$$D''_{Pr} = 1{,}8 \cdot F_{ps2} = 1{,}8 \cdot 740 = 1332\ N \tag{6.21}$$

Zaťaženie predného podvozku od vertikálnej sily pri pohybe dozadu

$$V''_{Pr} = 2{,}25 \cdot F_{ps2} = 2{,}25 \cdot 740 = 1666\ N \tag{6.22}$$

Zaťaženie predného podvozku od horizontálnej sily pri pohybe dopredu

$$D''_{pf} = 0{,}9 \cdot F_{ps2} = 0{,}9 \cdot 740 = 666\ N \tag{6.23}$$

Zaťaženie predného podvozku od vertikálnej sily pri pohybe dopredu

$$V''_{pf} = 3{,}2 \cdot F_{ps2} = 3{,}2 \cdot 740 = 2369\ N \tag{6.24}$$

Zaťaženie predného podvozku od bočnej sily

$$S''_{p} = 1{,}57 \cdot F_{ps2} = 1{,}57 \cdot 740 = 1162\ N \tag{6.25}$$

8.3.3 Zhodnotenie výsledkov výpočtu

Z vypočítaných hodnôt vyplýva, že predný podvozok bude pri dodatočnom zaťažení najviac namáhaný pri prednej centráži vo vertikálnom smere pri pohybe letúna dopredu, v horizontálnom smere pri pohybe letúna dozadu. Bočná sila pôsobiaca na podvozok nadobúda najvyššiu hodnotu tiež pri prednej centráži. Výsledné hodnoty vypočítaných síl pri dodatočnom zaťažení predného podvozku letúna sú uvedené v tab. 6.2.

Dodatočne zaťaženie predného podvozku					
	Zložka sily	**Predná centráž**		**Zadná centráž**	
Zaťaženie dozadu	**Vertikálna**	2254	N	1666	N
	Horizontálna	1803	N	1332	N
Zaťaženie dopredu	**Vertikálna**	3205	N	2369	N
	Horizontálna	901	N	666	N
Zaťaženie bočné	**Vertikálna**	2254	N	1666	N
	Bočná	1573	N	1162	N

Tab. 6.2 Výsledné pôsobiace sily pri dodatočnom zaťažení predného podvozku

8.4 Určenie maximálneho zaťaženia podvozku

Na základe prevedených výpočtov zaťaženia predného podvozku letúna PS-28 Cruiser pri vodorovnom pristátí so sklonenými reakciami a dodatočnom zaťažení predného podvozku boli určené maximálne hodnoty zaťaženia. Maximálne vypočítané hodnoty sú uvedené v tab. 6.3.

	Zložka sily	Hodnota
Pristátie so sklonenými reakciami	vertikálna	2337 N
	horizontálna	751 N
Dodatočné zaťaženie predného podvozku	vertikálna	3205 N
	horizontálna	1803 N
	bočná	1573 N

Tab. 6.3 Maximálne hodnoty zaťaženia

8.5 Porovnanie vypočítaného zaťaženia s nameraným spektrom zaťaženia

Pri určení maximálnej nameranej sily na podvozok pri týchto skúškach sme bol použitý protokol o letovej skúške č.: P10/2015. Na základe týchto nameraných hodnôt zaťaženia bolo v protokole vytvorené spektrum zaťaženia ktoré je uvedené v prílohe. Na základe tohto spektra sme určili maximálnu silu zaťaženia predného podvozku. Maximálna sila určená na základe spektra zaťaženia je podľa grafu 5000 N. Pri výpočte zaťaženia podvozku podľa predpisu CS-LSA pre podvozok s hydropneumatickým tlmičom pre prípad vodorovného pristátia so sklonenými reakciami vyšla maximálna vertikálna zaťažovacia sila na predný podvozok 2337 N a maximálna horizontálna sila 751 N. Výslednú silu na podvozok určíme z rovnice 6.26.

$$F_{max} = \sqrt{{V'_{Pmax}}^2 + {D'_{Pmax}}^2} = \sqrt{2337^2 + 751^2} = 2455\ N \qquad (6.26)$$

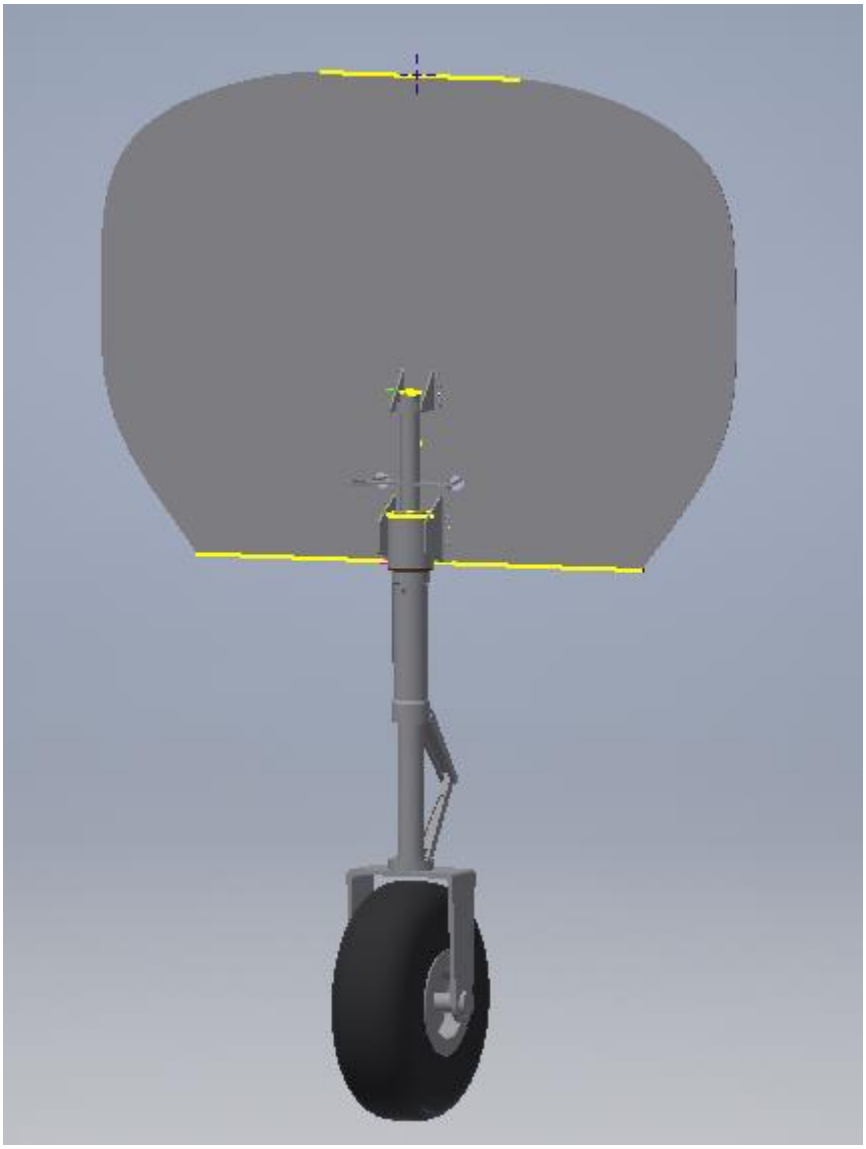
V rovnici 6.26 predstavuje sila F_{max} výslednú silu pôsobiacu na predný podvozok pri maximálnom zaťažení podvozku, ktoré je pri prednej centráži letúna. Rozdiel síl je približne 50 % oproti sile danej spektrom zaťaženia. Pôvodný systém tlmenia podvozku bol navrhnutý na pristátie na spevnených pristávacích dráhach a preto má zhoršené tlmiace vlastnosti na nespevnenom povrchu. V tab. 6.4 je uvedený prehľad nameraných hodnôt. Z tabuľky vyplýva že maximálna sila pôsobí na podvozok pri pristátí na nespevnenom povrchu. Pri pristátí letúna na spevnenom povrchu je rozdiel síl približne 39%. Výpočet ukazuje, že hydropneumatický tlmič prispel k zníženiu sily pôsobiacej na predný podvozok a malo by dôjsť k zlepšeniu charakteru tlmenia. Pre výpočet zaťaženia podľa predpisu CS-LSA bol použitý iba teoreticky návrh tlmiča a charakteristika tlmenia nebola overená meraním, čo vedie k záveru, že vypočítaná hodnota zaťaženia je iba približná a bude sa líšiť od skutočnej hodnoty, ktorú by sme dostali prípadným meraním charakteristík tlmiča.

		F_{12max} [N]
Vzlety	*Série 1*	2 087 ÷ 2 812
	Série 2	2 609 ÷ 3 059
	Série 3	2 500 ÷ 2 851
	Série 4	2 776 ÷ 4 136
	Série 5	3 323 ÷ 4 757
	Série 6	2 851 ÷ 4 033
	Série 7	2 824 ÷ 4 236
	Beton	2 087 ÷ 3 059
	Tráva	2 776 ÷ 4 757
Přistání	*Série 1*	2 783 ÷ 3 742
	Série 2	2 482 ÷ 3 285
	Série 3	2 782 ÷ 3 937
	Série 4	2 967 ÷ 4 653
	Série 5	3 234 ÷ 4 991
	Série 6	3 482 ÷ 4 687
	Série 7	3 218 ÷ 4 876
	Beton	2 482 ÷ 3 937
	Tráva	2 967 ÷ 4 991
Vzlety celkově		2 087 ÷ 4 757
Přistání celkově		2 482 ÷ 4 991

Tab. 6.4

9 Zostava predného podvozku

Zostava podvozku bola vytvorená v programe Autodesk Inventor. Konštrukčné riešenie s uchytením výslednej varianty na prepážku trupu je na obr. 8.1. a 8.2. Výkresy jednotlivých častí podvozku sú uvedené v prílohách.



Obr. 8.1 Zostava podvozkovej nohy

Obr. 8.2 Detail zboku predného podvozku

10 Záver

Cieľom práce bolo navrhnúť riaditeľný predný podvozok s použitím hydropneumatického tlmiča. Prvá kapitola sa zaoberá podvozkami jednotlivých koncepčných usporiadaní podvozkov letúnov a na základe toho ich rozdeľuje na základné kategórie a popisuje jednotlivé výhody nevýhody použitých variant. Nasleduje popis jednotlivých typov podvozkových tlmičov s popisom základného princípu. Z pomedzi jednotlivých typov tlmičov vychádza použitie hydropneumatického tlmiča ako najlepšie technické riešenie, vďaka jeho vysokej účinnosti tlmenia oproti bežne používaným tlmičom.

Následne bol vypracovaný prehľad používaných podvozkov u malých športových lietadiel kategórie CS-LSA a LSA.

Na základe rozboru používaných typov predných podvozkov boli vypracované konštrukčné návrhy predného podvozku. Po zhodnotení jednotlivých návrhov bola vybraná výsledná varianta, ktorá bola použitá pri tvorbe výsledného modelu podvozkovej nohy a bol prevedený návrh hydropneumatického tlmiča na základe.

Na základe návrhu tlmiča bol spravený výpočet zaťaženia podvozku na základe predpisu CS-LSA a porovnaný s nameraným spektrom zaťaženia pôvodného podvozku. Po porovnaní so spektrom sme zhodnotili, že použitie hydropneumatického tlmiča zníži zaťaženie podvozku letúna pri pristáti a tým sa zvýši účinnosť tlmenia.

V závere bol spracovaný detailný návrh podvozku, na základe ktorého bola spracovaná výkresová dokumentácia.

11 Zoznam použitých zdrojov

[1] Bbmf dc3 at kemble 2009 arp [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bbmf_dc3_at_kemble_2009_arp.jpg

[2] Let L-410 Turbolet [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Let_L-410_Turbolet#/media/File:Let_L-410_UVP_Turbolet,_0730,_Slovakian_Air_Force.jpg

[3] B-52H STRATOFORTRESS [online]. 2014 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.minot.af.mil/shared/media/photodb/photos/040406-F-9624D-008.jpg

[4] Dynamic WT9 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: https://www.aerospool.sk/images/helix/gallery/img2.jpg

[5] Dynamic WT9 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: https://www.aerospool.sk/images/helix/gallery/img2.jpg

[6] Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe, Volume 2 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_Ch13.pdf

[7] TL-2000 Sting S4 Aaircraft Maintenance Manual [online]. 2. 2011 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.tl-ultralight.cz/file/edee/prilohy/ke-stazeni/amm-tl-2000-sting-s4.pdf

[8] Ilustrovaný katalog náhradních dílu – 2000 Sting Sport [online]. 2. 2011 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.tl-ultralight.cz/file/edee/prilohy/ke-stazeni/ilustrovany-katalog-nahradnich-dilu-pro-tl-2000-sting.pdf

[9] TL 3000 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://cdn-www.airliners.net/aviation-photos/middle/2/6/7/2218762.jpg

[10] TL - 3000 Sirius Aircraft Maintenance Manual [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.tl-ultralight.cz/file/edee/prilohy/ke-stazeni/amm-tl-3000-sirius_rev2_10jun15-20150812-174723.pdf

[11] Zenith CH 650 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://api.ning.com/files/w3tFrYVSb0pcgSK9Bvd00AdBAoK3i*HqcbBmfUMZsVno395eyeNXx42ww76biC7LtH3j-GxbElJbbc7ctXjh-akzG*n5oQSj/DSC00910.JPG

[12] Zenith CH650B Nosewheel [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.zenithair.co/design-650-landing-gear/

[13] Bristell LSA Aircraft Maintenance and Inspection Procedures [online]. 2013 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://nebula.wsimg.com/2c7a756b360f894804b5821e566bd89d?AccessKeyId=B59C34364EE070B72E63&disposition=0&alloworigin=1

[14] Bristell NG 5 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://cdn1.share.slickpic.com/u/IgorKolokolov/_142015/org/GN5Q3714/web.jpg

[15] BRISTELL NG 5 LSA [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.brmaero.com/letadla-classic

[16] DYN - 240 -PP Predný podvozok PP. 2011.

[17] Technical desctription Operating, Maintenance and Repair Manual for Ultralight Aeroplane WT9 Dynamic [online]. 2005 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://lk.fulhack.info/tmp/wt9-manuals/Maintenance%20Manual/MM%20DYNAMIC%20WT%209%2005%20Sweden%20i.pdf

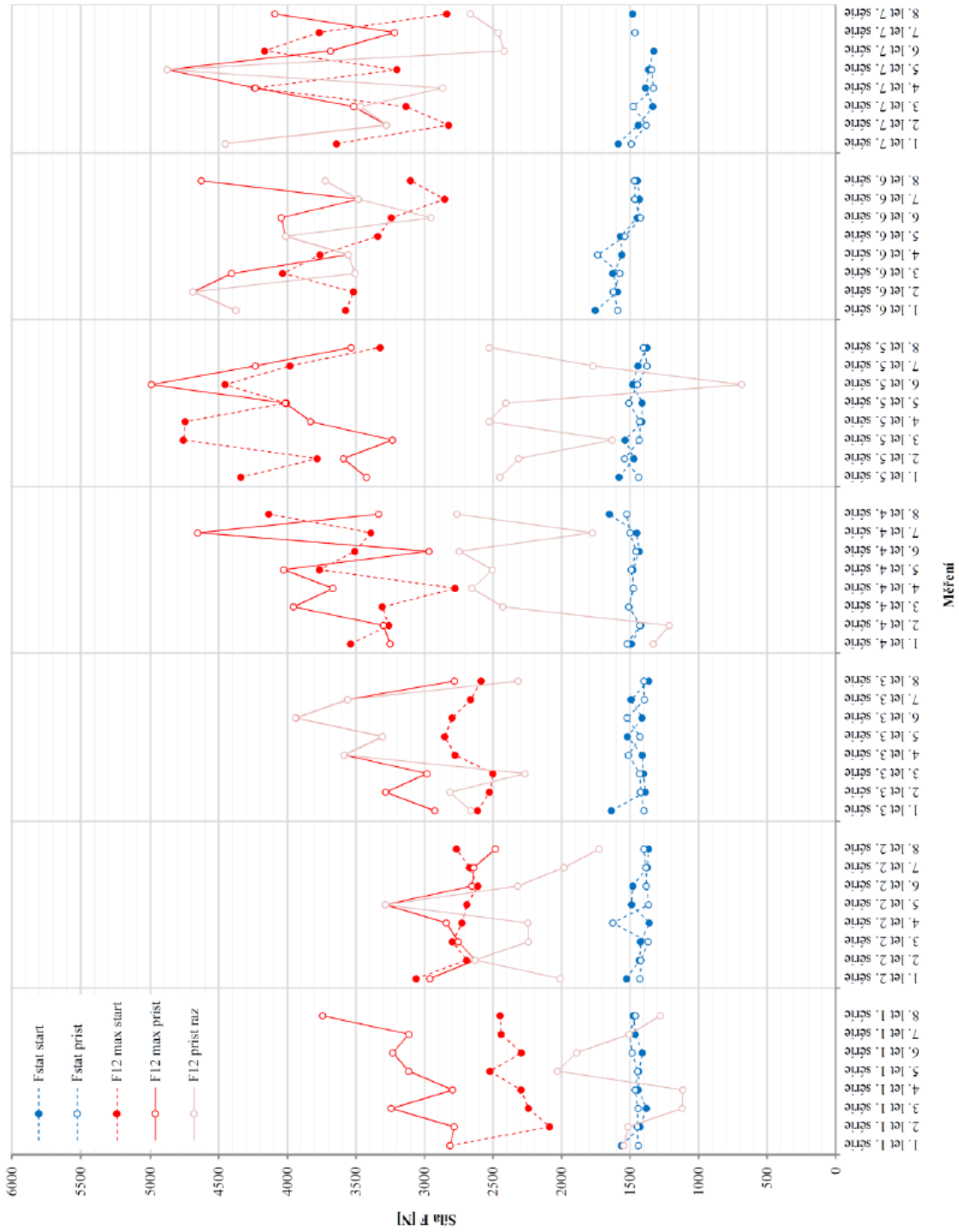
[18] WT9 [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.aeroweb.cz/Obrazky/Image/WT-9-2.jpg

[19] PS -28 Cruiser / SportCruiser Maintenance Manual [online]. 16. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.czechsportaircraft.com/useruploads/files/CR-MM-1-0-00_R16.pdf

[20] PS -28 Cruiser / SportCruiser Aircraft Assembly Manual [online]. 2011 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.czechsportaircraft.com/useruploads/files/CR-MM-1-0-00_R16.pdf

[21] CHREN, Bc. Tibor. Návrh podvozku pro letoun Rapid 600 [online]. 2010 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29036. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.

12 Prílohy



***Obr. 19**, Statické zatížení podvozku F_{stat} a maximální dosažené hodnoty výsledné síly F_{12}*