



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH ZATAHOVACÍHO PODVOZKU PRO LETOUN NG4

THE DESIGN OF RETRACTABLE LANDING GEAR FOR NG4 AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAROSLAV BARTONĚK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. VLADIMÍR MATĚJÁK

BRNO 2011

Abstrakt:

Diplomová práce popisuje návrh způsobu zatahování podvozku pro ultralehký letoun NG-4. Jejími hlavními částmi jsou popis všeobecného principu zatahování, návrh kinematiky, výpočet zatížení a pevnostní kontrola, volba potřebných materiálů a způsob ovládání podvozku pilotem. Okrajovou náplní práce je členění letadlových podvozků a jejich historický vývoj.

Klíčová slova:

zatahovací podvozek, ultralehký letoun, NG-4, vysouvání, zasouvání, pevnostní výpočet podvozku

Abstract:

This diploma thesis describes the design of retractable landing gear for the NG-4 ultralight aircraft. Its main part consists of general principle of gear retraction, kinematics analysis, load calculation and structural analysis, material selection and means of controlling by pilot. The thesis contents marginally the typology of aircraft landing gears and their evolution.

Keywords:

retractable landing gear, ultralight aircraft, NG-4, lowering, retracting, structural analysis of the landing gear

Bibliografická citace:

BARTONĚK, J. *Návrh zatahovacího podvozku pro letoun NG4*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Matěják.

Čestné prohlášení:

Čestně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci sepsal samostatně pod vedením Ing. Vladimíra Matějáka, a to za použití výlučně níže uvedených zdrojů.

V Brně dne 23.5.2011

Bc. Jaroslav Bartoněk

Poděkování:

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří se zasloužili o úspěšný vznik této diplomové práce. Na prvním místě Ing. Vladimíru Matějákoví za veškerou pomoc a konzultace v průběhu jejího vzniku. Velký dík dále patří panu Ing. Jaroslavu Bílkovi z firmy Roko Aero, a.s., za poskytnutí 3D CAD modelu letounu NG-4, za zpřístupnění potřebných informací a umožnění prohlídky zmíněného letounu v různých fázích jeho stavby. Dále děkuji Ing. Ladislavu Chybíkovi za poskytnutí počítačového vybavení společnosti Evektor s.r.o., nutného pro výpočty metodou konečných prvků. Závěrem chci poděkovat své rodině a přátelům za jejich velkou trpělivost s mými leteckými zálibami.

Obsah

1. Úvod	2
2. Vývoj a koncepce podvozku	3
2.1. Historický vývoj	3
2.2. Základní typologie podvozku	4
2.3. Výhody a nevýhody použití zatahovatelného podvozku	8
3. Návrh podvozku pro letoun NG-4	9
3.1. Letoun NG-4	9
3.2. Koncepce zasunutí a vysunutí podvozku	11
3.3. Výběr způsobu zatahování podvozku pro letoun NG-4	13
3.4. Konstrukce zatahovacího mechanismu	14
4. Zatížení podvozku	18
4.1. Podklady pro výpočet	18
4.2. Pozemní zatížení a předpoklady (CS-VLA 473)	19
4.3. Zatížení podvozku při stání na zemi	20
4.4. Zatížení podvozku při vodorovném přistání (CS-VLA 479)	21
4.5. Zatížení podvozku při přistání s příďovým kolem těsně nad zemí (CS-VLA 479)	23
4.6. Zatížení podvozku při přistání s velkým úhlem náběhu (CS-VLA 481)	24
4.7. Zatížení podvozku při přistání na jedno kolo (CS-VLA 483)	25
4.8. Boční zatížení podvozku (CS-VLA 485)	26
4.9. Zatížení podvozku během brzdění (CS-VLA 493)	27
4.10. Dodatečné zatížení příďového podvozku (CS-VLA 499)	29
4.11. Přehled zatížení podvozku	30
5. Pevnostní kontrola vybraných částí podvozku	31
5.1. Pevnostní výpočet příďového podvozku	31
5.1.1. Příďová podvozková noha	31
5.1.2. Zlamovací vzpěra	33
5.1.3. Čep zlamovací vzpěry	35
5.2. Pevnostní kontrola hlavního podvozku	36
5.2.1. Síly v jednotlivých členech podvozku	36
5.2.2. Kontrola hlavní podvozkové nohy	39
5.2.3. Kontrola osy otáčení podvozku	40
5.2.4. Kontrola ovládací vzpěry	41
5.2.5. Zámek hlavního podvozku	41
5.3. Zatížení podvozku při zasouvání	42
5.3.1. Zasouvání hlavního podvozku	42
5.3.2. Zasouvání příďového podvozku	43
5.3.3. Pohon systému zasouvání podvozku	43
6. Systém nouzového vysunutí podvozku	44
6.1. Konstrukční provedení	44
6.2. Pevnostní kontrola	44
6.2.1. Kontrola ovládací hřídele	45
6.2.2. Kontrola výstupní hřídele hlavní převodovky	45
6.2.3. Kontrola ovládací hřídele příďového podvozku	46
6.2.4. Kontrola posuvových šroubů hlavního podvozku	46

7. Změny v konstrukci letounu NG-4.....	47
7.1. Konstrukční změny centroplánu	47
7.2. Konstrukční změny přídě letounu	48
7.3. Pilotní kabina	48
7.4. Postupy vysouvání a zasouvání podvozku	49
7.4.1. Zasouvání podvozku po startu.....	49
7.4.2. Vysouvání podvozku před přistáním	50
7.4.3. Nouzová situace – porucha hlavního zdroje elektrické energie za letu	50
7.4.4. Nouzová situace – neúplné vysunutí či zasunutí podvozku.....	50
7.4.5. Nouzová situace – vypadnutí jističe elektromotoru.....	50
7.5. Změny hmotových parametrů	51
8. Závěr	52
Seznam zdrojů	54
Odborná literatura	54
Internet	54
Seznam obrázků	55
Seznam použitých zkratk	58
Seznam použitých matematických symbolů	59
Seznam příloh	60
Příloha 1: Kontrola vybraných částí podvozku metodou konečných prvků	61
Příd'ová podvozková noha.....	61
Zlamovací vzpěra – část A.....	62
Zlamovací vzpěra – část B	63
Hlavní podvozková noha, osa otáčení a tlumič	64
Příloha 2: Výkres letounu NG-4 ve verzi se zatahovacím podvozkem a ve verzi s pevným podvozkem	
Příloha 3: Výkres letounu NG-4 se zataženým podvozkem	

1. Úvod

Letecká názvoslovná norma ČSN 31 0001 definuje pojem *Přistávací zařízení* jako *část letadla umožňující vzlet, přistání, popř. pojiždění*. Podvozek je v této normě definován jako *základní konstrukční skupina přistávacího zařízení*. [4]

Kromě zabezpečení vzletu a přistání plní podvozek i další funkce. Použití podvozku s koly značně zjednodušuje manipulaci s letadlem na zemi (proto jsou mnohé současné vrtulníky s lyžovým podvozkem vybaveny závěsy pro malá kola), velká letadla používají podvozek jako cestu pro vybití elektrostatického náboje nahromaděného na povrchu letadla během letu.

Podvozek současných malých letadel kategorie UL či VLA je většinou jednoduchý, tříbodový, s příďovým kolem. Všechny podvozkové nohy bývají vybaveny nějakým typem tlumiče přistávacího rázu, většinou jen hlavní podvozek má brzdy. Příďové kolo je zpravidla řiditelné, ale existují i letouny (např. český SportCruiser), které mají příďové kolo pouze vlečené a na zemi jsou řízeny diferencovaným použitím brzd hlavního podvozku. Je-li použit pevný podvozek, pak bývá obvykle kapotován pro zlepšení obtékání a snížení aerodynamického odporu. Mnohé moderní typy jsou však už od počátku navrhovány se zatahovacím podvozkem. Zasouvání a vysouvání zabezpečuje vhodný elektromotor či hydromotor se záložním ručním systémem pro vysunutí podvozku v případě nouze (selhání elektrické soustavy letadla apod.). V každém případě jsou tyto podvozky navrhovány pro náročný, nešetrný provoz, neboť letouny zmíněných kategorií bývají často provozovány na nepevných dráhách (různá aeroklubová letiště, jejichž VPD tvoří často jen pás posekané trávy) a také je nutné počítat s nouzovým přistáním do nevhodného terénu. V takovém případě může robustní konstrukce podvozku rozhodovat o přežití celé posádky.

2. Vývoj a koncepce podvozku

2.1. Historický vývoj

První skutečné přistávací zařízení na letadlech se objevuje v době, kdy byl vyřešen problém pohonu letounu spalovacím motorem (r. 1903) a rychlost odpoutání a dosednutí vzrostla nad fyzické možnosti lidského běhu (což byl častý způsob používaný na větroních tehdejší doby). Bratři Wrightové použili na svém Flyeru lyže a start z kolejnic pomocí katapultu. Tento způsob byl však nepraktický a v Evropě se brzy začal používat jednoduchý a spolehlivý tříbodový podvozek, často s příďovým kolem. Během 1. světové války se kvůli vpředu umístěné tažné vrtuli poměrně velkého průměru ustálila koncepce dvoukolového hlavního podvozku a jednoduché ostruhy pod ocasní částí letadla, která kolem obvykle vybavena nebyla. Tlumení přistávacího rázu bylo zabezpečeno pomocí gumového lana omotaného kolem osy hlavního podvozku a podvozkové nohy.

Ve 20. letech 20. století rychlost letadel stoupla natolik, že aerodynamický odpor podvozku začal hrát velkou roli. Objevují se první letouny se zatahovacími podvozky. Ostruhové kolo většinou nebylo zatažitelné, bylo však řiditelné a umožňovalo řízené poježdění po zemi. Tato koncepce se značně rozšířila a byla použita na převážné většině typů letounů i během 30. a 40. let 20. století.

Na konci 2. světové války se naplno projevil rychlý vývoj, kterým letectví prošlo. První letouny vybavené reaktivním pohonem (např. Me-262, Gloster Meteor aj.) ukázaly, že podvozek s ostruhovým kolem už nevyhovuje, neboť spaliny z motoru způsobují poškození VPD. Proto se začal opět používat podvozek s příďovým kolem, který značně usnadnil vzlet a hlavně přistání při stále se zvyšujících rychlostech. Během války také výrazně vzrostla maximální vzletová hmotnost letounů, především strategických bombardérů (B-36 apod.). Zde již klasický podvozek nestačil, protože na VPD přenášel příliš velké měrné zatížení a dráhy tak poškozoval už při poježdění (a tím více při přistání). Spolehlivé řešení tohoto problému přinesl vícekolový podvozek, který se rychle rozšířil na všechna těžší letadla. Zároveň se rozšířila koncepce odděleného vývoje, kdy podvozek je vyvíjen a vyráběn jinou společností než samotný letoun, podobně jako je tomu s motory. Nejznámější společností, která vyrábí podvozky pro západní letadla, je Goodrich.

Do dnešní doby k žádným výrazným změnám v koncepci podvozku nedošlo. Na některých letadlech, která neumožňovala jiné řešení, byl použit tandemový podvozek (B-52, Harrier). Všechna velká dopravní letadla jsou vybavena vícekolovým hlavním a dvoukolovým příďovým podvozkem. Podvozek s ostruhou lze nalézt na některých amatérských konstrukcích, ve značné míře se však objevuje na moderních letounech stavěných speciálně pro leteckou akrobacii.

Vývoj podvozků pro vrtulníky se ustálil na dvou provedeních – tříbodový s případnou vícekolovou montáží na každé podvozkové noze nebo podvozek lyžový. První jmenovaný se vyskytuje převážně u těžších typů, u kterých usnadňuje manipulaci na zemi a umožňuje rozjezd při vzletu a dojezd při přistání, což je výhodné při letu s nadměrnou zátěží a startu ve větší nadmořské výšce nebo za vyšší teploty. Tento typ podvozku lze nalézt na většině vrtulníků východní provenience (Mil, Kamov atd.). Naopak lyžový podvozek je často použit u menších a středních vrtulníků určených např. pro záchrannou službu apod. Jeho výhodou je poměrně nízký aerodynamický odpor, snadná montáž, nízká hmotnost a odolnost vůči pozemní rezonanci, což přispívá k větší bezpečnosti provozu.

2.2. Základní typologie podvozku

Podvozky letounů lze členit podle mnoha hledisek a kritérií:

1. **Podle relativní polohy vůči letounu** – pevný / zatahovatelný / odhoditelný
Důkladnější analýza vlastností pevného a zatahovatelného podvozku je rozebrána v následující kapitole.
2. **Podle předpokládaného povrchu dosednutí** – kolový / plovákový / lyžový

Jednoznačně nejrozšířenější je podvozek kolový, který umožňuje operovat z pevné země.

Plovákový podvozek umožňuje vzlétat z vodní hladiny. Často bývá vybaven výklopnými koly, která pak dovolují vyvlečení letounu z vody (např. za účelem údržby, hangárování apod.) a někdy i vzlet a přistání na pevné zemi. Mnohá letadla určená pro námořní operace během meziválečného období i během 2. světové války neměla plováky, nýbrž speciálně tvarovanou spodní část trupu pro přistání na mořské hladině a často byla vybavena i malým vodním kormidlem. Lyžový podvozek bývá použit jen výjimečně u konkrétních strojů, u nichž se počítá s provozem na zasněžených plochách. Často bývá kombinován s kolovým podvozkem.



Obr. 2.1: Piper PA-18AS – příklad letounu s plovákovým podvozkem



Obr. 2.2: Short Sunderland – příklad letounu s trupem tvarovaným pro přistání na vodní hladině



Obr. 2.3: Bell 206 – příklad vrtulníku s lyžovým podvozkem



Obr. 2.4: DHC-2 Beaver – letoun upravený pro operace ze zasněžených ploch

3. Podle konstrukčního uspořádání – s příďovým kolem / s ostruhou / tandemový

Podvozek s příďovým kolem je dnes mnohem rozšířenější. K bezpečnosti provozu přispívá zejména proto, že umožňuje výrazně lepší výhled z kabiny při pojíždění a při rychlém brzdění nehrozí převrácení letounu dopředu na vrtuli. Podvozek s ostruhovým kolem má výhody především v poněkud nižší hmotnosti, protože ostruhové kolo se zpravidla nachází daleko za těžištěm a tudíž bývá méně zatíženo a dimenzováno. Ve srovnání s příďovým kolem pak ostruha představuje menší zdroj aerodynamického odporu a méně snižuje účinnost vrtule. Tandemový podvozek se používá především na bezmotorových letadlech, která mívají jedno kolo pod trupem blízko těžiště, druhé pod ocasní částí a dále kolo na konci každé poloviny křídla. Toto uspořádání snižuje hmotnost a aerodynamický odpor a chrání tenké ohebné křídlo před kontaktem se zemí. Ze stejných důvodů se tento podvozek uplatnil i na některých typech bombardérů (B-47, B-52) a letounech Harrier, které mají po stranách trupu výstupní trysky motoru, což by klasický podvozek ohrožovalo.



Obr. 2.5: KP-2U Sova – příklad letounu s podvozkem s příďovým kolem



Obr. 2.6: SU-26 – příklad letounu s podvozkem s ostruhovým kolem



Obr. 2.7: L-13SW Vivat – příklad letounu s tandemovým podvozkem s ostruhou



Obr. 2.8: Harrier – příklad letounu s tandemovým podvozkem s příďovým kolem

4. Podle počtu kol na podvozkové noze – jednokolové / vícekolové / pásové

Jednokolový podvozek je konstrukčně výrazně jednodušší a lehčí. Jeho zatahovatelná verze má mnohem menší nároky na úložné prostory a rovněž zatahovací mechanismus může být relativně jednoduchý. Nevýhodou je schopnost snášet jen omezená zatížení, náchylnost ke vzniku bočních kmitů (shimmy), a pokud za letu či spíše při startu selže jediná pneumatika na podvozkové noze, bývá další přistání velmi riskantní.

Vícekolový podvozek se používá téměř u všech letounů kategorie CS-25/FAR-25. Jeho výhodou je schopnost přenášet vysoká měrná zatížení, což je u těžkých dopravních a transportních letounů nezbytné. Při prasknutí jedné pneumatiky ostatní přebírají její funkci, čímž se zvyšuje bezpečnost provozu. Je-li použit jako dvoukolový na příďové podvozkové noze, pak výrazně snižuje riziko vzniku bočních kmitů. Problematická je především konstrukční stránka – podvozek vyžaduje mnoho místa v úložných prostorech v křídle či centroplánu a musí být vybaven čepy, které umožňují natačení jednotlivých částí podvozku vůči sobě. Tímto způsobem se zabraňuje zbytečnému opotřebení pneumatik.

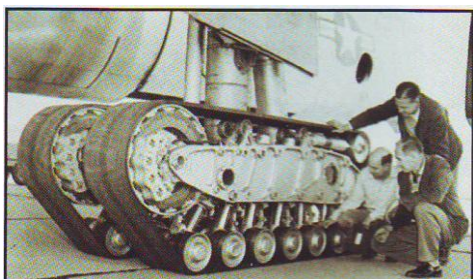
Ve snaze o co nejúčinnější snížení měrného zatížení se vyskytly i experimenty s pásovými podvozky. Výhodou bylo velmi účinné snížení opotřebení vzletových drah v případě těžkých letounů. Takto vybavené stroje se nebořily do měkkého podloží na nepevných VPD. Avšak pro velkou složitost, hmotnost, nespolehlivost a hlavně velmi nízkou životnost některých dílů se tento typ podvozků nikdy nedostal ze stadia experimentů.



Obr. 2.9: *Jednokolový podvozek*
(zde podvozek z VUT-100 Cobra)



Obr. 2.10: *Vícekolový podvozek*
(zde podvozek z Boeingu 777)



Obr. 2.11: *Experimentální pásový podvozek*
(zde podvozek z B-36)

5. Podle konstrukce – pružinový / teleskopické / pákové / kombinované

Pružinový podvozek nemá speciální tlumič. Tlumení přistávacího rázu zajišťují pneumatiky a pružnost vhodně konstruované podvozkové nohy. Výhodou je jednodušší konstrukce takového podvozku a tím i jeho nižší hmotnost. Problémem je únavová životnost podvozkové nohy a obtížné odhalování trhlin, které v ní vznikají. U teleskopického podvozku je osa kola pevně spojena s pístnicí tlumiče a koná s ním posuvný pohyb. [4] Jde o běžně používaný typ podvozku, který však vyžaduje podvozkové nůžky, aby se zabránilo samovolnému otáčení osy kola. Jeho výhodou je nízký aerodynamický odpor, malé nároky na úložný prostor při zasunutí a možnost použití na letounech startujících z nepevných drah (zemědělské letouny apod.). Nevýhodou je potřeba dlouhé osy podvozku kvůli zajištění správné tuhosti tlumiče. Pákový podvozek je podvozek, u něhož je osa kola spojena pákou s tlumičem. [4]. Tento podvozek nůžky nepotřebuje. Vykazuje menší zdvih než předchozí typ. Na jedné straně uchycení tlumiče se musí nacházet Kardanův závěs, aby bylo zajištěno staticky určité uložení. Pákový podvozek se často objevuje na menších dopravních letounech a vojenských strojích. Kombinovaný podvozek slučuje výhody předchozích typů do jednoho. Podvozkové nůžky nevyžaduje. I tento typ je mnohdy použit na vojenských letounech.



Obr. 2.12: Pružinový podvozek
(zde podvozek z Z-50L)



Obr. 2.13: Teleskopický podvozek
(zde podvozek z L-200 Morava)



Obr. 2.14: Pákový podvozek
(zde podvozek z Su-24)



Obr. 2.15: Kombinovaný podvozek
(zde podvozek z A-7 Corsair II)

2.3. Výhody a nevýhody použití zatahovatelného podvozku

U letounů kategorie CS-25 ($m_{TOW} > 5670 \text{ kg} / 12500 \text{ lb}$) se lze setkat výhradně se zatahovacími podvozky. U letounů kategorie CS-23 v podkategorii *Commuter* se rovněž vyskytují pouze letouny se zatahovatelným podvozkem. V podkategorii *Aerobatic* naopak převažují letouny s pevným podvozkem. V podkategoriích *Normal* a *Utility* lze běžně nalézt letouny s oběma typy podvozku. Podobná je i situace v kategorii UL ($m_{TOW} < 450 \text{ kg}$), nicméně mnoho typů navržených v poslední době je vybaveno zatahovatelným podvozkem, a to z důvodu nárůstu jejich letových výkonů, především maximální rychlosti.

Výhody zatahovatelného podvozku jsou především:

- nižší aerodynamický odpor (zejména v cestovním režimu letu)
- z něj plynoucí vyšší maximální rychlost letu, dostup a dolet
- nižší úroveň hluku daná sníženým třením o vzduch
- u vojenských letounů je výhodou výrazně nižší radarová odezva, což snižuje riziko odhalení radiolokátorem; v civilním provozu je to spíše (méně významná) nevýhoda

Nevýhody zatahovatelného podvozku jsou pak následující:

- vyšší hmotnost letounu z důvodu instalace mechanismu vysunování podvozku a jeho pohonu
- vyšší nároky a náklady na údržbu a technický personál
- nutnost adaptace na přistání se zasunutým podvozkem
- u větších letounů nutnost nácviku řešení nouzových situací spojených s podvozkem (přistání s nevysunutým či nezajištěným podvozkem, selhání mechanismu zavírání při vzletu apod.)
- nutnost instalace záložního systému vysunování podvozku

Pevný podvozek je tedy výhodný tehdy, pokud má letoun dosahovat pouze nízkých rychlostí a kdy je nárůst spotřeby paliva vlivem vyššího odporu vzduchu zanedbatelný. Tyto podmínky bývají splněny zejména u letounů pro sportovní létání, kde vystoupí do popředí jejich vyšší spolehlivost, nenáročnost údržby a nižší pořizovací cena.

Pokusy prováděné americkou organizací NACA ve 30. letech 20. století s letounem Lockheed Altair prokázaly, že míra redukce aerodynamického odporu silně závisí na úhlu náběhu letounu. V cestovní konfiguraci (při úhlu náběhu 0° a při rychlosti kolem 110 km/h) letoun vykázal snížení odporu přibližně o 40%. Na úhlu náběhu 4° už bylo snížení jen 25% a při dalším růstu úhlu náběhu se silně projevoval indukovaný odpor (od 10° výše už zatažení podvozku nemělo na odpor téměř žádný vliv). [7] Tyto hodnoty lze považovat za orientační posouzení vlivu podvozku na ultralehký letoun, protože Lockheed Altair se svou koncepcí dnešním letounům této kategorie částečně podobá a i jejich letová rychlost zhruba odpovídá podmínkám měření.

3. Návrh podvozku pro letoun NG-4

3.1. Letoun NG-4

Letoun NG-4 je nejnovějším produktem společnosti Roko Aero, a.s. sídlící v Uherském Brodě. Je určen pro sportovní létání, letecký výcvik a vlečení bezmotorových letadel. První verze LSA byla zalétána v březnu roku 2008.

Trup letounu je celokovový. Před kabinou posádky se nachází prostor pro uložení motoru a protipožární přepážka s uchycením příďové podvozkové nohy. Kabina je navržena pro dvě osoby a má proto dvojitý řízení. Kryt kabiny je odklopný směrem vpřed. Za kabinou je prostor pro uložení zavazadel. Volitelně je možné do trupu umístit záchranný padákový systém.

Křídlo je dolnoplošné, obdélníkového půdorysu. Je opatřeno kladným vzepětím o velikosti 5° a geometrickým zkroucením 2° . Na kořenu křídla je použit profil MS 316, který postupně přechází do koncového profilu MS 313. Konce křídla jsou vybaveny kompozitovými winglety. Zbytek křídla je celokovový s jednonosníkovým s pomocným nosníkem. Na odtokové hraně se nachází elektricky ovládané vztlačkové klapky a křídélka. Levé křídélko obsahuje ještě vyvažovací plošku. V křídle mezi žebry 4 a 6 se nachází palivová nádrž.

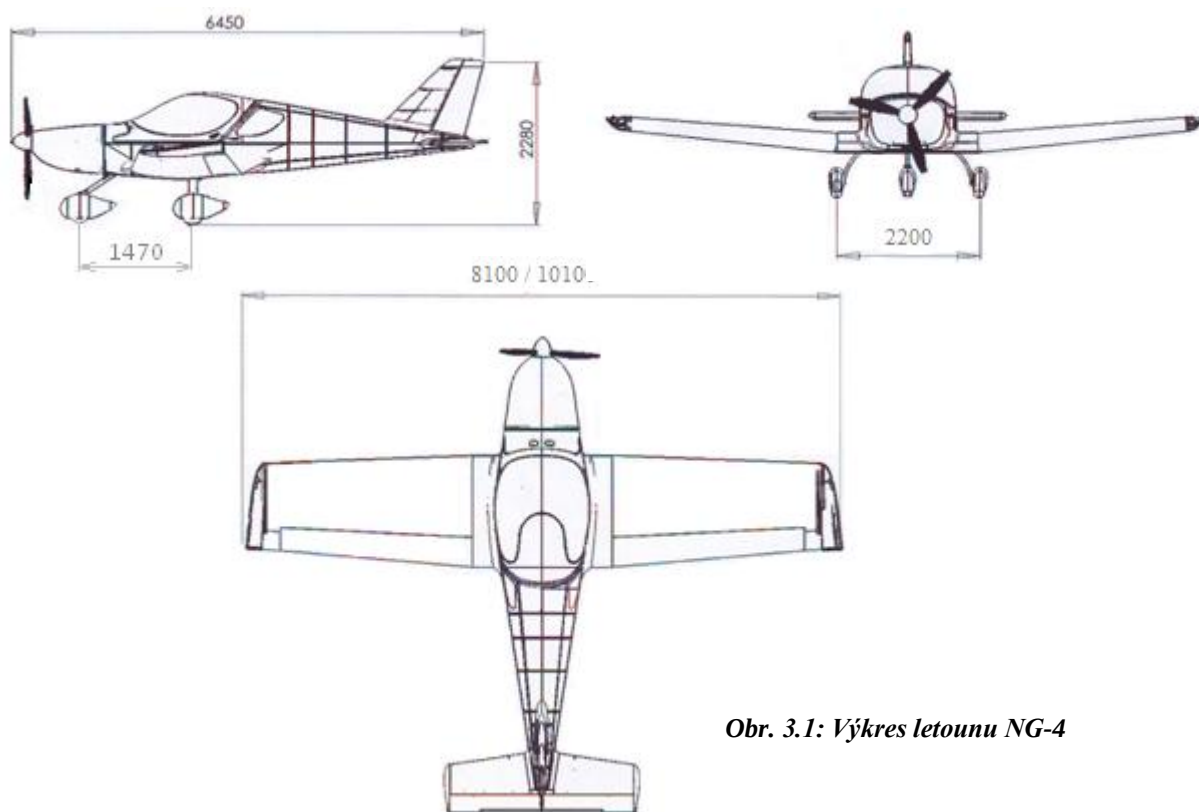
Vodorovná ocasní plocha je rozdělena na kompozitový stabilizátor a kovové výškové kormidlo s vyvažovací ploškou. Koncové oblouky VOP jsou kompozitové. Řízení výškového kormidla je řešeno pomocí táhel. Svislá ocasní plocha sestává z kovové kýlové plochy a kompozitového směrového kormidla, které je ovládáno pomocí lanek.

Pohonnou jednotku v základní výbavě představuje motor Rotax 912 ULS, který pohání třílistou vrtuli WOODCOMP Classic. Volitelně je možné montovat i motory Rotax 912 UL, Jabiru 3300, Continental a Lycoming.

Letoun je v současnosti nabízen ve dvou verzích: LSA a UL. Liší se především maximální vzletovou hmotností a některými konstrukčními úpravami.

		Verze letounu NG-4	
		LSA	UL
Rozměry			
Rozpětí	[m]	10,1	8,1
Délka	[m]	6,45	6,45
Výška	[m]	2,28	2,28
Plocha křídla	[m ²]	13	10
Hmotnosti			
Prázdná hmotnost	[kg]	330	280
Maximální vzletová hmotnost	[kg]	600	450
Užitečné zatížení	[kg]	270	200
Objem paliva	[l]	130	90
Plošné zatížení	[kg/m ²]	46,15	48
Výkony			
Pádová rychlost (EAS)	[km/h]	67	60
Cestovní rychlost (EAS)	[km/h]	240	214
Nepřekročitelná rychlost (EAS)	[km/h]	270	270
Délka vzletu	[m]	245	245
Délka přistání	[m]	278	278
Dostup	[m]	3500	3500
Dolet	[km]	1192	1192

Tab. 3.1: Základní technické údaje letounu NG-4



Obr. 3.1: Výkres letounu NG-4



Obr. 3.2: Letoun NG-4 LSA



Obr. 3.3: Letoun NG-4 UL

3.2. Koncepce zasunutí a vysunutí podvozku

Výběr nejlepšího způsobu zatahování je důležitý pro všechny další vlastnosti podvozku. Nevhodně navržené zatahování celou konstrukci zkomplikuje, prodraží a způsobí zbytečně vysoký nárůst hmotnosti letounu.

Pro **příd'ový podvozek** letounu přichází v úvahu zatahování vpřed směrem k vrtuli nebo vzad. Z hlediska bezpečnosti je výhodnější zasouvání směrem vpřed, protože při poruše mechanismu vysouvání stačí podvozek odjistit. Příd'ová noha se pak vysune pouze vlivem vlastní váhy a s podporou nabíhajícího proudu vzduchu. Nevýhodou tohoto způsobu je fakt, že při vysunutí podvozku při přistání se těžiště letounu posune vzad, čímž dojde ke snížení statické zásoby, poklesu stability a sil v řízení. Problémy jsou i s prostorem uložení podvozkové nohy, neboť v příd'ové části letounu se obvykle nachází celá pohonná soustava letounu s veškerým vybavením – motor, reduktor, chladiče apod.

Hlavní podvozek bývá nejčastěji zatahován do dutin v křídle nebo v centroplánu pohybem směrem k ose nebo od osy letounu. Protože hlavní podvozek bývá výrazně hmotnější než příd'ový, může svým pohybem vpřed nebo vzad způsobovat výraznější pohyb těžiště letounu. Z tohoto důvodu se jen výjimečně používá jeho zatahování vpřed či vzad. Je vhodné podvozek umístit celý do křídla nebo centroplánu, neboť pokud zasahuje z křídla do centroplánu, pak musí existovat poměrně velké dutiny v oblasti kořene křídla a tedy v jeho nejvíce zatížené partii. Umístění podvozku v trupu zjednodušuje postup při sejmutí křídla ze závěsů, což může být důležité při údržbě. V křídle bývá naopak poměrně jednoduché vytvořit pro podvozek úložný prostor.

U malých letounů lze podvozek řešit jako **částečně** či **zcela zatažitelný**. Výhodou zcela zatažitelného podvozku je především dokonalejší aerodynamika letounu a tedy plné využití výhod, které toto uspořádání přináší. Nevýhodou zcela zatažitelného podvozku je nutnost zakrýt jej vhodně tvarovanými kryty, což přináší další nárůst hmotnosti letounu (k hmotnosti krytů je třeba zpravidla přičíst i hmotnost mechanismu jejich zavírání a otvírání). Špatně navržené kryty podvozku navíc mohou být tak výrazným zdrojem aerodynamického odporu, že prakticky znehodnotí všechny výhody zatíženého podvozku. Pokud je podvozek zatažitelný jen částečně, může při nouzovém přistání nebo při poruše systému vysouvání ztlumit náraz při kontaktu se zemí a tím redukovat škody na samotném letounu. Výhodou jsou i menší nároky na úložné prostory.

Letouny konkurující typu NG-4 řeší zatahování podvozku různými způsoby, obvykle však mají jeden společný rys: jsou nabízeny ve verzích s pevným i zatažitelným podvozkem, aby vyhověly nárokům co nejširšího spektra zákazníků. Za blízké konkurenty lze považovat následující typy:

1. **VL-3 Sprint**

Celokompozitový letoun vyráběný českou firmou Aveko Aircraft, a.s.

2. **WT-9 Dynamic**

Celokompozitový letoun vyráběný slovenskou společností Aerospool, s r. o.

3. **TL-2000 Sting**

Celokompozitový letoun vyráběný českou firmou TL Ultralight, s r.o.

Letoun **VL-3 Sprint** patří k malé skupině letadel, která mají hlavní podvozek zatažitelný směrem vzad. Zatahování je řízeno hydraulickým válcem. Hlavní podvozek se sklápí do šachet v zavazadlovém prostoru, příďový podvozek také vzad. Všechny podvozkové šachty jsou po zatažení podvozku zakrytovány. V případě selhání hydraulického agregátu je možné vysunout podvozek pomocí ruční hydraulické pumpy.



*Obr. 3.4,3.5: Letoun VL-3 Sprint s vysunutým
a zasunutým podvozkem*

WT-9 Dynamic má zavírání podvozku řešeno obvyklejším způsobem. Hlavní podvozek se sklápí směrem k ose letounu. V zataženém stavu je každá podvozková noha chráněna krytem, samotné kolo podvozku však zcela zakryto není. Příďový podvozek se sklápí vzad a rovněž není chráněn krytem. Ovládání podvozku je hydraulické.



*Obr. 3.6: Letoun WT-9 Dynamic se zatahovacím
podvozkem*

Obr. 3.7: Letoun WT-9 Dynamic s pevným podvozkem

TL-2000 Sting používá k ovládání podvozku dva elektromotory i s nouzovým systémem vysouvání pro případ poruchy zdroje elektrické energie. Hlavní podvozek se zatahuje do dutin v křídle, tedy směrem od osy letounu. V zasunuté poloze kola hlavního podvozku částečně vyčnívají z šachet. Příďový podvozek se zatahuje vzad a v zavřené poloze je plně zakrytován.



*Obr. 3.8: Letoun TL-2000 Sting se zatahovacím
podvozkem*

Obr. 3.9: Letoun TL-2000 Sting s pevným podvozkem

3.3. Výběr způsobu zatahování podvozku pro letoun NG-4

Definitivní výběr koncepce zatahovacího podvozku pro letoun NG-4 vychází částečně z analýzy konkurenčních typů, ale hlavním hlediskem jsou konstrukční možnosti, které poskytuje současná konstrukce letounu, a také technologické možnosti výrobce.

Volba způsobu zatahování **příďového podvozku** je poměrně jednoduchá. Tento podvozek nelze sklopit ze současného umístění vpřed, protože v příďové části není žádné místo pro jeho uložení. Jedinou možností by bylo přesunout tuto podvozkovou nohu dozadu. To by si však vyžádalo velké konstrukční změny a došlo by i ke zvýšení jejího zatížení.

Z těchto důvodů se jako nejvhodnější jeví zatahování podvozku směrem vzad. Protože ani zde není dost místa pro úplně zatažení podvozkového kola, bude se podvozková noha v průběhu zatahování otáčet o 90° kolem své svislé osy a po zatažení bude mírně přesahovat obrys letounu. Příďový podvozek nebude chráněn žádným krytem. Tato varianta bude rozpracována dále.

Výběr zatahování hlavního podvozku je komplikovanější. Pokud bude zachována jeho současná poloha, bude jakékoliv zatahování problematické. Jako mnohem výhodnější se jeví přesun do polohy vhodné pro některý z následujících možností:

1. Zatahování podvozku do křídla

V křídle mezi 5. a 6. žebrem se nachází zavazadlový prostor. V současném stavu je příliš malý pro uložení smysluplného nákladu a způsobuje problémy provozního charakteru (zatékání dešťové vody,...). Bylo by logické využít toto místo jako podvozkovou šachtu. Hlavní zavazadlový prostor se nachází v kabině posádky, takže přepravní kapacita letounu se výrazně sníží. Nevýhodou je nutnost uchytit podvozek mezi nosníky křídla velmi blízko závěsů křídlo – trup, které pak budou značně namáhány přistávacím rázem.

2. Zatahování podvozku do centroplánu

Tento krok by znamenal přesun uchycení podvozkových noh dál od sebe a jejich zatahování pohybem směrem k ose letounu. Výhodou je, že pohyb nenaruší žádnou část nosného systému letounu a také křídlo může zůstat zcela beze změn. Nevýhodou je, že mezi nosníky není dost místa pro uložení podvozku, takže navazující části (zejména podlahu kabiny a umístění sedaček) by bylo zapotřebí rekonstruovat.

3. Zatahování podvozku vzad

Nejméně vhodná varianta. Při pohybu vzad by podvozek narušil pomocný nosník v centroplánu, takže toto místo by si vyžádalo výrazné zesílení. Podvozek by také zřejmě musel alespoň částečně zasahovat do hlavního zavazadlového prostoru a tím by zmenšil jeho objem.

Na základě těchto úvah se jako nejperspektivnější jeví varianta 2. Podvozek bude zatahován směrem k ose letounu. V zataženém stavu bude mírně přechýlen přes spodní část trupu. Pro snížení odporu je zde možné instalovat jednoduchý aerodynamický kryt.

3.4. Konstrukce zatahovacího mechanismu

Aby zatahovací podvozek splňoval svůj hlavní účel, tj. zvýšení letových výkonů při přijatelných nákladech na provoz, je nezbytné provést jednoduchý, ale účelný návrh jeho mechanismu zatahování. Spolehlivost tohoto mechanismu je klíčová pro bezpečný provoz.

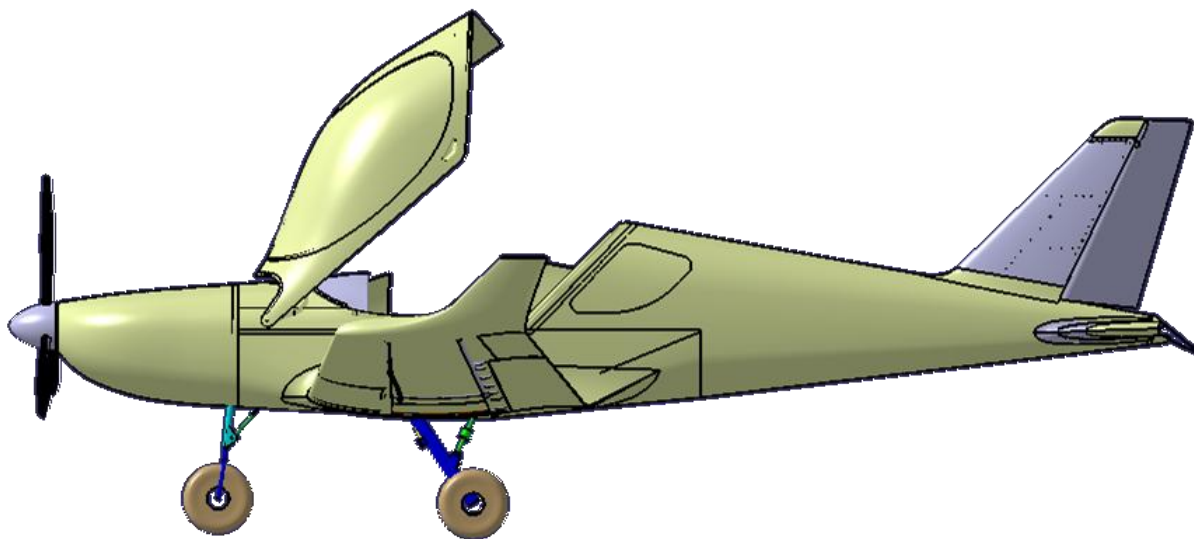
Pohon zatahovacího mechanismu bývá nejčastěji elektrický či hydraulický. V případě letounu NG-4 je vhodnější použít elektrický pohon. Ve srovnání s hydraulickým systémem je jednodušší, lehčí, snáze se udržuje a kontroluje a v neposlední řadě je i šetrnější k životnímu prostředí, protože nevyžaduje výměny a doplňování hydraulických kapalin (po ekologické stránce zpravidla nepřilíš přívětivých). Letecký předpis CS-VLA 729 a jeho ekvivalenty dále požadují záložní systém vysouvání pro případ selhání primárního pohonu. Ten je podrobně popsán v samostatné kapitole 6.1.

Hlavní **princip zatahovacího mechanismu** a podklad pro výpočet zatížení je následující: Krouticí moment elektromotoru je přenášen (přes hlavní reduktor snižující otáčky) do převodovky a odtud přes ozubená kuželová kola na tři posuvové šrouby (pro levý a pravý hlavní podvozek a pro příďový podvozek). Na každém z nich je nasazeno pouzdro s vnitřním závitem, které se při otáčení šroubu posouvá. K pouzdru je upevněno táhlo, které ovládá pohyb podvozkové nohy. Ta se pak otáčí kolem hřídele uchycené mezi hlavním a pomocným nosníkem centroplánu. Hřídel je uložena v ložiscích zasazených do nálitků na tělese pro zavěšení křídla. Přední těleso každého podvozku je vybaveno zámkem. Jedná se o ocelový hranol, který zapadne do drážky v nálitku a v hřídeli. Tyto drážky se postaví proti sobě vždy, když podvozek dosáhne zcela vysunuté či zcela zasunuté polohy. Hranol je možné ovládat elektromagneticky či v nouzi mechanicky pomocí teleflexu. Celý mechanismus a jeho detaily jsou znázorněny na obr. 3.11, 3.12 a 3.13.

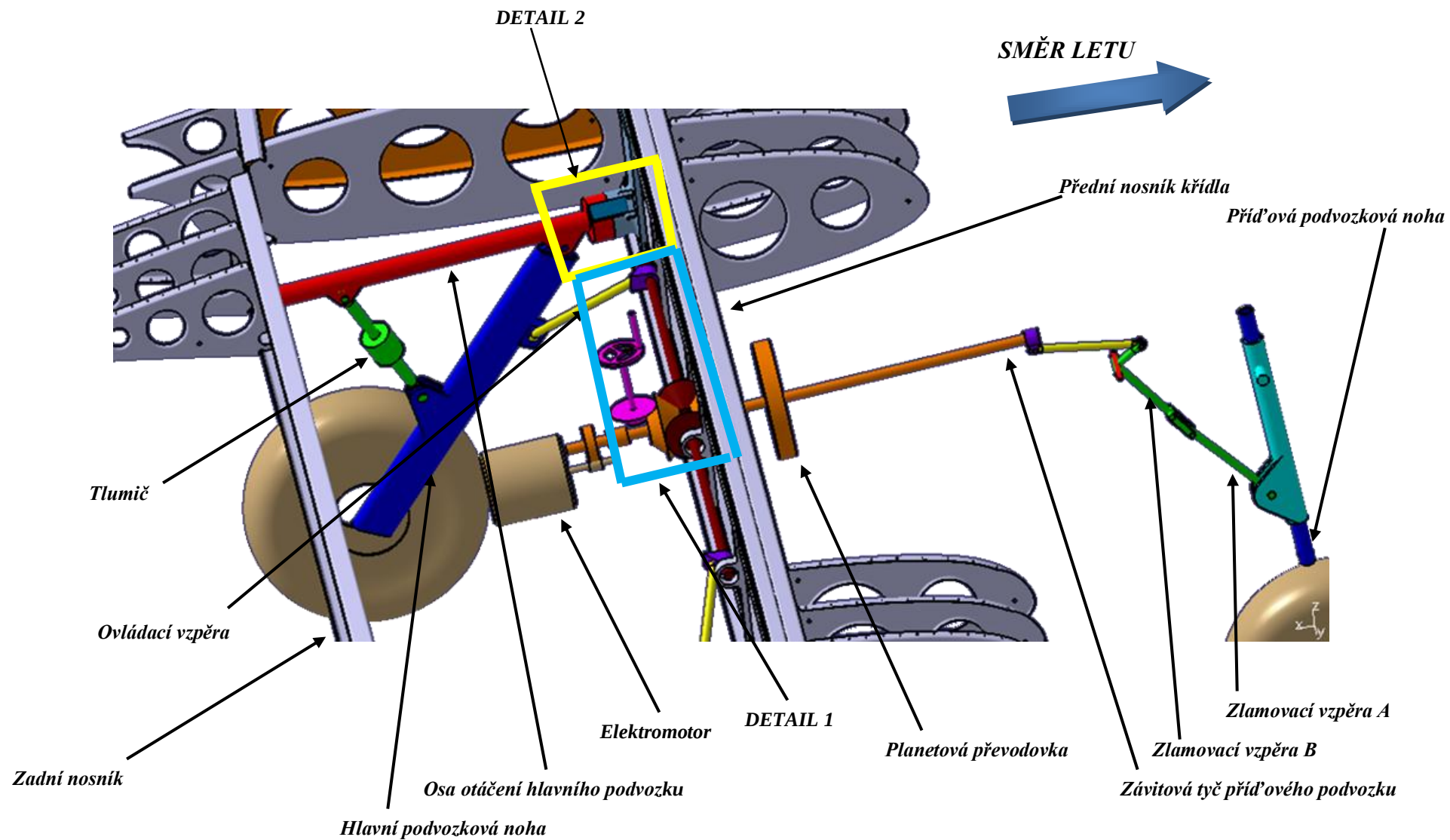
Příďový podvozek je v zasunuté poloze jištěn vlivem samosvornosti ovládacího závitu. Je – li vysunut, je jištěn pomocí klasické zlamovací vzpěry.

Signalizace polohy podvozku je vázána na polohu pouzder na posuvových šroubech. Jakmile se toto pouzdro posune do polohy, která odpovídá krajní poloze podvozku, sepne kontakt, čímž rozsvítí v pilotní kabině příslušné kontrolní světlo.

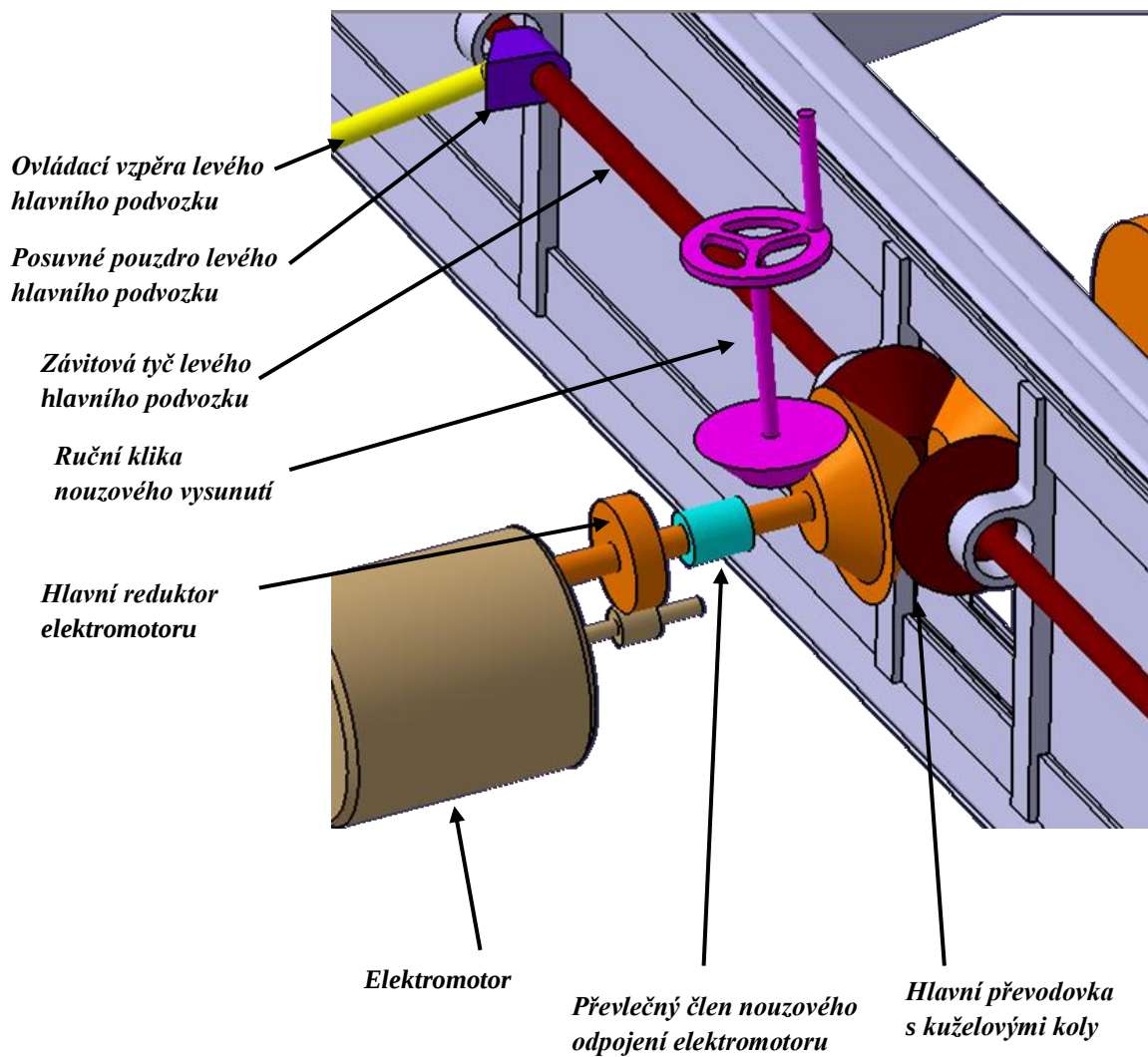
Díky použití jednotného pohonu a převodovky je vyloučeno riziko separátního vysunutí pouze jedné podvozkové nohy (což je případ, který zpravidla vede k nejzávažnějším havarijním situacím). Je také snadnější zabezpečit nouzové vysunutí podvozku.



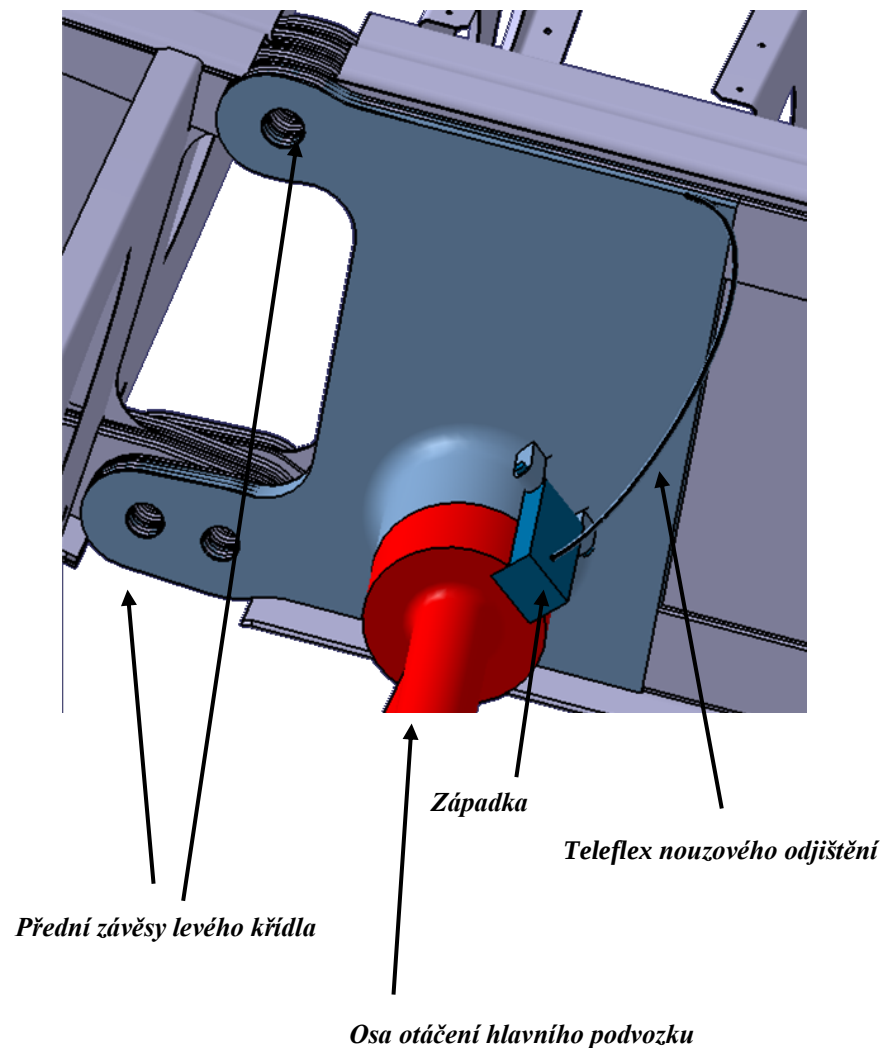
Obr. 3.10: Model letounu NG-4 se zatahovatelným podvozkem



Obr. 3.11: Celkové schéma zatahovacího mechanismu

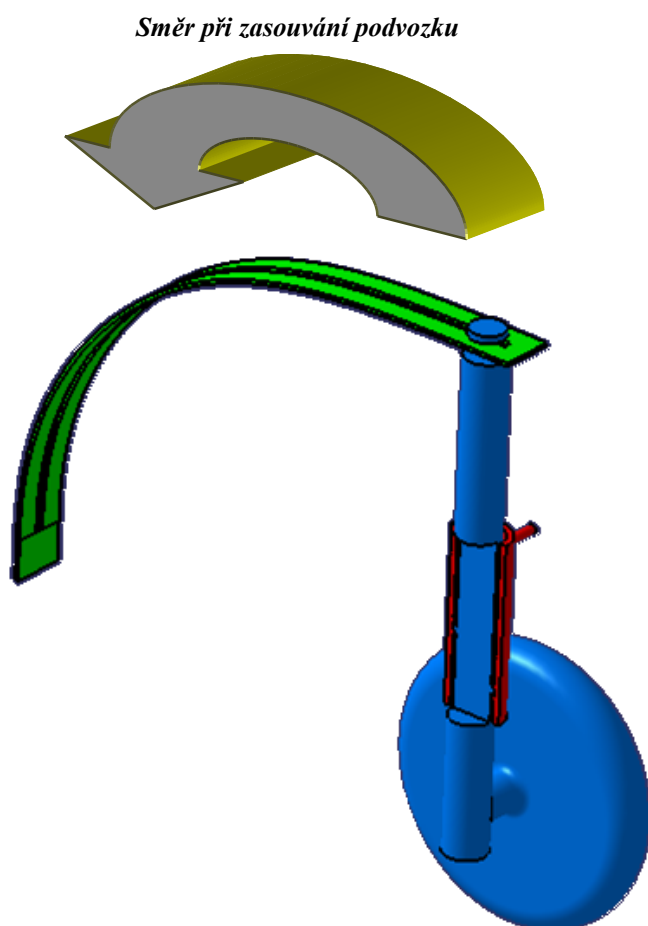


Obr. 3.12: Pohon mechanismu vysouvání

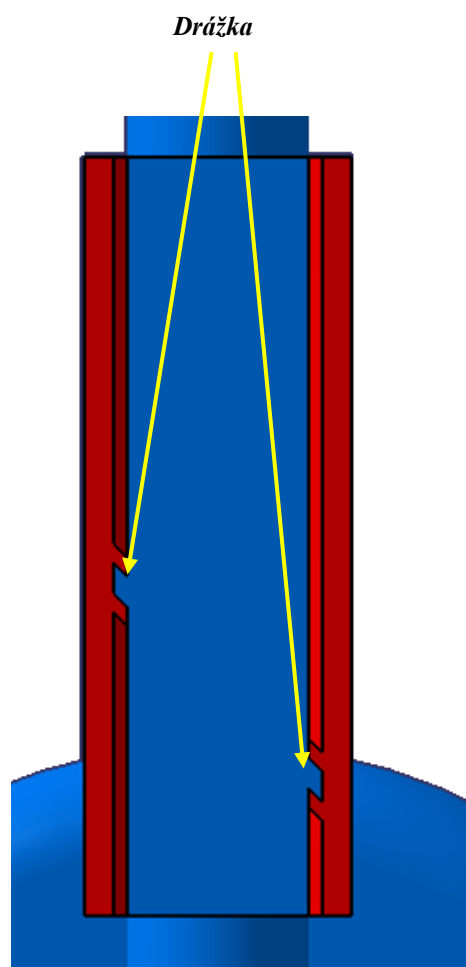


Obr. 3.13: Zámek hlavního podvozku

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.3, předový podvozek je nutné při zatahování otočit o 90° kolem jeho svislé osy. Pouze takto je možné jej dostatečně přiblížit k trupu. Mechanismus otočení pracuje díky kulise, která při zatahování předového podvozku posouvá předovou podvozkovou nohu směrem vpřed (při vysouvání pak směrem vzad). Tím se podvozková noha pohybuje vzhledem k válci tlumiče. Ve vnitřním povrchu válce je vytvořena drážka šroubového tvaru, v níž se pohybují čepy na podvozkové noze. Drážka pak nutí podvozkovou nohu k otočce. V krajních polohách jsou čepy zajištěny dosednutím na dorazy. Celý mechanismus je demonstrován na obr. 3.14 a 3.15.



Obr. 3.14: Kulisa pro otočení předového podvozku



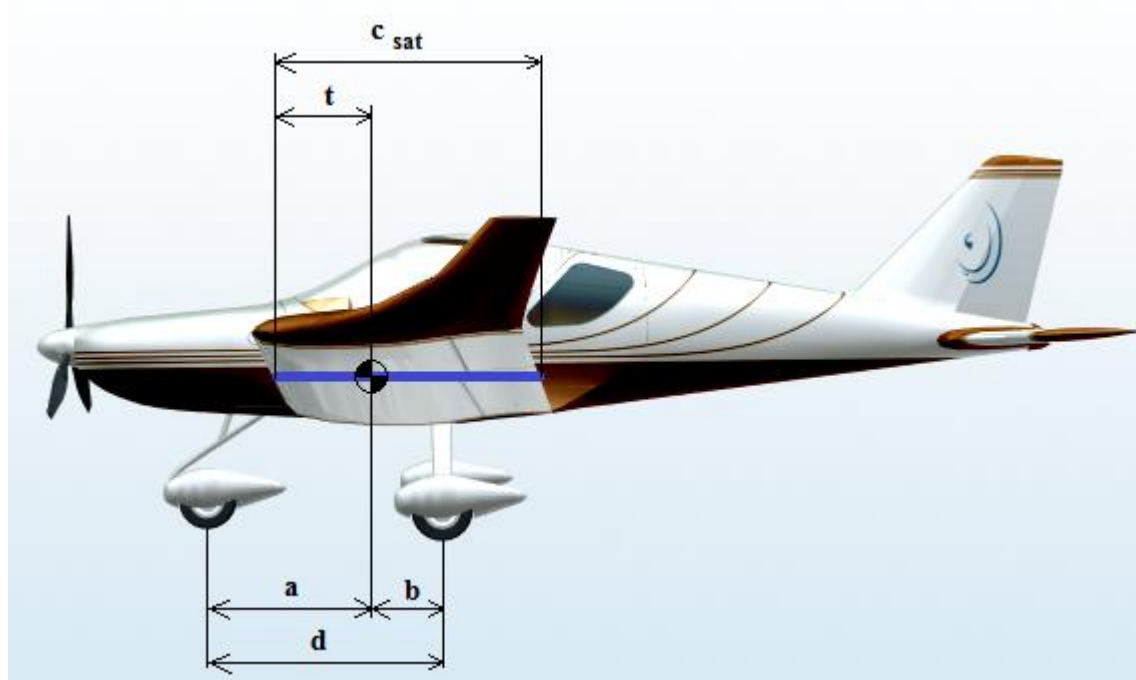
Obr. 3.15: Detail válce s drážkou

4. Zatížení podvozku

4.1. Podklady pro výpočet

Zatížení podvozku je vypočítáno podle předpisu CS-VLA. Ten je v dotčených bodech zcela totožný s předpisem LSA, který je základním stavebním předpisem pro letoun NG-4. Předpis požaduje uvažovat ve výpočtu maximální vzletovou hmotnost letounu a provést výpočet pro maximální přední i zadní polohu těžiště.

Geometrie podvozku, rozsah polohy těžiště a všechny potřebné hodnoty jsou uvedeny na obr. 4.1 a v tab. 4.1.



Obr. 4.1: Geometrie podvozku a těžiště letounu NG-4

Parametr	Symbol	Hodnota	
		Přední centráž	Zadní centráž
Maximální vzletová hmotnost	m_{TOW}	600 kg	600 kg
Vzdálenost těžiště – příďový podvozek	a	1095 mm	1233 mm
Vzdálenost těžiště – hlavní podvozek	b	375 mm	237 mm
Poloha těžiště letounu	t	25% c_{SAT} 345 mm	35% c_{SAT} 483 mm
Rozvor podvozku	d	1470 mm	
Plocha křídla	S	13 m ²	
Střední aerodynamická tětiva	c_{SAT}	1380 mm	

Tab. 4.1: Vstupní hodnoty pro výpočet zatížení podvozku – verze LSA

4.2. Pozemní zatížení a předpoklady (CS-VLA 473)

$$\text{Rychlost klesání: } v_{kl} = 0,51 \cdot \left(\frac{m_{TOW} \cdot g}{S} \right)^{0,25} = 0,51 \cdot \left(\frac{600 \cdot 9,80665}{13} \right)^{0,25} = \mathbf{2,352 \text{ m/s}} \quad (4.2.1)$$

Podle CS-VLA 473 (b) musí být rychlost klesání v rozmezí 2,13 m/s – 3,05 m/s. Tento požadavek je splněn.

$$\text{Vztlak letounu: } L = \frac{2}{3} \cdot m \cdot g = \frac{2}{3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{5884 \text{ N}} \quad (4.2.2)$$

(podle CS-VLA 473 (c))

$$\text{Stlačení pneumatiky: } h_p = \mathbf{70 \text{ mm}} \quad (4.2.3)$$

$$\text{Stlačení tlumiče: } h_t = \mathbf{92 \text{ mm}} \quad (4.2.4)$$

$$\text{Tlumičí dráha: } h = h_p + h_t = 70 + 92 = \mathbf{162 \text{ mm}}$$

$$\text{Účinnost tlumičů: } \mu = \mathbf{0,5} \quad (4.2.5)$$

$$\text{Efektivní dráha tlumení: } h_{ef} = \mu \cdot h = 0,5 \cdot 162 = \mathbf{81 \text{ mm}} \quad (4.2.6)$$

Násobek setrvačných sil [6]:

$$n_T = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{\frac{m_{TOW} \cdot g}{S} + \frac{h}{3}}}{h_{ef}} = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{\frac{600 \cdot 9,80665}{13} + \frac{0,162}{3}}}{0,081} = \mathbf{4,13} \quad (4.2.7)$$

Podle CS-VLA 473 (e) musí být násobek setrvačných sil větší než 2,67. Tento požadavek je splněn.

$$\text{Nejvyšší násobek při kontaktu se zemí: } n_{max} = n_T + \frac{2}{3} = 4,13 + \frac{2}{3} = \mathbf{4,8} \quad (4.2.8)$$

Podle CS-VLA 473 (e) musí být násobek při kontaktu se zemí větší než 2. Tento požadavek je splněn.

$$\text{Utlučená energie: } E_{tl} = \frac{1}{2} \cdot m_{TOW} \cdot v_{kl}^2 = \frac{1}{2} \cdot 600 \cdot 2,352^2 = \mathbf{1977,3 \text{ J}} \quad (4.2.9)$$

$$\text{Reakční síla v podvozkových nohách: } F_{tl} = \frac{E_{tl}}{h_{ef}} = \frac{1977,3}{0,081} = \mathbf{24411,2 \text{ N}} \quad (4.2.10)$$

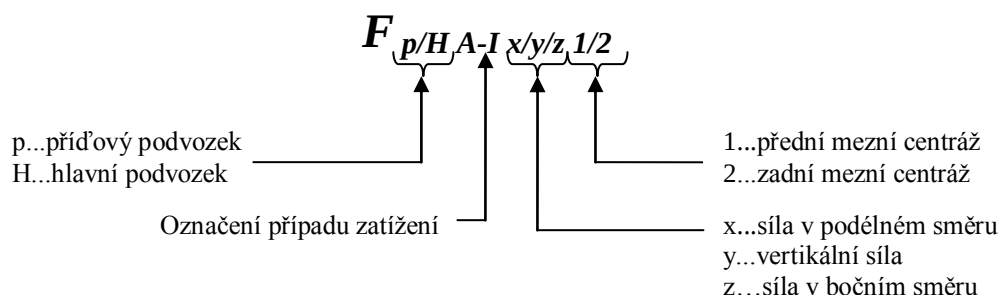
$$\text{Násobek v těžišti letounu: } n = \frac{F_{tl}}{m_{TOW} \cdot g} = \frac{24411,2}{600 \cdot 9,80665} = \mathbf{4,15} \quad (4.2.11)$$

Podle CS-VLA 473 (e) musí být násobek v těžišti letounu větší než 2,67. Tento požadavek je splněn.

$$\text{Maximální provozní násobek: } n_{pr} = n + \frac{2}{3} = 4,15 + \frac{2}{3} = \mathbf{4,82} \quad (4.2.12)$$

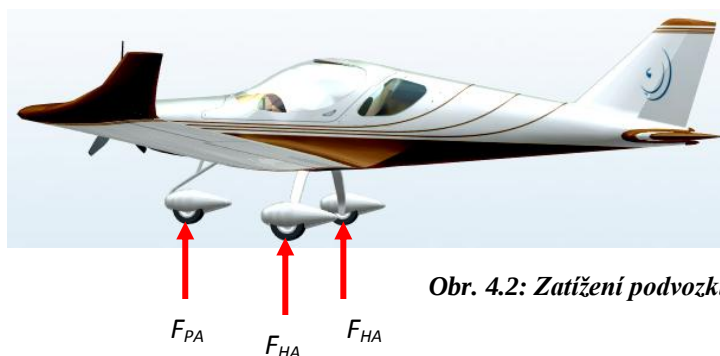
Podle CS-VLA 473 (e) musí být maximální provozní násobek větší než 2,67. Tento požadavek je splněn.

Pozn.: Systém označování jednotlivých případů zatížení je následující:



4.3. Zatížení podvozku při stání na zemi

Letoun lze v tomto případě považovat za nosník na dvou podporách (tj. příd'ový a hlavní podvozek), mezi nimiž působí síla (tíha letounu v těžišti). Síly do podvozku mají svislý směr.



Obr. 4.2: Zatížení podvozku při stání na zemi

Přední centráž:

Zatížení příd'ového podvozku: $F_{PA1} = m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{375}{1470} = 1501 \text{ N}$ (4.3.1)

Zatížení jedné nohy hlavního podvozku:

$F_{HA1} = \frac{1}{2} \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{a}{d} = 0,5 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{1095}{1470} = 2191,5 \text{ N}$ (4.3.2)

Zadní centráž:

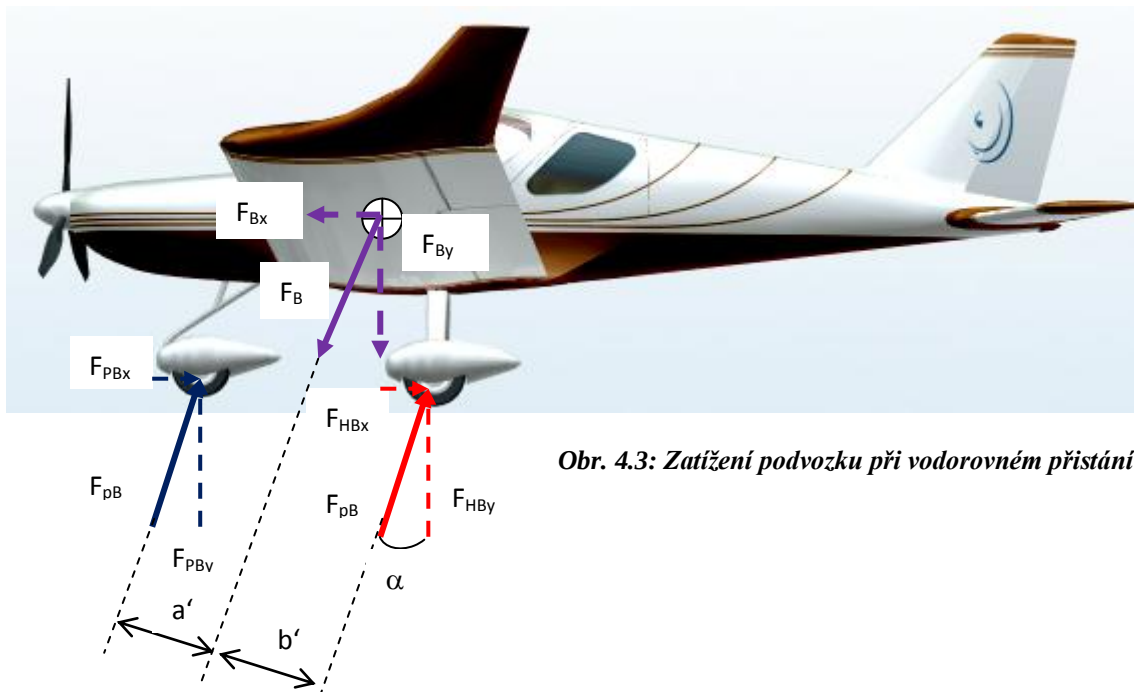
Zatížení příd'ového podvozku: $F_{PA2} = m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{237}{1470} = 948,6 \text{ N}$ (4.3.3)

Zatížení jedné nohy hlavního podvozku:

$F_{HA2} = \frac{1}{2} \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{a}{d} = 0,5 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{1233}{1470} = 2467,7 \text{ N}$ (4.3.4)

4.4. Zatížení podvozku při vodorovném přistání (CS-VLA 479)

Uvažuje se, že letoun je ve vodorovné poloze a všechny podvozkové nohy se dotknou země zároveň.



Obr. 4.3: Zatížení podvozku při vodorovném přistání

Protože $m_{TOW} < 1361$ kg, podle CS-VLA Appendix C je třeba brát $K=0,25$

Síly při dotyku se zemí

$$\text{Vertikální: } F_{By} = n_{pr} \cdot m_{TOW} \cdot g = 4,82 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{28334 \text{ N}} \quad (4.4.1)$$

$$\text{Horizontální: } F_{Bx} = K \cdot n_{pr} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,25 \cdot 4,82 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{7083,5 \text{ N}} \quad (4.4.2)$$

$$\text{Úhel sklonu síly: } \alpha = \text{Arctg} \frac{F_{Bx}}{F_{By}} = \text{Arctg} K = \text{Arctg} 0,25 = 14^{\circ}2' \quad (4.4.3)$$

Přední centráž:

Konfigurace podvozku:

$$\text{Rameno } a': a' = a \cdot \cos \alpha = 1095 \cdot \cos 14^{\circ}2' = 1062,3 \text{ mm} \quad (4.4.4)$$

$$\text{Rameno } b': b' = b \cdot \cos \alpha = 375 \cdot \cos 14^{\circ}2' = 363,8 \text{ mm} \quad (4.4.5)$$

$$\text{Rameno } d': d' = d \cdot \cos \alpha = 1470 \cdot \cos 14^{\circ}2' = 1426,1 \text{ mm} \quad (4.4.6)$$

Síly v předřovém podvozku:

Vertikální:

$$F_{pBy1} = \left(n_{pr} - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = \left(4,82 - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{363,8}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{6233,3 \text{ N}} \quad (4.4.7)$$

Horizontální:

$$F_{pBx1} = K \cdot n_{pr} \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{363,8}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{1808,5 \text{ N}} \quad (4.4.8)$$

Síly v jedné noze hlavního podvozku:

Vertikální:

$$F_{HBy1} = \frac{1}{2} \cdot \left(n_{pr} - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot \left(4,82 - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{1062,3}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{9100,7 \text{ N}}$$

(4.4.9)

Horizontální:

$$F_{HBx1} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot n_{pr} \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{1062,3}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{2640,4 \text{ N}}$$

(4.4.10)

Zadní centráž:**Konfigurace podvozku:**

$$\text{Rameno } a': a' = a \cdot \cos \alpha = 1233 \cdot \cos 14^\circ 2' = 1196,2 \text{ mm} \quad (4.4.11)$$

$$\text{Rameno } b': b' = b \cdot \cos \alpha = 237 \cdot \cos 14^\circ 2' = 230 \text{ mm} \quad (4.4.12)$$

$$\text{Rameno } d': d' = d \cdot \cos \alpha = 1470 \cdot \cos 14^\circ 2' = 1426,1 \text{ mm} \quad (4.4.13)$$

Síly v předřovém podvozku:

Vertikální:

$$F_{pBy2} = \left(n_{pr} - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = \left(4,82 - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{230}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{3940,8 \text{ N}}$$

(4.4.14)

Horizontální:

$$F_{pBx2} = K \cdot n_{pr} \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{230}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{1143,3 \text{ N}}$$

(4.4.15)

Síly v hlavním podvozku:

Vertikální:

$$F_{HBy2} = \frac{1}{2} \cdot \left(n_{pr} - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot \left(4,82 - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{1196,2}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{10247,8 \text{ N}}$$

(4.4.16)

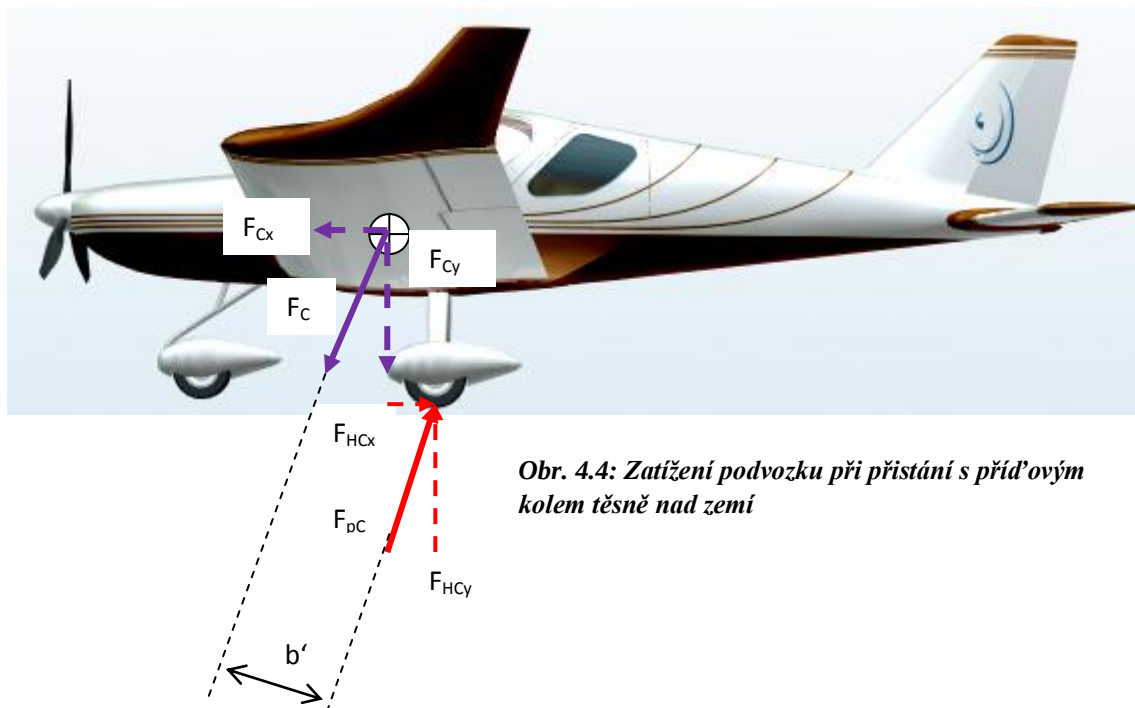
Horizontální:

$$F_{HBx2} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot n_{pr} \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{1196,2}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{2973,2 \text{ N}}$$

(4.4.17)

4.5. Zatížení podvozku při přistání s předovým kolem těsně nad zemí (CS-VLA 479)

Tento případ přistání předpokládá, že letoun je v téměř vodorovné poloze, ale předové kolo se země nedotýká. Veškerý přistávací ráz se tak přenáší pouze na hlavní podvozek, a to **bez ohledu na centráž**.



Obr. 4.4: Zatížení podvozku při přistání s předovým kolem těsně nad zemí

Protože $m_{TOW} < 1361 \text{ kg}$, podle CS-VLA Appendix je třeba brát $K=0,25$

Síly při dotyku se zemí

$$\text{Vertikální: } F_{Cy} = n_{pr} \cdot m_{TOW} \cdot g = 4,82 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{28334 \text{ N}} \quad (4.5.1)$$

$$\text{Horizontální: } F_{Cx} = K \cdot n_{pr} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,25 \cdot 4,82 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{7083,5 \text{ N}} \quad (4.5.2)$$

Přední i zadní centráž:

Síly v předovém podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{pCy} = \mathbf{0 \text{ N}} \quad (4.5.3)$$

$$\text{Horizontální: } F_{pCx} = \mathbf{0 \text{ N}} \quad (4.5.4)$$

Síly v jedné noze hlavního podvozku:

Vertikální:

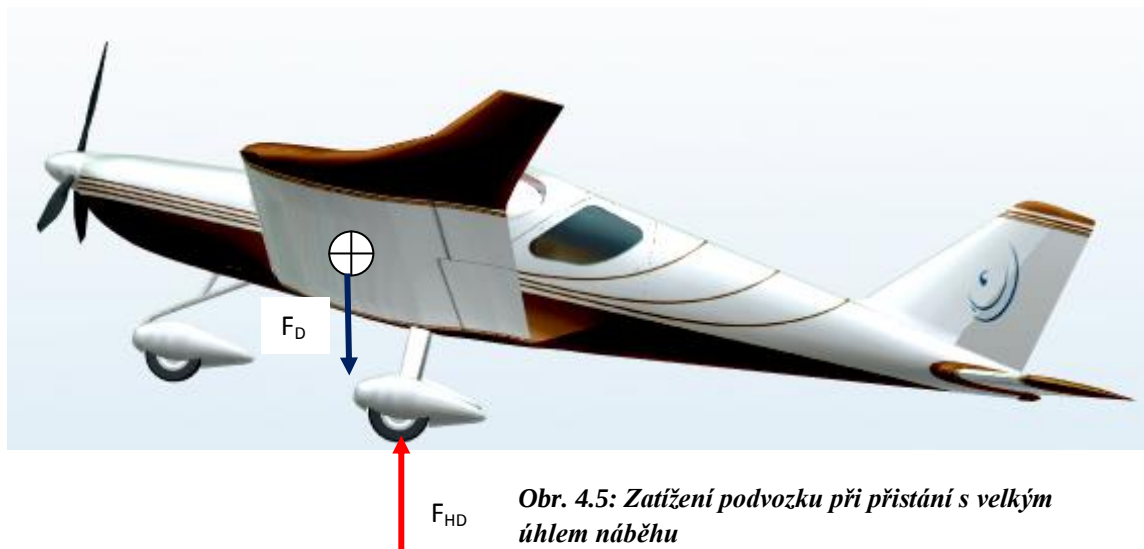
$$F_{HCy} = \frac{1}{2} \cdot \left(n_{pr} - \frac{2}{3} \right) \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot \left(4,82 - \frac{2}{3} \right) \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{12218,1 \text{ N}} \quad (4.5.5)$$

Horizontální:

$$F_{HCx} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot n_{pr} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 4,82 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{3545,1 \text{ N}} \quad (4.5.6)$$

4.6. Zatížení podvozku při přistání s velkým úhlem náběhu (CS-VLA 481)

Stejně jako v předchozí kapitole i zde se uvažuje, že příďový podvozek není zatížen. Celý přistávací ráz tak přenáší pouze hlavní podvozek bez ohledu na centráž. Uvažuje se také čistě vertikální zatížení působení reakčních sil.



Obr. 4.5: Zatížení podvozku při přistání s velkým úhlem náběhu

Přední i zadní centráž:

Síly v příďovém podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{pDy} = 0 \text{ N} \quad (4.6.1)$$

$$\text{Horizontální: } F_{pDx} = 0 \text{ N} \quad (4.6.2)$$

Síly v jedné noze hlavního podvozku:

Vertikální:

$$F_{HDy} = \frac{1}{2} \cdot \left(n_{pr} - \frac{2}{3}\right) \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot \left(4,82 - \frac{2}{3}\right) \cdot 600 \cdot 9,80665 = 12218,1 \text{ N} \quad (4.6.3)$$

$$\text{Horizontální: } F_{HDx} = 0 \text{ N} \quad (4.6.4)$$

4.7. Zatížení podvozku při přistání na jedno kolo (CS-VLA 483)

Zmíněný předpis stanovuje, že je třeba uvažovat letoun ve vodorovné poloze (viz CS-VLA 479). Je třeba také uvažovat stejné zatížení podvozku.

Přední centráž:

Síly v předřovém podvozku:

Vertikální:

$$F_{pEy1} = \left(n_{pr} - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = \left(4,82 - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{363,8}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{6233,3\ N}$$

(4.7.1)

Horizontální:

$$F_{pEx1} = K \cdot n_{pr} \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{363,8}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{1808,5\ N}$$

(4.7.2)

Síly v jedné noze hlavního podvozku:

Vertikální:

$$F_{HEy1} = \frac{1}{2} \cdot \left(n_{pr} - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot \left(4,82 - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{1062,3}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665$$
$$= \mathbf{9100,7\ N}$$

(4.7.3)

Horizontální:

$$F_{HEx1} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot n_{pr} \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{1062,3}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{2640,4\ N}$$

(4.7.4)

Zadní centráž:

Síly v předřovém podvozku:

Vertikální:

$$F_{pEy2} = \left(n_{pr} - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = \left(4,82 - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{230}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{3940,8\ N}$$

(4.7.5)

Horizontální:

$$F_{pEx2} = K \cdot n_{pr} \cdot \frac{b'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{230}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{1143,3\ N}$$

(4.7.6)

Síly v hlavním podvozku:

Vertikální:

$$F_{HEy2} = \frac{1}{2} \cdot \left(n_{pr} - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot \left(4,82 - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{1196,2}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665$$
$$= \mathbf{10247,8\ N}$$

(4.7.7)

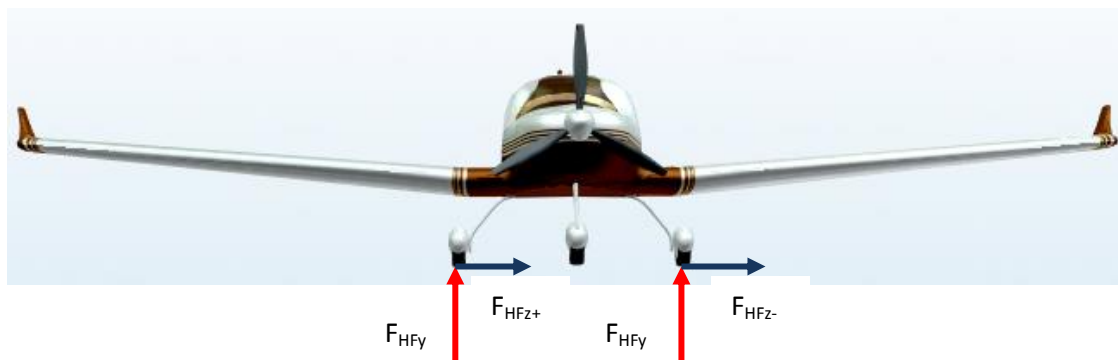
Horizontální:

$$F_{HEx2} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot n_{pr} \cdot \frac{a'}{d'} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 4,82 \cdot \frac{1196,2}{1426,3} \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{2973,7\ N}$$

(4.7.8)

4.8. Boční zatížení podvozku (CS-VLA 485)

Boční zatížení se vyskytuje typicky při přistání s bočním větrem, nicméně podvozek může být zatížen bočními silami také např. při přistání do nevhodného terénu. Podle předpisu je třeba uvažovat, že veškerý přistávací ráz přenáší hlavní podvozek. Vertikální zatížení je rozděleno rovnoměrně mezi obě podvozkové nohy, boční síly představují 0,5- a 0,33 násobek tíhy letounu.



Obr. 4.6: Schéma zatížení podvozku bočními silami

Přední i zadní centráž:

Síly v předřovém podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{pFy} = 0 \text{ N} \quad (4.8.1)$$

$$\text{Horizontální: } F_{pFx} = 0 \text{ N} \quad (4.8.2)$$

Síly v hlavním podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{HFy} = 1,33 \cdot \frac{m_{TOW} \cdot g}{2} = 1,33 \cdot \frac{600 \cdot 9,80665}{2} = 3913 \text{ N} \quad (4.8.3)$$

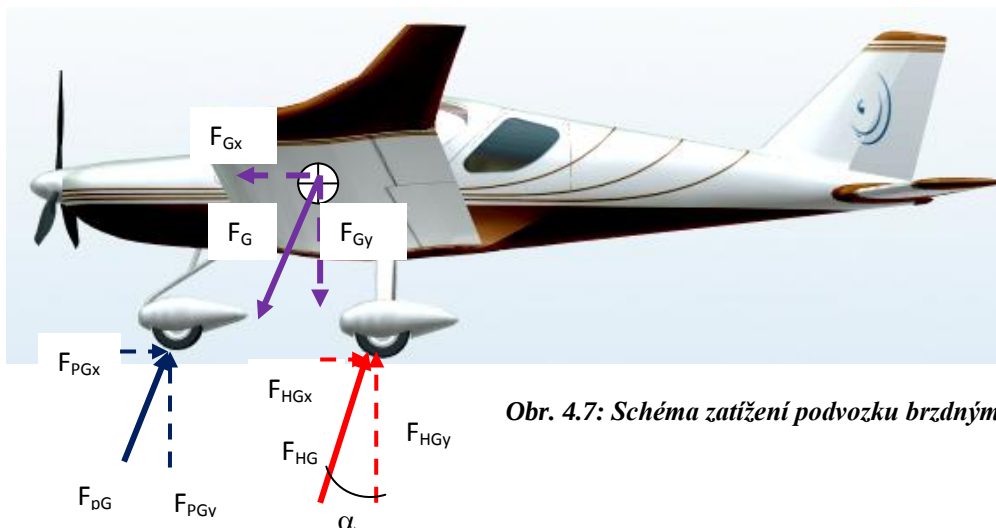
$$\text{Horizontální: } F_{HFx} = 0 \text{ N} \quad (4.8.4)$$

$$\text{Boční působící k ose letounu: } F_{HFz+} = \frac{1}{2} \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,5 \cdot 600 \cdot 9,80665 = 2942 \text{ N} \quad (4.8.5)$$

$$\text{Boční působící od osy letounu: } F_{HFz-} = 0,33 \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,33 \cdot 600 \cdot 9,80665 = 1942 \text{ N} \quad (4.8.6)$$

4.9. Zatížení podvozku během brzdění (CS-VLA 493)

Tento odstavec předpisu předpokládá letoun ve vodorovné poloze (jako CS-VLA 479). Je třeba uvažovat násobek 1,33 a vodorovnou (dozadu působící) sílu odpovídající 0,8 násobku vertikální síly.



Obr. 4.7: Schéma zatížení podvozku brzdnými silami

Zatížení při dosednutí na všechna podvozková kola

Síly při dotyku se zemí

$$\text{Vertikální: } F_{Gy} = n \cdot m_{TOW} \cdot g = 1,33 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{7825,7 \text{ N}} \quad (4.9.1)$$

$$\text{Horizontální: } F_{Gx} = 0,8 \cdot n \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,8 \cdot 1,33 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{6260,6 \text{ N}} \quad (4.9.2)$$

$$\text{Úhel sklonu síly: } \alpha = \text{Arctg} \frac{F_{Bx}}{F_{By}} = \text{Arctg} 0,8 = \mathbf{38^{\circ}39'} \quad (4.9.3)$$

Přední centráž:

Konfigurace podvozku:

$$\text{Rameno } a': a' = a \cdot \cos \alpha = 1095 \cdot \cos 38^{\circ}39' = \mathbf{855 \text{ mm}} \quad (4.9.4)$$

$$\text{Rameno } b': b' = b \cdot \cos \alpha = 375 \cdot \cos 38^{\circ}39' = \mathbf{293 \text{ mm}} \quad (4.9.5)$$

$$\text{Rameno } d': d' = d \cdot \cos \alpha = 1470 \cdot \cos 38^{\circ}39' = \mathbf{1148 \text{ mm}} \quad (4.9.6)$$

Síly v příďovém podvozku:

Vertikální:

$$F_{pGy1} = F_{Gy} \cdot \frac{b'}{d'} = 7825,7 \cdot \frac{293}{1148} = \mathbf{1997,3 \text{ N}} \quad (4.9.7)$$

Horizontální:

$$F_{pGx1} = 0,8 \cdot F_{pGy1} = 0,8 \cdot 1261,8 = \mathbf{1598 \text{ N}} \quad (4.9.8)$$

Síly v jedné noze hlavního podvozku:

Vertikální:

$$F_{HGy1} = \frac{1}{2} \cdot F_{Gy} \cdot \frac{a'}{d'} = 0,5 \cdot 7825,7 \cdot \frac{855}{1148} = \mathbf{2914,2 \text{ N}} \quad (4.9.10)$$

$$\text{Horizontální: } F_{HBx1} = 0,8 \cdot F_{HGy1} = \mathbf{2331,3 \text{ N}} \quad (4.9.11)$$

Zadní centráž:**Konfigurace podvozku:**

$$\text{Rameno } a': a' = a \cdot \cos \alpha = 1233 \cdot \cos 38^\circ 39' = 963 \text{ mm} \quad (4.9.12)$$

$$\text{Rameno } b': b' = b \cdot \cos \alpha = 237 \cdot \cos 38^\circ 39' = 185 \text{ mm} \quad (4.9.13)$$

$$\text{Rameno } d': d' = d \cdot \cos \alpha = 1470 \cdot \cos 38^\circ 39' = 1148 \text{ mm} \quad (4.9.14)$$

Síly v předřovém podvozku:

Vertikální:

$$F_{pGy2} = F_{Gy} \cdot \frac{b'}{d'} = 7825,7 \cdot \frac{185}{1148} = \mathbf{1261,1 \text{ N}} \quad (4.9.15)$$

Horizontální:

$$F_{pGx2} = 0,8 \cdot F_{pGy2} = 0,8 \cdot 1261,1 = \mathbf{1009 \text{ N}} \quad (4.9.16)$$

Síly v hlavním podvozku:

Vertikální:

$$F_{HGy2} = \frac{1}{2} \cdot F_{Gy} \cdot \frac{a'}{d'} = 0,5 \cdot 7825,7 \cdot \frac{963}{1148} = \mathbf{3282,3 \text{ N}} \quad (4.9.17)$$

Horizontální:

$$F_{HGx2} = 0,8 \cdot F_{HGy2} = 0,8 \cdot 3282,3 = \mathbf{2625,8 \text{ N}} \quad (4.9.18)$$

Zatížení při dosednutí pouze na hlavní podvozek**Síly při dotyku se zemí**

$$\text{Vertikální: } F_{Hy} = n \cdot m_{TOW} \cdot g = 1,33 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{7825,7 \text{ N}} \quad (4.9.19)$$

$$\text{Horizontální: } F_{Hx} = 0,8 \cdot n \cdot m_{TOW} \cdot g = 0,8 \cdot 1,33 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{6260,6 \text{ N}} \quad (4.9.20)$$

$$\text{Úhel sklonu síly: } \alpha = \text{Arctg} \frac{F_{Bx}}{F_{By}} = \text{Arctg} 0,8 = \mathbf{38^\circ 39'} \quad (4.9.21)$$

Přední i zadní centráž:**Síly v předřovém podvozku:**

$$\text{Vertikální: } F_{pHy} = \mathbf{0 \text{ N}} \quad (4.9.22)$$

$$\text{Horizontální: } F_{pHx} = \mathbf{0 \text{ N}} \quad (4.9.23)$$

Síly v jedné noze hlavního podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{HHy} = \frac{1}{2} \cdot n \cdot m_{TOW} \cdot g = \frac{1}{2} \cdot 1,33 \cdot 600 \cdot 9,80665 = \mathbf{3913 \text{ N}} \quad (4.9.24)$$

$$\text{Horizontální: } F_{HHx} = 0,8 \cdot F_{HHy} = 0,8 \cdot 3913 = \mathbf{3130,4 \text{ N}} \quad (4.9.25)$$

4.10. Dodatečné zatížení příďového podvozku (CS-VLA 499)

Předpis stanovuje, že příďový podvozek musí být schopen snášet 2,25 násobek svého statického zatížení ve vertikálním směru, 0,8 násobek statického zatížení vzad, 0,4 násobek statického zatížení vpřed a 0,7 násobek statického zatížení v bočním směru.

Přední centráž:

Síly v příďovém podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{ply1} = 2,25 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 2,25 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{375}{1470} = \mathbf{3377,3 \text{ N}} \quad (4.10.1)$$

$$\text{Horizontální vzad: } F_{plx1-} = 0,8 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 0,8 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{375}{1470} = \mathbf{1201 \text{ N}} \quad (4.10.2)$$

$$\text{Horizontální vpřed: } F_{plx1+} = 0,4 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 0,4 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{375}{1470} = \mathbf{600,4 \text{ N}} \quad (4.10.3)$$

$$\text{Boční: } F_{plz1} = 0,7 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 0,7 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{375}{1470} = \mathbf{1051 \text{ N}} \quad (4.10.4)$$

Zadní centráž:

Síly v příďovém podvozku:

$$\text{Vertikální: } F_{ply2} = 2,25 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 2,25 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{237}{1470} = \mathbf{2134,4 \text{ N}} \quad (4.10.5)$$

$$\text{Horizontální vzad: } F_{plx2-} = 0,8 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 0,8 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{237}{1470} = \mathbf{759,2 \text{ N}} \quad (4.10.6)$$

$$\text{Horizontální vpřed: } F_{plx2+} = 0,4 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 0,4 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{237}{1470} = \mathbf{380 \text{ N}} \quad (4.10.7)$$

$$\text{Boční: } F_{plz2} = 0,7 \cdot m_{TOW} \cdot g \cdot \frac{b}{d} = 0,7 \cdot 600 \cdot 9,80665 \cdot \frac{237}{1470} = \mathbf{664,1 \text{ N}} \quad (4.10.8)$$

4.11. Přehled zatížení podvozku

V tab. 4.2 je uveden přehled provozních sil od pozemních reakcí do podvozku s vyznačením nejvyšších hodnot.

Případ zatížení	Přední centráž						Zadní centráž					
	Příd'ový podvozek			Hlavní podvozek			Příd'ový podvozek			Hlavní podvozek		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Statické zatížení	0	1501	0	0	2191,5	0	0	948,6	0	0	2467,7	0
Vodorovné přistání	1808,5	6233,3	0	2640,4	9100,7	0	1143,3	3940,8	0	2973,2	10247,8	0
Přistání s příd'ovým kolem těsně nad zemí	0	0	0	3545,1	12218,1	0	0	0	0	3545,1	12218,1	0
Přistání s velkým úhlem náběhu	0	0	0	0	12218,1	0	0	0	0	0	12218,1	0
Přistání na jedno kolo	1808,5	6233,3	0	2640,4	9100,7	0	1143,3	3940,8	0	2973,2	10247,8	0
Přistání s bočním zatížením	0	0	0	0	3913	2942	0	0	0	0	3913	2942
						1942						1942
Brzděné přistání	1598	1997,3	0	2331,3	2914,2	0	1009	1261,1	0	2625,8	3282,3	0
	0	0		3130,4	3913		0	0		3130,4	3913	
Dodatečné zatížení příd'ového podvozku	1201	3377,3	1051	0	0	0	759,2	2134,4	664,1	0	0	0
	600,4						380					

Tab. 4.2: Přehled sil zatěžujících podvozek (jsou uvedeny PROVOZNÍ síly [N])

Předpis CS-VLA neuvádí žádný zvláštní požadavek pro stanovení součinitele bezpečnosti. Lze se proto řídit odstavcem CS-VLA 303, který pro výpočet početního zatížení stanovuje koeficient bezpečnosti $f_B = 1,5$.

	Příd'ový podvozek			Hlavní podvozek		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Provozní zatížení	1808,5	6233,3	1051	3545,1	12218,1	2942
Početní zatížení	2712,75	9350	1576,5	5317,65	18327,15	4413

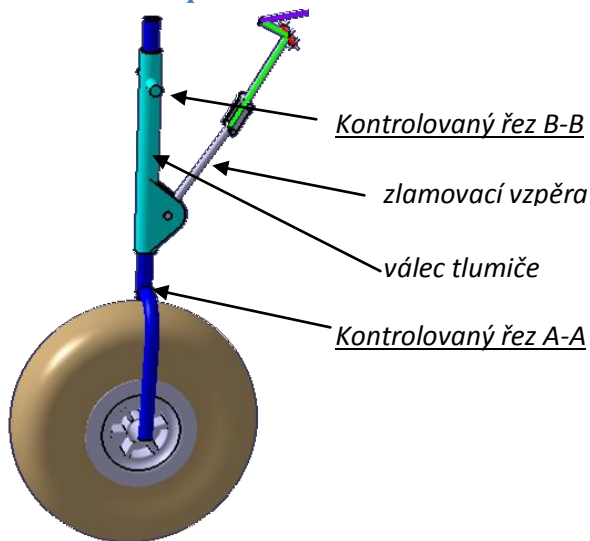
Tab. 4.3: Provozní a početní zatížení podvozku [N]

5. Pevnostní kontrola vybraných částí podvozku

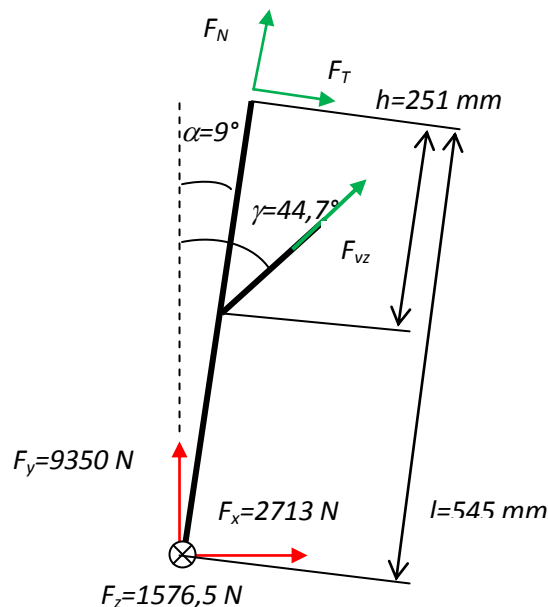
5.1. Pevnostní výpočet příďového podvozku

Na příďovém podvozku je provedena kontrola podvozkové nohy, zlamovací vzpěry a spojovacích čepů. Je použit výpočet pomocí klasických metod pružnosti a pevnosti. Na vybraných komponentách je aplikován i výpočet pomocí metody konečných prvků.

5.1.1. Příďová podvozková noha



Obr. 5.1: Příďová podvozková noha s kolem



Obr. 5.2: Výpočtový model příďové podvozkové nohy

Použitý materiál: Ocel AISI 4130
Mez pevnosti: $R_m=1080 \text{ MPa}$
Mez kluzu: $R_{p0,2}=980 \text{ MPa}$

Polotovary: Trubka
Vnější průměr: $D=22 \text{ mm}$
Vnitřní průměr: $d=10 \text{ mm}$

Zatížení:

Podvozková noha je ve svém závěsu vetknutá. Jedná se o staticky určitou úlohu. Síly ve vazbách lze získat ze soustavy rovnic:

$$F_y \cdot \cos \alpha + F_x \cdot \sin \alpha + F_N + F_{vz} \cdot \cos(\gamma - \alpha) = 0 \quad (5.1.1)$$

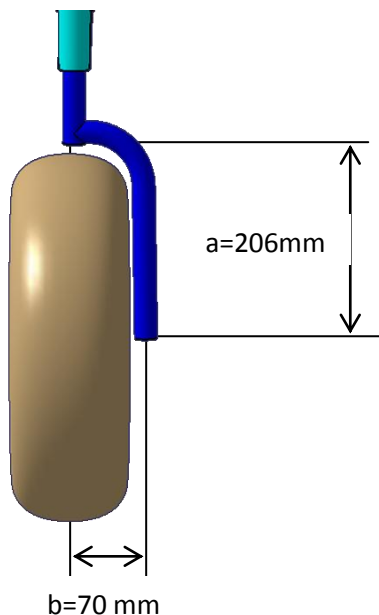
$$F_x \cdot \cos \alpha - F_y \cdot \sin \alpha + F_T + F_{vz} \cdot \sin(\gamma - \alpha) = 0 \quad (5.1.2)$$

$$F_T \cdot l + F_{vz} \cdot (l - h) \cdot \sin(\gamma - \alpha) = 0 \quad (5.1.4)$$

Řešením je: $F_{vz} = 4434 \text{ N}$
 $F_T = 1392 \text{ N}$
 $F_N = -5576 \text{ N}$

Kontrola řezu A-A:

Řez A-A je zatížen kombinací ohybu (od sil ve všech směrech) a krutu (od vodorovné síly).



Průřezové charakteristiky řezu A-A:

Plocha průřezu:

$$S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (22^2 - 10^2)}{4} = 301,6 \text{ mm}^2 \quad (5.1.5)$$

Kvadratický osový moment:

$$J_y = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (22^4 - 10^4)}{64} = 11010 \text{ mm}^4 \quad (5.1.6)$$

Kvadratický polární moment:

$$J_k = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32} = \frac{\pi \cdot (22^4 - 10^4)}{32} = 22020 \text{ mm}^4 \quad (5.1.7)$$

Obr. 5.3: Rozměry koncové vidlice předového podvozku

Osová síla v podvozkové noze:

$$F_o = F_y \cdot \cos \alpha + F_x \cdot \sin \alpha = 9350 \cdot \cos 9^\circ + 2712,75 \cdot \sin 9^\circ = 9659,3 \text{ N} \quad (5.1.8)$$

Síla způsobující kroucení:

$$F_k = F_x \cdot \cos \alpha - F_y \cdot \sin \alpha = 2712,75 \cdot \cos 9^\circ - 9350 \cdot \sin 9^\circ = 1216,7 \text{ N} \quad (5.1.9)$$

$$\text{Ohybové momenty: } M_{ox} = F_o \cdot b + F_z \cdot a = 9659,3 \cdot 70 + 1576,5 \cdot 206 = 1000910 \text{ Nmm} \quad (5.1.10)$$

$$M_{oy} = F_k \cdot b = 1216,7 \cdot 70 = 85169 \text{ Nmm} \quad (5.1.11)$$

Celkový ohybový moment:

$$M_o = \sqrt{M_{ox}^2 + M_{oy}^2} = \sqrt{1000910^2 + 85169^2} = 1004527 \text{ Nmm} \quad (5.1.12)$$

$$\text{Kroucí moment: } M_k = F_k \cdot a = 1216,7 \cdot 206 = 250640,2 \text{ MPa} \quad (5.1.13)$$

$$\text{Normálové napětí od ohybu: } \sigma_o = \frac{M_o}{J_y} \cdot \frac{D}{2} = \frac{1004527}{11010} \cdot \frac{22}{2} = 1004 \text{ MPa} \quad (5.1.14)$$

$$\text{Normálové napětí od tahu: } \sigma_t = \frac{F_z}{S} = \frac{1576,5}{301,6} = 5,23 \text{ MPa} \quad (5.1.15)$$

$$\text{Smykové napětí od krutu: } \tau_k = \frac{M_k}{J_k} \cdot \frac{D}{2} = \frac{250640,2}{22020} \cdot \frac{22}{2} = 125,2 \text{ MPa} \quad (5.1.16)$$

$$\text{Smykové napětí od posouvající síly: } \tau_s = \frac{\sqrt{F_o^2 + F_k^2}}{S} = \frac{\sqrt{9659,3^2 + 1216,7^2}}{301,6} = 32,3 \text{ MPa} \quad (5.1.17)$$

Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_o)^2 + 4 \cdot (\tau_s + \tau_k)^2} = \sqrt{(5,23 + 1004)^2 + 4 \cdot (32,3 + 125,2)^2} = 1057,25 \text{ MPa} \quad (5.1.18)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma_{red}} = \frac{1080}{1057,25} = 1,02 \quad (5.1.19)$$

Kontrola řezu B-B:

Řez B-B se nachází na válci tlumiče podvozkové nohy.

Použitý materiál: Ocel AISI 4130

Mez pevnosti: $R_m=1080$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=980$ MPa

Polotovary: Trubka

Vnější průměr: $D=30$ mm

Vnitřní průměr: $d=22$ mm

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (30^2 - 22^2)}{4} = 326,73 \text{ mm}^2 \quad (5.1.20)$$

$$\text{Kvadratický osový moment: } J_y = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (30^4 - 22^4)}{64} = 28261,8 \text{ mm}^4 \quad (5.1.21)$$

Zatížení: Vzhledem ke konstrukci je řez B-B nejvíce namáhán boční silou F_z .

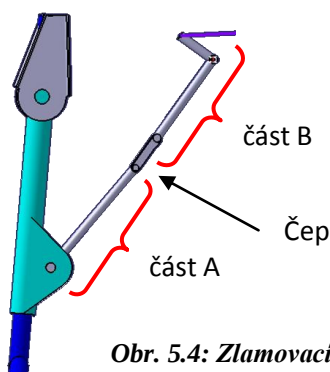
$$\text{Ohybový moment: } M_{ox} = F_z \cdot l = 1576,5 \cdot 545 = 859192,5 \text{ Nmm} \quad (5.1.22)$$

$$\text{Napětí: } \sigma = \frac{M_{ox}}{J_y} \cdot \frac{D}{2} = \frac{859192,5}{28261,8} \cdot \frac{30}{2} = 456,02 \text{ MPa} \quad (5.1.23)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{1080}{456,02} = 2,37 \quad (5.1.24)$$

5.1.2. Zlamovací vzpěra

Zlamovací vzpěra slouží k zajištění podvozku ve vysunuté poloze a k jeho ovládání při vysouvání a zasouvání. Ve vysunuté poloze je vzpěra zajištěna mírným průhybem, což umožňuje výstupku jednoho ramene dosednout na doraz druhého ramene a pak už další pohyb není možný. V této poloze zůstává vzpěra působením hmotnosti letounu na příďový podvozek. Vzpěra je namáhána pouze tlakem.



Obě části zlamovací vzpěry jsou vyrobeny ze stejného materiálu a mají stejný polotovary (viz níže) a způsob uložení. Z hlediska únosnosti se liší tím, že část B je na konci opatřena vidlicí. Její vliv je zohledněn tak, že kvadratický osový moment celé části je určen jako vážený průměr kvadratických momentů válcového a vidlicového úseku.

Obr. 5.4: Zlamovací vzpěra příďového podvozku

Materiál: Dural 6061

Mez pevnosti: $R_m=290$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=241$ MPa

Modul pružnosti: $E=72\,000$ MPa

Polotovary: Trubka

Vnější průměr: $D=10$ mm

Vnitřní průměr: $d=6$ mm

Zatížení: Vzpěra je zatížena silou $F_{vz}=4434$ N (viz kapitola 5.1.1.). Část B přenáší mírně vyšší sílu než část A. Tento rozdíl je zanedbán, protože osy vzpěr svírají pouze velmi malý úhel (přibližně 5°). Je provedena kontrola vzpěrné stability podle Eulera.

Část A:

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (10^2 - 6^2)}{4} = 50,3 \text{ mm}^2 \quad (5.1.25)$$

$$\text{Kvadratický osový moment: } J_y = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (10^4 - 6^4)}{64} = 427,3 \text{ mm}^4 \quad (5.1.26)$$

Délka: $l=162,3$ mm

$$\text{Kritická vzpěrná síla: } F_{kr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot J_y}{l^2} = \pi^2 \cdot \frac{72000 \cdot 427}{162,3^2} = 11532,6 \text{ N} \quad (5.1.27)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{11532,6}{4434} = 2,6 \quad (5.1.28)$$

Část B:

Délka válcové části: $l_1=120$ mm

Délka vidlicové části: $l_2=45$ mm

$$\text{Kvadratický osový moment válcové části: } J_{y1} = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (10^4 - 6^4)}{64} = 427,3 \text{ mm}^4$$

$$\text{Kvadratický osový moment vidlicové části: } J_{y2} = 2 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{10 \cdot 5^3}{6} = 208,33 \text{ mm}^4$$

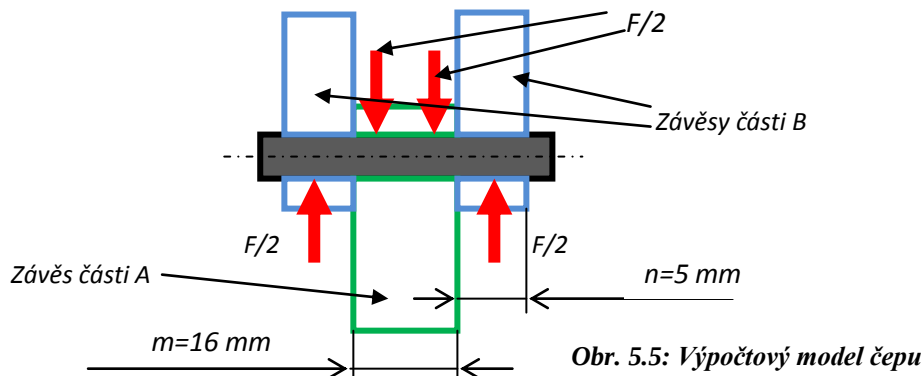
$$\text{Celkový kvadratický osový moment: } J_{yc} = \frac{J_{y1} \cdot l_1 + J_{y2} \cdot l_2}{l_1 + l_2} = \frac{427,3 \cdot 120 + 208,33 \cdot 45}{120 + 45} = 367,6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Kritická vzpěrná síla: } F_{kr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot J_{yc}}{l^2} = \pi^2 \cdot \frac{72000 \cdot 367,6}{165^2} = 9595 \text{ N} \quad (5.1.29)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{9595}{4434} = 2,16 \quad (5.1.30)$$

5.1.3. Čep zlamovací vzpěry

Čep zlamovací vzpěry kloubově spojuje části A a B (viz výše). Je kontrolován pomocí zjednodušené metodiky výpočtu, která nahrazuje rozložená působení osamělými silami a předpokládá, že místo maximálního ohybového momentu je shodné s místem maximálního smykového namáhání. Tím tento výpočtový model, běžně používaný v letecké praxi, dává mírně vyšší hodnoty napětí než by odpovídalo realitě. Lze tedy říci, že výsledný součinitel rezervy je mírně nižší než ve skutečnosti.



Materiál: Ocel AISI 4130

Mez pevnosti: $R_m=1080 \text{ MPa}$

Mez kluzu: $R_{p0,2}=980 \text{ MPa}$

Polotovár: Kruhová tyč, $\varnothing 8 \text{ mm}$

Zatížení: Čep je zatížen stejnou silou jako zlamovací vzpěra, tj. $F=4434 \text{ N}$

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 50,3 \text{ mm}^2 \quad (5.1.31)$$

$$\text{Kvadratický osový moment: } J_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 8^4}{64} = 201 \text{ mm}^4 \quad (5.1.32)$$

Pevnostní výpočet:

$$\text{Ohybový moment: } M_o = \frac{F}{2} \cdot \left(\frac{n}{2} + \frac{m}{4} \right) = \frac{4434}{2} \cdot \left(\frac{5}{2} + \frac{16}{4} \right) = 14410,5 \text{ Nmm} \quad (5.1.33)$$

$$\text{Normálové napětí: } \sigma = \frac{M_o}{J_y} \cdot \frac{d}{2} = \frac{14410,5}{201} \cdot \frac{8}{2} = 286,8 \text{ MPa} \quad (5.1.34)$$

$$\text{Smykové napětí: } \tau = \frac{F}{2 \cdot S} = \frac{4434}{2 \cdot 50,3} = 44,1 \text{ MPa} \quad (5.1.35)$$

$$\text{Redukované napětí: } \sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} = \sqrt{286,8^2 + 4 \cdot 44,1^2} = 300,1 \text{ MPa} \quad (5.1.36)$$

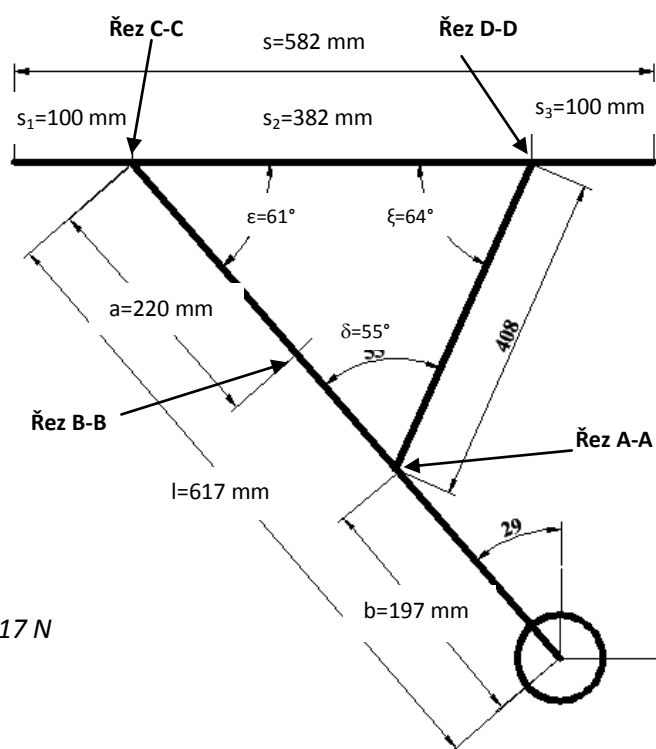
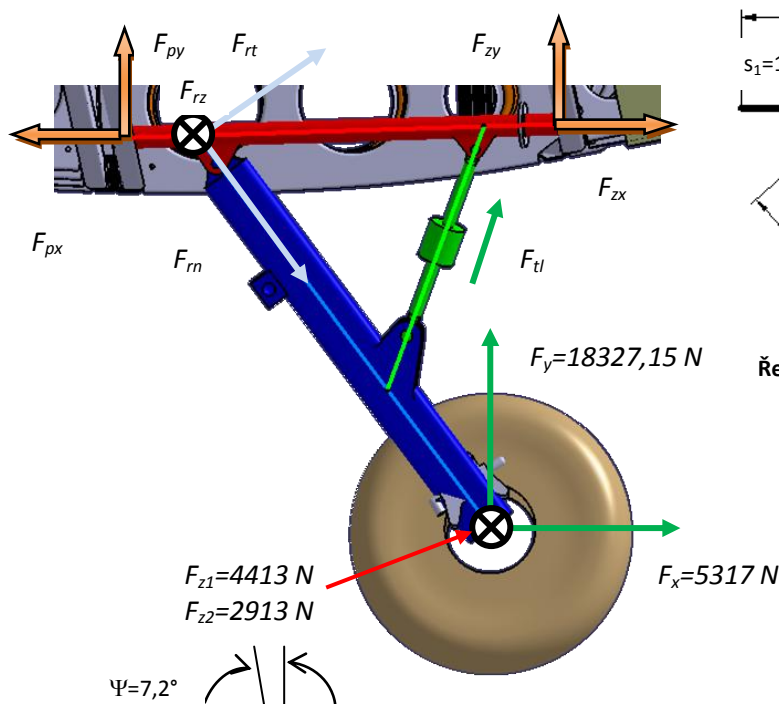
$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma_{red}} = \frac{1080}{300,1} = 3,6 \quad (5.1.37)$$

5.2. Pevnostní kontrola hlavního podvozku

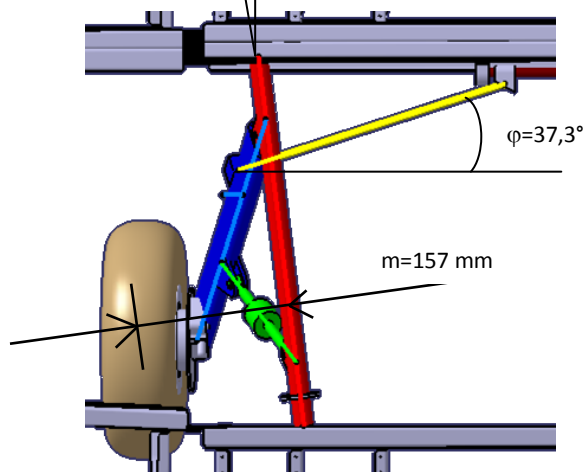
U hlavního podvozku je kontrolována hlavní podvozková noha, tlumič přistávacího rázu, osa uchycení podvozkové nohy, ovládací táhlo a zámky. Pravý a levý hlavní podvozek jsou symetrické z hlediska konstrukce i zatížení, takže je provedena kontrola pouze levého hlavního podvozku.

5.2.1. Síly v jednotlivých členech podvozku

Pro účely pevnostního výpočtu je podvozek ztotožněn s prutovou soustavou. Všechny jeho členy (tj. podvozková noha, tlumič a osa otáčení) se nacházejí v jedné společné rovině, která však není rovnoběžná s osou symetrie letounu. Síly zatěžující podvozek, určené v kapitole 4.11. je proto nutné přepočítat do této roviny.



Obr. 5.6: Hlavní podvozek letounu a jeho idealizace pro výpočet



Obr. 5.7: Pohled na levý hlavní podvozek shora

Hlavní podvozková noha je vzhledem k podélné ose letounu skloněna o úhel $\beta=16,7^\circ$ do boku a $\gamma=29^\circ$ vpřed. Normálovou a posouvající sílu působící v místě zavěšení podvozkového kola lze určit následujícím přepočtem:

1) Otočení o úhel β :

$$F_{1x} = F_x = 5317 \text{ N} \quad (5.2.1)$$

$$F_{1y} = F_y \cdot \cos \beta + F_z \cdot \sin \beta = 18327,15 \cdot \cos 16,7^\circ + 4413 \cdot \sin 16,7^\circ = 18803,5 \text{ N} \quad (5.2.2)$$

$$F_{1z} = F_z \cdot \cos \beta - F_y \cdot \sin \beta = 4413 \cdot \cos 16,7^\circ - 18327,15 \cdot \sin 16,7^\circ = -1034 \text{ N} \quad (5.2.3)$$

2) Otočení těchto sil o úhel γ dává přímo normálovou (F_n) a posouvající (F_t) sílu.

$$F_n = F_{1y} \cdot \cos \gamma - F_{1x} \cdot \sin \gamma = 18803,5 \cdot \cos 29^\circ - 5313 \cdot \sin 29^\circ = 13870,1 \text{ N} \quad (5.2.4)$$

$$F_t = F_{1x} \cdot \cos \gamma + F_{1y} \cdot \sin \gamma = 5313 \cdot \cos 29^\circ + 18803,5 \cdot \sin 29^\circ = 13763 \text{ N} \quad (5.2.5)$$

$$3) \text{ Síla působící v tlumiči: } F_{tl} = F_t \cdot \frac{l}{(l-b) \cdot \sin \delta} = 13763 \cdot \frac{617}{(617-197) \cdot \sin 55^\circ} = 24682 \text{ N} \quad (5.2.6)$$

4) Reakční síly v uchycení podvozkové nohy (F_{rn}, F_{rt}):

$$F_{rn} = F_n - F_{tl} \cdot \cos \delta = 13870,1 - 24682 \cdot \cos 55^\circ = -287 \text{ N} \quad (5.2.7)$$

$$F_{rt} = F_{tl} \cdot \sin \delta - F_t = 24682 \cdot \sin 55^\circ - 13763 = 6455,5 \text{ N} \quad (5.2.8)$$

5) Síla v ovládací vzpěře podvozku

V této kapitole je uveden pevnostní výpočet vzpěry při zatížení podvozku bočními silami.

Případ zatížení vzpěry při zatahování podvozku je uveden v kapitole 5.3.2. Předpokládá se, že boční síly jsou zachyceny v ovládací vzpěře a v zámcích podvozku, a to v poměru 1:1, vzpěra tedy zachytává pouze polovinu potřebného momentu.

5a) Boční síla působí směrem od osy letounu

$$\text{Moment sil k ose otáčení: } M = F_y \cdot m + (F_{z2} \cdot \cos \psi + F_x \cdot \sin \psi) \cdot l \cdot \sin \varepsilon$$

$$M = 18327,15 \cdot 157 + (2913 \cdot \cos 7,2^\circ + 5317 \cdot \sin 7,2^\circ) \cdot 617 \cdot \sin 61^\circ = 4,8 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \quad (5.2.9)$$

$$\text{Síla v ovládací vzpěře: } F_{vz} = \frac{M}{2 \cdot a \cdot \cos \varphi} = \frac{4,8 \cdot 10^6}{2 \cdot 220 \cdot \cos 37,3^\circ} = 13714 \text{ N} \quad (5.2.10)$$

5b) Boční síla působí směrem k ose letounu

$$\text{Moment sil k ose otáčení: } M = F_y \cdot m + (F_{z1} \cdot \cos \psi + F_x \cdot \sin \psi) \cdot l \cdot \sin \varepsilon$$

$$M = 18327,15 \cdot 157 + (-4413 \cdot \cos 7,2^\circ + 5317 \cdot \sin 7,2^\circ) \cdot 617 \cdot \sin 61^\circ = 8,62 \cdot 10^5 \text{ Nmm} \quad (5.2.11)$$

$$\text{Síla v ovládací vzpěře: } F_{vz} = \frac{M}{2 \cdot a \cdot \cos \varphi} = \frac{8,62 \cdot 10^5}{2 \cdot 220 \cdot \cos 37,3^\circ} = 2463 \text{ N} \quad (5.2.12)$$

6) Reakční síly v uchycení osy otáčení ($F_{px}, F_{py}, F_{pz}, F_{zx}, F_{zy}, F_{zz}$):

Určení těchto sil představuje úlohu 1x staticky neurčitou. Ke klasické soustavě tří rovnic statické rovnováhy je proto třeba přidat deformační podmínku. Z výpočetního hlediska je nejjednodušší podmínka nulového posuvu působitě síly F_{px} .

Deformační posuv je vyjádřen pomocí Maxwell-Mohrovy varianty Castiglianovy věty:

$$F_{rn} \cdot \cos \varepsilon + F_{rt} \cdot \sin \varepsilon + F_{tl} \cdot \cos \xi + F_{zx} - F_{px} = 0 \quad (5.2.13)$$

$$F_{rt} \cdot \cos \varepsilon - F_{rn} \cdot \sin \varepsilon + F_{tl} \cdot \sin \xi + F_{py} + F_{zy} = 0 \quad (5.2.14)$$

$$(F_{rt} \cdot \cos \varepsilon - F_{rn} \cdot \sin \varepsilon) \cdot s_1 + F_{tl} \cdot (s_1 + s_2) \cdot \sin \xi + F_{zy} \cdot (s_1 + s_2 + s_3) = 0 \quad (5.2.15)$$

$$u_{px} = \frac{\partial W}{\partial F_{zx}} = \int_0^s \frac{N(x)}{E \cdot S} \cdot \frac{\partial N}{\partial F_{px}} dx = 0 \quad (5.2.16)$$

V prvním úseku osy $x \in (0; s_1)$ $N_1(x) = F_{px}$

V druhém úseku osy $x \in (s_1; s_1 + s_2)$ $N_2(x) = F_{px} - F_{rn} \cdot \cos \varepsilon - F_{rt} \cdot \sin \varepsilon$ (5.2.17)

V třetím úseku osy

$x \in (s_1 + s_2; s_1 + s_2 + s_3)$ $N_3(x) = F_{px} - F_{rn} \cdot \cos \varepsilon - F_{rt} \cdot \sin \varepsilon - F_{tl} \cdot \sin \xi$ (5.2.18)

Protože ve všech úsecích je $\frac{\partial N}{\partial F_{px}} = 1$, lze tuto konstantu vytknout před integrál a celou rovnici dělit. Stejným způsobem lze eliminovat součin $E \cdot S$. Integrál je pak zjednodušen do tvaru:

$$\begin{aligned} u_{px} &= \int_0^{s_1} N_1(x) dx + \int_{s_1}^{s_1+s_2} N_2(x) dx + \int_{s_1+s_2}^{s_1+s_2+s_3} N_3(x) dx = \\ &= F_{px} \cdot s_1 + (F_{px} - F_{rn} \cdot \cos \varepsilon - F_{rt} \cdot \sin \varepsilon) \cdot s_2 \\ &\quad + (F_{px} - F_{rn} \cdot \cos \varepsilon - F_{rt} \cdot \sin \varepsilon - F_{tl} \cdot \sin \xi) \cdot s_3 = 0 \end{aligned} \quad (5.2.19)$$

Po dosazení a řešení soustavy je výsledkem:

$$F_{px} = 6420,14 \text{ N} \quad (5.2.20)$$

$$F_{py} = -6613 \text{ N} \quad (5.2.21)$$

$$F_{zx} = -9907 \text{ N} \quad (5.2.22)$$

$$F_{zy} = -18952 \text{ N} \quad (5.2.23)$$

$$\text{Zatěžující síla v ose Z: } F_{rz} = F_{z1} - F_{vz} \cdot \cos \varphi = 4413 - 13714 \cdot \cos 37,3^\circ = -6496,12 \text{ N} \quad (5.2.25)$$

$$\text{Reakční síly: } F_{pz} = F_{rz} \cdot \frac{s-s_1}{s} = 6496,12 \cdot \frac{582-100}{582} = 5380 \text{ N} \quad (5.2.26)$$

$$F_{zz} = F_{rz} \cdot \frac{s_1}{s} = -6496,12 \cdot \frac{100}{582} = -1116,2 \text{ N} \quad (5.2.27)$$

5.2.2. Kontrola hlavní podvozkové nohy

Materiál: Dural 6061 T6

Mez pevnosti: $R_m=290$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=241$ MPa

Průřez: Vnější rozměry 22 mm x 70 mm

Vnitřní rozměry 10 mm x 50 mm

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = b \cdot h - b_1 \cdot h_1 = 22 \cdot 70 - 10 \cdot 50 = 1040 \text{ mm}^2 \quad (5.2.28)$$

$$\text{Osové kvadratické momenty: } J_y = \frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{22 \cdot 70^3 - 10 \cdot 50^3}{12} = 5,25 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (5.2.29)$$

$$J_z = \frac{h \cdot b^3 - h_1 \cdot b_1^3}{12} = \frac{70 \cdot 22^3 - 50 \cdot 10^3}{12} = 5,79 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad (5.2.30)$$

Podvozková noha je nejvíce namáhána v místě uchycení tlumiče (řez A-A) a v místě připojení ovládací vzpěry (řez B-B).

Řez A-A:

$$\text{Ohybový moment: } M_{oy A-A} = F_t \cdot b = 13763 \cdot 197 = 2711311 \text{ Nmm} \quad (5.2.31)$$

$$\text{Ohybový moment: } M_{oz A-A} = F_{1z} \cdot b \cdot \cos \gamma = -1034 \cdot 197 \cdot \cos 29^\circ = -178158,3 \text{ Nmm} \quad (5.2.32)$$

$$\text{Ohybové napětí: } \sigma = \frac{M_{oy A-A}}{J_y} \cdot \frac{h}{2} - \frac{M_{oz A-A}}{J_z} \cdot \frac{b}{2} = \frac{2711311}{5,25 \cdot 10^5} \cdot \frac{70}{2} + \frac{178158,3}{5,79 \cdot 10^4} \cdot \frac{22}{2} = 214,6 \text{ MPa} \quad (5.2.33)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{290}{214,6} = 1,2 \quad (5.2.34)$$

Řez B-B:

$$\text{Ohybový moment: } M_{oy B-B} = F_{rt} \cdot a = 6455,5 \cdot 220 = 1420210 \text{ Nmm} \quad (5.2.35)$$

$$\text{Ohybový moment: } M_{oz A-A} = F_{1z} \cdot a \cdot \sin \varepsilon = -1034 \cdot 220 \cdot \sin 61^\circ = -198958,5 \text{ Nmm} \quad (5.2.36)$$

$$\text{Ohybové napětí: } \sigma = \frac{M_{oy A-A}}{J_y} \cdot \frac{h}{2} - \frac{M_{oz A-A}}{J_z} \cdot \frac{b}{2} = \frac{1420210}{5,25 \cdot 10^5} \cdot \frac{70}{2} + \frac{198958,5}{5,79 \cdot 10^4} \cdot \frac{22}{2} = 132,5 \text{ MPa} \quad (5.2.37)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{290}{132,5} = 2,19 \quad (5.2.38)$$

5.2.3. Kontrola osy otáčení podvozku

Materiál: Ocel AISI 4130

Mez pevnosti: $R_m=1080 \text{ MPa}$

Mez kluzu: $R_{p0,2}=980 \text{ MPa}$

Průřez: Trubka

Vnější průměr: $D=30 \text{ mm}$

Vnitřní průměr: $d=15 \text{ mm}$

Délka: $l=582 \text{ mm}$

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (30^2 - 15^2) = 530,14 \text{ mm}^2 \quad (5.2.39)$$

$$\text{Kvadratický osový moment: } J_y = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (30^4 - 15^4) = 37275,73 \text{ mm}^4 \quad (5.2.40)$$

$$\text{Kvadratický polární moment: } J_k = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (30^4 - 15^4) = 74551,5 \text{ mm}^4 \quad (5.2.41)$$

Osa otáčení podvozku je nejvíce namáhána v místě uchycení hlavní podvozkové nohy (řez C-C) a v místě uchycení tlumiče (řez D-D).

Řez C-C:

$$\text{Ohybový moment: } M_{oy\ C-C} = F_{py} \cdot s_1 = -6613 \cdot 100 = -661300 \text{ Nmm} \quad (5.2.42)$$

$$\text{Ohybový moment: } M_{oz\ C-C} = F_{pz} \cdot s_1 = 5380 \cdot 100 = 538000 \text{ Nmm} \quad (5.2.43)$$

$$\text{Celkový ohybový moment: } M_{o\ C-C} = \sqrt{M_{oy\ C-C}^2 + M_{oz\ C-C}^2} = \sqrt{661300^2 + 538000^2} = 852503,2 \text{ Nmm} \quad (5.2.44)$$

$$\text{Krouticí moment: } M_k = F_{1z} \cdot l \cdot \sin \varepsilon - F_{vz} \cdot a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon = 1034 \cdot 617 \cdot \sin 61^\circ - 2463 \cdot 220 \cdot \cos 37,3^\circ \cdot \sin 61^\circ = -180996,2 \text{ Nmm} \quad (5.2.45)$$

$$\text{Normálové napětí: } \sigma = \frac{M_{o\ C-C}}{J_y} \cdot \frac{D}{2} = \frac{852503,2}{37275,73} \cdot \frac{30}{2} = 343,1 \text{ MPa} \quad (5.2.46)$$

$$\text{Smykové napětí: } \tau = \frac{M_k}{J_k} \cdot \frac{D}{2} = \frac{180996,2}{74551,5} \cdot \frac{30}{2} = 36,4 \text{ MPa} \quad (5.2.47)$$

$$\text{Redukované napětí: } \sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} = \sqrt{343,1^2 + 4 \cdot 36,4^2} = 350,74 \text{ MPa} \quad (5.2.48)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{1080}{350,74} = 3,08 \quad (5.2.49)$$

Řez D-D:

$$\text{Ohybový moment: } M_{oy\ D-D} = F_{zy} \cdot s_3 = -18952 \cdot 100 = -1895200 \text{ Nmm} \quad (5.2.50)$$

$$\text{Ohybový moment: } M_{oz\ D-D} = F_{zz} \cdot s_3 = 1116,2 \cdot 100 = 111620 \text{ Nmm} \quad (5.2.51)$$

$$\text{Celkový ohybový moment: } M_{o\ D-D} = \sqrt{M_{oy\ D-D}^2 + M_{oz\ D-D}^2} = 1898484,2 \text{ Nmm} \quad (5.2.52)$$

$$\text{Normálové napětí: } \sigma = \frac{M_{o\ D-D}}{J_y} \cdot \frac{D}{2} = \frac{1898484,2}{37275,73} \cdot \frac{30}{2} = 764 \text{ MPa} \quad (5.2.53)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma} = \frac{1080}{764} = 1,4 \quad (5.2.54)$$

5.2.4. Kontrola ovládací vzpěry

Materiál: Dural 6061 T6

Mez pevnosti: $R_m=290$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=241$ MPa

Průřez: Trubka

Vnější průměr: $D=20$ mm

Vnitřní průměr: $d=18$ mm

Délka: $l=578$ mm

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (20^2 - 18^2) = 59,7 \text{ mm}^2 \quad (5.2.55)$$

$$\text{Kvadratický osový moment: } J_y = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (20^4 - 18^4) = 2701 \text{ mm}^4 \quad (5.2.56)$$

$$\text{Tahové napětí: } \sigma_t = \frac{F_{vz}}{S} = \frac{13714}{59,7} = 230 \text{ MPa} \quad (5.2.57)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma_t} = \frac{290}{230} = 1,26 \quad (5.2.58)$$

5.2.5. Zámek hlavního podvozku

Zatahovatelný podvozek musí být vybaven mechanismem, který zajistí jeho polohu vůči letadlu v obou krajních polohách. U většiny letounů se používá systém dvojího jištění. Podvozek je v tomto případě uzamknut mechanicky, což fyzicky brání jeho pohybu, a dále je vhodným způsobem zajištěn i pohon zatahovacího systému (např. odpojení hydraulického okruhu ovládání podvozku). To je důležité zejména proto, že všechny rychlé letouny mají omezenou maximální rychlost s vysunutým podvozkem a pokud by se tento za letu samovolně vysunul, může být následkem i havárie nebo alespoň nouzové přistání.

Poněkud jiná je situace v případě malých letadel kategorie UL. Zatahovací mechanismy jejich podvozků bývají mnohem jednodušší a tudíž méně náchylné k poruše. Díky relativně malé rychlosti letu je obvykle možné mít podvozek vysunutý v celém rozsahu letové obálky. Zámky se pak uplatňují v podstatě jen při pohybu po zemi, která je často nepevněná, a brání zasunutí podvozku vlivem otřesů.

Mechanismus navrhovaný v této diplomové práci je vybaven pouze zámky hlavního podvozku, který přenáší vyšší zatížení. Jejich popis je uveden v kapitole 3.4. Příďový podvozek nemá samostatný zámek. Jeho poloha je dostatečně zajištěna pomocí ovládacího závitu a zlomovací vzpěry.

Materiál: Dural 6061 T6

Mez pevnosti: $R_m=290$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=241$ MPa

Mez pevnosti ve smyku: $R_{ms}=186$ MPa

Průřez: Obdélníková tyč 25 mm x 18 mm

Délka: $l=59$ mm

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Plocha průřezu: } S = 25 \cdot 18 = 450 \text{ mm}^2 \quad (5.3.42)$$

$$\text{Zatěžující moment: } M = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm (viz kap. 5.2.1, odstavec 5a, rov. 5.2.9)} \quad (5.3.43)$$

$$\text{Vzdálenost působíště zámku od osy otáčení: } r = 40 \text{ mm} \quad (5.3.44)$$

$$\text{Síla působící na zámek: } F = \frac{M}{r} = \frac{2,4 \cdot 10^6}{40} = 6 \cdot 10^4 \text{ N} \quad (5.3.45)$$

$$\text{Smykové napětí v zámku: } \tau = \frac{F}{S} = \frac{6 \cdot 10^4}{450} = 133,3 \text{ MPa} \quad (5.3.46)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_{ms}}{\tau} = \frac{186}{133,3} = 1,4 \quad (5.3.47)$$

5.3. Zatížení podvozku při zasouvání

Při zasouvání není podvozek zatížen reakcemi od kontaktu se zemí. Veškeré zatížení elektromotoru ovládajícího pohyb zasouvání představuje tíha podvozku. Naopak při vysouvání musí elektromotor překonávat aerodynamický odpor (zejména příďového podvozku).

Protože k zasouvání podvozku dochází v nejbližších okamžicích po startu, kdy letoun musí stoupat, je v této kapitole uvažován při zasouvání násobek $n=1,5$ působící směrem vzhůru.

V této kapitole je proveden pouze výpočet zatížení. Při srovnání s kapitolou 6.2. je zřejmé, že při nouzovém vysouvání je podvozek zatížen více. Pevnostní kontrola vybraných částí podvozku je proto provedena až v kapitole 6.2.

5.3.1. Zasouvání hlavního podvozku

Výpočet je proveden pro podvozek v zasunuté poloze těsně před zajištěním podvozkových zámků, kdy je systém zasouvání nejvíce zatížen.

Hmotnost jednotlivých položek a jejich těžiště lze ověřit pomocí počítačového modelu podvozku v programu DS CATIA.

$$\text{Hmotnost podvozkové nohy: } m_{pN} = 4,4 \text{ kg} \quad (5.3.1)$$

$$\text{Hmotnost tlumiče: } m_T = 1 \text{ kg} \quad (5.3.2)$$

$$\text{Hmotnost kola: } m_K = 1 \text{ kg} \quad (5.3.3)$$

$$\text{Hmotnost podvozku: } m_p = m_{pN} + m_T + m_K = 4,4 + 1 + 1 = 6,4 \text{ kg} \quad (5.3.4)$$

$$\text{Tíha podvozku: } F_p = n \cdot m_p \cdot g = 1,5 \cdot 6,4 \cdot 9,80665 = 94,14 \text{ N} \quad (5.3.5)$$

$$\text{Vzdálenost těžiště podvozku od osy otáčení: } t = 182,6 \text{ mm} \quad (5.3.6)$$

$$\text{Moment otáčení podvozku: } M_p = F_p \cdot t = 94,14 \cdot 182,6 = 17190,7 \text{ Nmm} \quad (5.3.7)$$

$$\text{Vzdálenost os podvozku a ovládací vzpěry: } h = 30 \text{ mm} \quad (5.3.8)$$

$$\text{Síla v ovládací vzpěře: } F_{vz} = \frac{M_p}{h} = \frac{17190,7}{30} = 573 \text{ N} \quad (5.3.9)$$

$$\text{Úhel mezi ovládací vzpěrou a pohybovým šroubem: } \beta = 16,7^\circ \quad (5.3.10)$$

$$\text{Síla v pohybovém šroubu: } F_s = \frac{F_{vz}}{\cos \beta} = \frac{573}{\cos 16,7^\circ} = 598,3 \text{ N} \quad (5.3.11)$$

$$\text{Dráha posuvu ovládací vzpěry: } s_1 = 360 \text{ mm} \quad (5.3.12)$$

$$\text{Stoupání závitu: } \Delta = 2 \text{ mm} \quad (5.3.13)$$

$$\text{Celkové otočení závitu: } \varphi = \frac{s_1}{\Delta} \cdot 2\pi = \frac{360}{2} \cdot 2\pi = 1131 \text{ rad} \quad (5.3.14)$$

$$\text{Moment pro zasunutí jednoho hlavního podvozku: } M_{th1} = \frac{F_s \cdot s_1}{\varphi} = \frac{598,3 \cdot 360}{1131} = 190,4 \text{ Nmm} \quad (5.3.15)$$

$$\text{Moment pro zasunutí celého hlavního podvozku: } M_{th} = 2 \cdot M_{th1} = 2 \cdot 105,2 = 380,9 \text{ Nmm} \quad (5.3.16)$$

5.3.2. Zasouvání příďového podvozku

$$\text{Hmotnost příďové podvozkové nohy: } m_{PN} = 1,12 \text{ kg} \quad (5.3.17)$$

$$\text{Hmotnost válce tlumiče: } m_T = 3 \text{ kg} \quad (5.3.18)$$

$$\text{Celková hmotnost zlamovací vzpěry: } m_{VZ} = 0,134 \text{ kg} \quad (5.3.19)$$

$$\text{Hmotnost kola: } m_K = 1 \text{ kg} \quad (5.3.20)$$

$$\text{Celková hmotnost příďového podvozku: } m_p = m_{PN} + m_T + m_K + m_{VZ} = 1,12 + 3 + 0,134 + 1 = 5,254 \text{ kg} \quad (5.3.21)$$

$$\text{Vzdálenost těžiště podvozku a osy otáčení: } t = 217 \text{ mm} \quad (5.3.22)$$

$$\text{Tíha podvozku: } F_p = n \cdot m_p \cdot g = 1,5 \cdot 5,254 \cdot 9,80665 = 77,3 \text{ N} \quad (5.3.23)$$

$$\text{Moment otáčení podvozku: } M_p = F_p \cdot t = 77,3 \cdot 217 = 16771,1 \text{ Nmm} \quad (5.3.24)$$

$$\text{Vzdálenost os zlamovací vzpěry a osy otáčení: } h = 22 \text{ mm} \quad (5.3.25)$$

$$\text{Síla v části A zlamovací vzpěry: } F_A = \frac{M_p}{h} = \frac{16771}{22} = 762,3 \text{ N} \quad (5.3.26)$$

$$\text{Úhel mezi částmi A a B zlamovací vzpěry: } \beta = 17^\circ \quad (5.3.27)$$

$$\text{Posouvající síla v části B zlamovací vzpěry: } F_{BT} = F_A \cdot \sin \beta = 762,3 \cdot \sin 17^\circ = 222,9 \text{ N} \quad (5.3.28)$$

$$\text{Tlaková síla v části B zlamovací vzpěry: } F_{BN} = F_A \cdot \cos \beta = 762,3 \cdot \cos 17^\circ = 729 \text{ N} \quad (5.3.29)$$

$$\text{Vzdálenost působistě síly } F_{BT} \text{ od osy otáčení: } r_1 = 165,5 \text{ mm} \quad (5.3.30)$$

$$\text{Vzdálenost reakční síly } F_{BR} \text{ od osy otáčení: } r_2 = 49 \text{ mm} \quad (5.3.31)$$

$$\text{Síla v táhle ovládání podvozku: } F_{BR} = F_{BT} \cdot \frac{r_1}{r_2} = 222,9 \cdot \frac{165,5}{49} = 752,9 \text{ N} \quad (5.3.32)$$

$$\text{Dráha posuvu ovládacího táhla: } s_2 = 34 \text{ mm} \quad (5.3.32)$$

$$\text{Stoupání závitu: } \Delta = 2 \text{ mm} \quad (5.3.33)$$

$$\text{Celkové otočení závitu: } \varphi = \frac{s_2}{\Delta} \cdot 2\pi = \frac{34}{2} \cdot 2\pi = 106,8 \text{ rad} \quad (5.3.34)$$

$$\text{Moment pro otáčení závitu: } M_{tp1} = \frac{F_{BR} \cdot s_2}{\varphi} = \frac{752,9 \cdot 34}{106,8} = 239,7 \text{ Nmm} \quad (5.3.35)$$

$$\text{Převodový poměr planetové převodovky: } i_1 = \frac{s_1}{s_2} = \frac{360}{34} = 10,6 \quad (5.3.36)$$

$$\text{Moment na výstupní hřídeli hlavní převodovky: } M_{tp} = \frac{M_{tp1}}{i_1} = \frac{239,7}{10,6} = 22,61 \text{ Nmm} \quad (5.3.37)$$

5.3.3. Pohon systému zasouvání podvozku

Systém zasouvání podvozku je poháněn elektromotorem napájeným z palubní elektrické sítě. Ten musí splňovat především požadavek na minimální hmotnost a cenu a dostatečný výkon pro zabezpečení zasunutí i vysunutí ve všech přípustných podmínkách. Protože vhodné elektromotory mají obvykle příliš vysoký počet otáček, je elektromotor se zbytkem zatahovacího systému spojen prvním reduktorem, který zajistí vhodné otáčky i dostatečný točivý moment na hnací hřídeli mechanismu. Výkon elektromotoru je vypočten tak, aby zasouvání podvozku netrvalo déle než 8 sekund.

$$\text{Moment na hnací hřídeli systému: } M_t = M_{th} + M_{tp} = 380,9 + 22,61 = 403,51 \text{ Nmm} \quad (5.3.38)$$

$$\text{Rychlost posuvu ovládací vzpěry: } v = \frac{s_1}{t} = \frac{360}{8} = 45 \text{ mm/s} \quad (5.3.39)$$

$$\text{Rychlost otáčení závitu: } \omega = \frac{v}{\Delta} \cdot 2\pi = \frac{45}{2} \cdot 2\pi = 141,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 22,5 \text{ ot/s} \quad (5.3.40)$$

$$\text{Potřebný výkon elektromotoru: } P = M_t \cdot \omega = \frac{403,51 \cdot 141,4}{1000} = 57,1 \text{ W} \quad (5.3.41)$$

6. Systém nouzového vysunutí podvozku

6.1. Konstrukční provedení

Předpis CS-VLA 729 požaduje, aby letoun byl vybaven nouzovým systémem vysouvání podvozku. Tento požadavek reaguje především na dva fakty:

1. U letounů této a podobných kategorií nelze počítat se špičkovou úrovní údržby, která je běžná pro kategorie CS-23 či CS-25. Malá letadla jsou většinou provozována v aeroklubech či přímo soukromníky, čemuž odpovídá i finanční a technická úroveň běžně prováděných oprav.
2. Letouny zmiňované kategorie nemusí být vybaveny (a většinou také nejsou) žádnými zálohovanými soustavami. Jsou certifikovatelné pouze pro provoz za dobrých povětrnostních podmínek (VFR) a předpokládá se, že pokud dojde k celkovému selhání elektrické sítě, bude pilot schopen pokračovat v letu a bezpečně přistát i bez pomoci letových přístrojů. Ztráta možnosti vysunout podvozek by však šanci na bezpečné přistání zcela vyloučila.

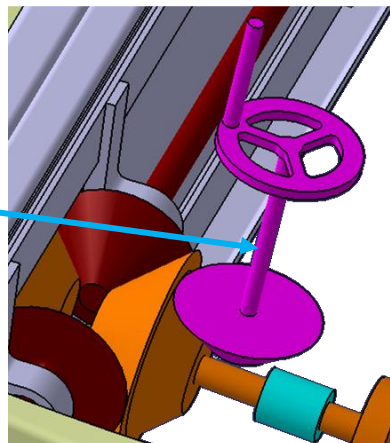
Nouzový systém vysouvání podvozku proto musí být nezávislý na ostatních palubních systémech. V případě dvoumístného letounu je vhodné konstruovat jej tak, aby byl použitelný i druhým členem posádky. Je však možné navrhnout takový systém, který bude podvozek pouze vysouvat, protože nouzové zasunutí není nezbytné (v případě poruchy zatahování je další let i přistání možný bez rizika), a je možné navrhnout i systém, u něhož se předpokládá pouze ojedinělé použití.

Konstrukční řešení pro letoun NG-4 je následující: V pilotní kabině jsou umístěna dvě táhla. Jejich vytažením dojde k odjištění zámků hlavního podvozku a zároveň k odpojení elektromotoru a prvního reduktoru od zbytku systému. Následně pilot uchopí kliku na středním panelu v kabině a začne s ní otáčet. Tento pohyb se přenáší přes kuželová ozubená kola na hnací hřídel systému vysouvání podvozku. Celý proces pak probíhá stejně jako při klasickém vysunutí. Když se hlavní podvozek dostane do zcela vysunuté polohy, potom pružiny zatlačí zámký do jejich drážek a tím jej zajistí. Tak se zároveň zablokuje i celý mechanismus vysouvání a pilot pozná, že podvozek je ve správné poloze.

6.2. Pevnostní kontrola

Mechanismus vysouvání podvozku spadá do sekundárních soustav řízení. Podle předpisu CS-VLA 405 musí být všechny takové soustavy navrženy tak, aby přenesly maximální síly, které na ně pilot pravděpodobně vyvine. Dodatek AMC VLA 405 pak doporučuje považovat za směrodatnou provozní hodnotu $F_p = 350 \text{ N}$, a tedy početní sílu $F = 525 \text{ N}$.

6.2.1. Kontrola ovládací hřídele



Ovládací hřídel

Materiál: Dural 6061 T6

Mez pevnosti: $R_m=290 \text{ MPa}$

Mez kluzu: $R_{p0,2}=241 \text{ MPa}$

Mez pevnosti ve smyku: $R_{ms}=186 \text{ MPa}$

Obr. 6.1: Ovládací kolo a hřídel nouzového vysunutí podvozku

Průřezové charakteristiky:

Průměr: $d_m = 8 \text{ mm}$

(6.2.1)

Kvadratický polární moment: $J_k = \frac{\pi \cdot d_m^4}{32} = \frac{\pi \cdot 8^4}{32} = 402,12 \text{ mm}^4$

(6.2.2)

Průměr ovládacího kola: $d = 60 \text{ mm}$

(6.2.3)

Ovládací moment: $M_{ovl} = F \cdot \frac{d}{2} = 525 \cdot \frac{60}{2} = 15750 \text{ Nmm}$

(6.2.4)

Smykové napětí v ovládací hřídeli: $\tau = \frac{M_{ovl}}{J_k} \cdot \frac{d}{2} = \frac{15750}{402,12} \cdot \frac{8}{2} = 156,7 \text{ MPa}$

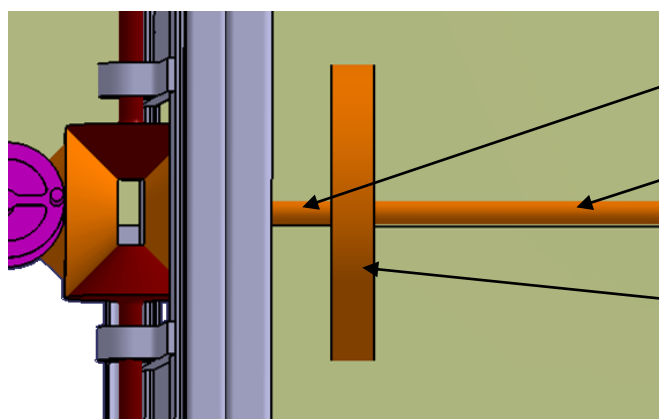
(6.2.5)

Součinitel rezervy: $RF = \frac{R_{ms}}{\tau} = \frac{186}{156,7} = 1,19$

(6.2.6)

6.2.2. Kontrola výstupní hřídele hlavní převodovky

Krouticí moment na hnací hřídeli se rozloží rovnoměrně na třetiny mezi výstupní hřídel hlavní převodovky a oba posuvové šrouby. Výstupní hřídel má tedy menší zatížení, avšak stejné průřezové charakteristiky i materiál jako hřídel hnací, takže lze bez výpočtu konstatovat, že zatížení přeneseme bez poškození.



Výstupní hřídel hlavní převodovky

Ovládací hřídel předového podvozku

Planetová převodovka

Obr. 6.2: Výstupní hřídel hlavní převodovky a ovládací hřídel předového podvozku

6.2.3. Kontrola ovládací hřídele předového podvozku

Závitová ovládací hřídel předového podvozku je zatížena krouticím momentem od výstupní hřídele hlavní převodovky, zvětšeným v převodovém poměru planetové převodovky $i_1=10,6$.

Materiál: Dural 6061 T6

Mez pevnosti: $R_m=290$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=241$ MPa

Mez pevnosti ve smyku: $R_{ms}=186$ MPa

Průřezové charakteristiky:

$$\text{Průměr: } d = 20 \text{ mm} \quad (6.2.12)$$

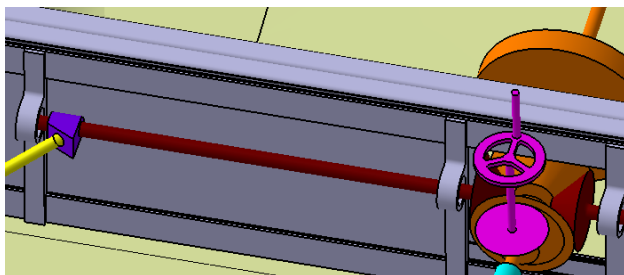
$$\text{Kvadratický polární moment: } J_k = \frac{\pi \cdot d^4}{32} = \frac{\pi \cdot 20^4}{32} = 15708 \text{ mm}^4 \quad (6.2.13)$$

$$\text{Krouticí moment: } M_{k1} = \frac{M_k \cdot i_1}{3} = \frac{15750 \cdot 10,6}{3} = 55650 \text{ Nmm} \quad (6.2.14)$$

$$\text{Smykové napětí v ovládací hřídeli: } \tau = \frac{M_{k1}}{J_k} \cdot \frac{d}{2} = \frac{55650}{15708} \cdot \frac{20}{2} = 35,43 \text{ MPa} \quad (6.2.15)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_{ms}}{\tau} = \frac{186}{35,43} = 5,25 \quad (6.2.16)$$

6.2.4. Kontrola posuvových šroubů hlavního podvozku



Průřezové charakteristiky:

Průměr: $d = 10$ mm

$$\text{Plocha průřezu: } S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78,53 \text{ mm}^2$$

Obr. 6.3: Posuvový šroub hlavního podvozku

Posuvové šrouby hlavního podvozku jsou rovněž namáhány krouticím momentem od hnací hřídele a tahem od ovládací vzpěry podvozku. Předpokládá se, že smyčky závitů se na přenosu momentu a síly nepodílí a všechno zatížení přenáší jen jádro.

Materiál: Ocel AISI 4130

Mez pevnosti: $R_m=1080$ MPa

Mez kluzu: $R_{p0,2}=980$ MPa

Mez pevnosti ve smyku: $R_{ms}=662$ MPa

$$\text{Kvadratický polární moment: } J_k = \frac{\pi \cdot d^4}{32} = \frac{\pi \cdot 10^4}{32} = 981,7 \text{ mm}^4 \quad (6.2.17)$$

$$\text{Krouticí moment: } M_{k2} = \frac{M_k}{3} = \frac{15750}{3} = 5250 \text{ Nmm} \quad (6.2.18)$$

$$\text{Síla od tahu ovládací vzpěry: } F_T = \frac{M_{k2}}{\Delta} = \frac{5250}{2} = 2625 \text{ N} \quad (6.2.19)$$

$$\text{Normálové napětí v ovládací hřídeli: } \sigma = \frac{F_T}{S} = \frac{2625}{78,53} = 33,43 \text{ MPa} \quad (6.2.20)$$

$$\text{Smykové napětí v ovládací hřídeli: } \tau = \frac{M_{k2}}{J_k} \cdot \frac{d}{2} = \frac{5250}{981,7} \cdot \frac{10}{2} = 26,7 \text{ MPa} \quad (6.2.21)$$

$$\text{Redukované napětí: } \sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} = \sqrt{33,43^2 + 4 \cdot 26,7^2} = 63 \text{ MPa} \quad (6.2.22)$$

$$\text{Součinitel rezervy: } RF = \frac{R_m}{\sigma_{red}} = \frac{1080}{64} = 16,7 \quad (6.2.23)$$

7. Změny v konstrukci letounu NG-4

7.1. Konstrukční změny centroplánu

Aby mohl být podvozek zatažen do centroplánu, je zapotřebí uskutečnit následující úpravy:

1. Odstranit tři středová žebra patřící do centroplánu

Tato žebra se nachází v místech, kde je podvozek uchycen a kam se bude zatahovat, takže jejich odstranění je nezbytné. Je však možné zachování jejich horních stran, kam mechanismus podvozku nezasahuje. Dodatečné vyztužení tohoto místa lze zajistit např. zesílením potahu či přidáním podélníků.

2. Přerušit hlavní nosník v centroplánu v ose letounu

Tato změna je důležitá proto, že přes hlavní nosník musí procházet závitová tyč pro ovládání příďového podvozku. Dále v tomto přerušeném místě musí být umístěna hlavní převodovka s kuželovými koly, která přenáší krouticí moment od elektromotoru na závitové tyče ovládající zatahování všech podvozků.

Obecně je jakékoliv přerušení nosníku (ať už stojiny či pásnic) vždy problematické. V tomto případě je to poněkud jednodušší, protože toto místo se nachází v ose letounu, kde není konstrukčně obtížné realizovat potřebné zesílení. K zesílení je vhodné použít právě zde umístěnou převodovku, která musí být pevně uchycena k okolní konstrukci pro zajištění co nejvyšší tuhosti trasy ovládání podvozku.

3. Přerušit potah spodní části centroplánu

Je třeba vytvořit vhodné výřezy v potahu spodní části centroplánu, aby bylo možné ukryt převážnou část podvozku do trupu.

4. Instalovat aerodynamický kryt hlavního podvozku

Protože v zatažené poloze bude hlavní podvozek částečně přecházet přes obrys spodní části trupu a rušit tak proudění v této nepříliš kritické části, bude zapotřebí zde připevnit jednoduchý aerodynamicky tvarovaný kryt. Jedná se o výrobně nenáročnou operaci.

7.2. Konstrukční změny přídě letounu

V přídě letounu je nutné provést tyto změny:

1. Vytvořit úchytné body osy otáčení podvozku

Jako poměrně jednoduchá varianta se nabízí úprava motorového lože přidáním prvků, které umožní zavedení sil od podvozku. V těsné blízkosti úchytných bodů se dále nachází protipožární přepážka, jejíž tuhost lze rovněž využít.

2. Upravit protipožární přepážku

Po zatažení bude podvozková noha procházet přes současnou rovinu protipožární přepážky. Zde se jedná pouze o vytvoření vhodného výřezu, který umožní úplné sklopení podvozkové nohy. Dále je nutné vytvořit další výřez pro závitovou tyč pro ovládání příďového podvozku.

7.3. Pilotní kabina

Zatahovací podvozek jako velmi důležitá letadlová soustava vyžaduje pro svou správnou funkci některá zařízení, která je nutno umístit do pilotní kabiny. Jedná se především o přístroje, které pilotovi umožní mít nad podvozkem kontrolu a přehled během celého letu. V kabině proto musí být instalovány následující prvky:

1. Hlavní spínač ovládání podvozku

U malých letadel se většinou používá jednoduchý páčkový nebo kolébkový přepínač, který má pouze dvě polohy – Vysunuto a Zasunuto. Stisknutím se sepne příslušný elektrický obvod a elektromotor se roztočí na správnou stranu. Jakmile podvozek dosáhne krajní polohy, elektrický obvod se automaticky přeruší a elektromotor se zastaví. Spínač bývá chráněn jednoduchým krytem, aby nedošlo k jeho nechtěné aktivaci.

2. Ukazatel stavu podvozku

Pro ultralehká letadla jsou dnes používány dva různé způsoby:

a) *Soustava signálních světel*

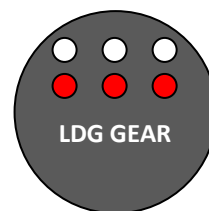
Soustava signálních světel bývá umístěna v těsné blízkosti hlavního spínače ovládání podvozku. Zpravidla jde o soustavu tří či šesti kontrolních světel, které svou barvou indikují příslušný stav jedné podvozkové nohy. Předpisy nestanovují konkrétní barvy či uspořádání, nicméně z hlediska ergonomie lze doporučit následující schéma:



Podvozek vysunut a zajištěn



Podvozek zasunut a zajištěn



Podvozek se vysouvá či zasouvá

Obr. 7.1: Signalizace stavu podvozku

b) Displej letových dat

V souladu s posledními trendy v ultralehkém letectví lze letoun NG-4 vybavit displeji, které v sobě sdružují funkci všech letových přístrojů (rychlost letu, výška, stav motoru apod). Výrobky všech velkých výrobců elektroniky, jako Avidyne či Garmin, mají možnost zobrazovat i polohu podvozku.

Výhodou je, že toto uspořádání nezabírá tolik místa na palubní desce. Nevýhodou pak je, že v případě poruchy displeje pilot ztrácí (kromě letových dat, bez nichž však za VFR podmínek lze bezpečně přistát) i kontrolu nad podvozkem, což může bezpečné přistání značně zkomplikovat.

3. Jistič elektromotoru

Jistič je umístěn spolu s ostatními jističi tak, aby na něj pilot během letu mohl dosáhnout. Přesnější filozofie použití jističe elektromotoru je popsána v kapitole 7.4.5. Je velmi vhodné použít jistič s volným rozpojením, u kterého ani trvalé udržování ovládací páčky v zapnuté poloze nezabrání přerušení obvodu.

4. Ovladač nouzového vysouvání

Tento ovladač má podobu kola s madlem. Je umístěn na středovém panelu. V případě selhání automatického vysouvání může pilot jeho otáčením vysunout podvozek ručně.

5. Táhlo odpojení elektromotoru

Při selhání automatického systému vysouvání podvozku by hlavní reduktor zbytečně ztížil nouzové vysunutí podvozku. Hnací hřídel je proto zapotřebí odpojit od této převodovky, což lze provést právě tímto táhlem. Jeho zatažením se posune převlečný člen, který za normálních okolností přenáší krouticí moment z elektromotoru na hnací hřídel.

6. Táhlo nouzového odjištění podvozku

Při selhání elektromagnetického odjištění pilot může odjistit podvozek ručně zatažením za táhlo na středovém panelu. Následně se podvozek začne vysouvat buď automaticky či nouzově.

7.4. Postupy vysouvání a zasouvání podvozku

Postupy uvedené v této kapitole je nutné zanést do letové příručky. Pilot si je musí osvojit co možná nejlépe, pokud možno už během pilotního výcviku. Jejich nesprávné provedení může mít fatální následky.

7.4.1. Zasouvání podvozku po startu

1. Provést běžné úkony po vzletu
2. Zkontrolovat, zda svítí tři zelená kontrolní světla podvozku
3. Přivést letoun do přímočarého letu nebo do letu s násobkem nejvýše 1,5
4. Přepnout hlavní spínač ovládání podvozku do polohy Zasunuto
5. Po zhasnutí kontrolních světel pokračovat v letu

7.4.2. Vysouvání podvozku před přistáním

1. Přivést letoun do přímočarého letu nebo do letu s násobkem nejvýše 1,5
2. Přepnout hlavní spínač ovládání podvozku do polohy Vysunuto
3. Po rozsvícení zelených kontrolních světel pokračovat v přistání
4. Provést běžné úkony před přistáním

7.4.3. Nouzová situace – porucha hlavního zdroje elektrické energie za letu

1. NEZKOUŠET zapnout hlavní zdroj elektrické energie jen pro vysunutí podvozku
2. Zatáhnout za táhlo odpojení elektromotoru
3. Zatáhnout za táhlo odjištění podvozku
4. Otáčet klikou nouzového vysunutí podvozku
5. Jakmile podvozek dosáhne krajní vysunuté polohy, samočinně se zajistí. Poté už klikou nelze otáčet.
6. Dokončit přistání

7.4.4. Nouzová situace – neúplné vysunutí či zasunutí podvozku

1. Přepnout hlavní spínač podvozku do opačné polohy (tj. zkusit podvozek vrátit do výchozího stavu)
2. Pokud podvozek zareaguje, opakovat pokus o úplné vysunutí či zasunutí
3. Pokud podvozek nereaguje, pak vypnout jistič elektromotoru a provést kroky k vysunutí podvozku při poruše hlavního zdroje elektrické energie (viz kap. 7.4.3.)

7.4.5. Nouzová situace – vypadnutí jističe elektromotoru

K vypadnutí jističe dojde, pokud hodnota proudu procházející elektromotorem přesáhne povolenou hodnotu. Nejčastěji se to může stát, pokud při zasouvání podvozku pilot překročí násobek 1,5 nebo se mechanismus vysouvání z jakéhokoliv důvodu zablokuje. Potom elektromotor odebírá stále vyšší proud a jistič musí zabránit jeho poškození a selhání celé elektrické sítě. Postup řešení je následující:

1. Pokud k vypadnutí jističe došlo poprvé, zkusit jistič znovu zapnout a proces zasouvání či vysouvání dokončit
2. Pokud jistič opět vypadne, už se o jeho další zapnutí NESNAŽIT
3. Je-li podvozek vysunut a zajištěn, pokračovat v letu se zvýšenou opatrností
4. Není – li podvozek vysunut a zajištěn, provést kroky k vysunutí podvozku při poruše zdroje elektrické energie (viz kap. 7.4.3.)

7.5. Změny hmotových parametrů

Nevyhnutelným důsledkem rekonstrukce podvozku na zatahovatelný je nárůst hmotnosti letounu. V tabulce 7.1. je zpracován přehled jednotlivých komponent podvozku a jejich hmotnost.

Položka	Název položky	Hmotnost [kg]
Hlavní podvozek		
1	Podvozková noha	4.4
2	Tlumič	1
3	Kolo	1
4	Osa otáčení	3.15
5	Závěs křídla	2.8
6	Zámek podvozku	0.076
7	Ovládací vzpěra	0.126
8	Posuvné pouzdro	0.047
9	Posuvový šroub	1
Příd'ový podvozek		
10	Podvozková noha	1.12
11	Válec tlumiče	3
12	Zlamovací vzpěra	0.134
13	Kolo	1
14	Ovládací táhlo	0.13
15	Posuvné pouzdro	0.018
16	Ovládací hřídel	0.355
17	Planetová převodovka	1
18	Výstupní hřídel	0.083
Systém pohonu		
19	Hlavní převodovka	3
20	Vstupní hřídel převodovky	0.16
21	Nouzové ovládací kolo	0.18
22	Elektromotor	3.5
Hmotnost celkem		40,8 kg

Tab. 7.1: Hmotnost zatahovacího podvozku

Nárůst hmotnosti lze předpokládat kolem 75% celkové hmotnosti systému. To proto, že bude třeba odstranit původní uchycení podvozku a provést další změny uvedené v kapitole 7. **Nárůst hmotnosti** lze proto odhadnout na přibližně **30 kg**.

Vliv zatahovacího podvozku na polohu těžiště není detailně vypočten. Protože se však většina hmotnosti nachází v centroplánu, tedy relativně blízko současné polohy těžiště, lze předpokládat, že systém zatahovacího podvozku polohu těžiště výrazně nezmění.

8. Závěr

V poslední době se výrazně projevuje celosvětový trend nabízet na trhu letouny, které v sobě kombinují výhody malých letadel (nižší provozní náklady, snadnější údržba a pilotáž) a letadel vyšších kategorií (pokročilé technické vybavení, vysoké výkony aj). Názorným příkladem je vývoj avioniky určené pro lehká a ultralehká letadla, která při neporovnatelně nižší ceně nabízí téměř stejné možnosti jako avionika pro dopravní letouny. Návrh zatahovacího podvozku pro letoun NG-4 je dalším logickým krokem v tomto vývojovém směru.

Tato diplomová práce shrnuje počáteční kroky, které musí provázet návrh konstrukce zatahovacího podvozku – analýzu předpisové a certifikační základny, prozkoumání stávající situace u konkurenčních typů, návrh konstrukce zatahování, výpočet zatížení a pevnostní výpočty, volbu pohonu apod. Dalšími fázemi, které by měly následovat, jsou: analýza spolehlivosti konstrukce, výpočty zaměřené na únavovou životnost, analýza technologičnosti (vyrobitelnost, udržovatelnost a opravitelnost) a po vyřešení všech problémů následně výroba, zástavba a ověření systému při pozemních a letových zkouškách. Bylo by rovněž velmi vhodné provést už před zahájením konstrukce analýzu za pomoci nástrojů CFD, aby hned na začátku vývoje bylo zřejmé a hlavně kvantifikované, jaký vliv bude mít zatažení podvozku na letové výkony a vlastnosti.

Veškeré rozborů, výpočty a návrhy v této práci by tak měly sloužit hlavně jako podklad pro další práci na jejím ústředním tématu. Týká se to především důkladného ověření a zpřesnění pevnostních výpočtů nejen statických, ale i dynamických. Předmětem dalších prací, které mohou navázat na tuto, tak může být například rekonstrukce přistávacího zařízení na plovákové či lyžové a analýza jejich aerodynamických vlastností, počítačové modelování chování podvozkové nohy při dopadu na zem v případě havárie a jiné. Výsledkem pak bude kompletní sada rozborů, které výrobci letounu NG-4 umožní snadnější a fundovanější rozhodování o případné výrobě verze se zatahovatelným podvozkem.



Seznam zdrojů

Odborná literatura

- [1] CURREY, Norman S. Aircraft landing gear design: Principles and practices. Washington, D.C. : American institute of aeronautics and astronautics, inc., 1988. 373 s. ISBN 0-930403-41-X.
- [2] ROSKAM, Jan. *Airplane design*. Ottawa, Kansas : Roskam Aviation and Engineering corporation, 1985. 2492 s.
- [3] PAZMANY, Ladislao. Landing gear design for light aircraft. San Diego, California, USA: Pazmany Aircraft Corporation, 1986. 245 s. ISBN 0-9616777-0-8.
- [4] HRUŠKA, Zbyněk; SVITÁK, Pavel. ČSN 31 0001 aneb o leteckém názvosloví. *Letectví+kosmonautika*. 2007, 83, 1, s. 98. ISSN 0024-1156.
- [5] Ptali jste se. *Letectví+kosmonautika*. 2005, 81, 6, s. 69. ISSN 0024-1156.
- [6] CHREN, T. Návrh podvozku pro letoun Rapid 600. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [7] The aerodynamic affect of retractable landing gear : NACA Technical note no.456. Washington : Langley memorial aeronautical laboratory, 1933. 9 s.

Internet

- [8] Internetové stránky firmy Roko Aero:
<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>
- [9] Předpis CS-VLA:
http://easa.europa.eu/ws_prod/g/doc/Agency_Mesures/Certification_Spec/CS-VLA%20%20Amdt%201%20combined.pdf

Seznam obrázků

- 2.1. Piper PA-18AS – příklad letounu s plovákovým podvozkem
<http://www.airliners.net/photo/Aero-Club-Como/Piper-PA-18AS-150-Super/0465369/M/>
- 2.2: Short Sunderland – příklad letounu s trupem tvarovaným pro přistání na vodní hladině
<http://www.airliners.net/photo/Short-S-25-Sunderland/1823136/M/>
- 2.3: Bell 206 – příklad vrtulníku s lyžovým podvozkem
<http://www.airliners.net/photo/Bell-206B-3-JetRanger/1558479/M/>
- 2.4: DHC-2 Beaver – letoun upravený pro operace ze zasněžených ploch
<http://www.airliners.net/photo/K2-Aviation/De-Havilland-Canada/1362638/M/>
- 2.5: KP-2U Sova – příklad letounu s podvozkem s předovým kolem
<http://www.airliners.net/photo/Kappa-KP-2U-Sova/1611011/M/>
- 2.6: SU-26 – příklad letounu s podvozkem s ostruhovým kolem
<http://www.airliners.net/photo/Sukhoi-SU-26M/1833416/M/>
- 2.7: L-13SW Vivat – příklad letounu s tandemovým podvozkem s ostruhou
[http://www.airliners.net/photo/Untitled-\(Vychodocesky-Aeroklub/Aerotechnik-L-13SW-Vivat/1834248/M/](http://www.airliners.net/photo/Untitled-(Vychodocesky-Aeroklub/Aerotechnik-L-13SW-Vivat/1834248/M/)
- 2.8: Harrier – příklad letounu s tandemovým podvozkem s předovým kolem
<http://www.airliners.net/photo/Spain---Navy/McDonnell-Douglas-EAV-8B/1815207/M/>
- 2.9: Jednokolový podvozek (zde podvozek z VUT-100 Cobra)
<http://www.airliners.net/photo/Evektor-VUT-100-Cobra/1142370/M/>
- 2.10: Vícekolový podvozek (zde podvozek z Boeingu 777)
<http://www.airliners.net/photo/American-Airlines/Boeing-777-223-ER/1823739/M/>
- 2.11: Experimentální pásový podvozek (zde podvozek z B-36)
Převzato z [5]
- 2.12: Pružinový podvozek (zde podvozek z Z-50L)
<http://www.airliners.net/photo/Zlin-Z-50L/1786593/M/>
- 2.13: Teleskopický podvozek (zde podvozek z L-200 Morava)
<http://www.airliners.net/photo/Czech-Republic--/Let-L-200-Morava/1567175/M/>
- 2.14: Pákový podvozek (zde podvozek z Su-24)
<http://www.airliners.net/photo/Belarus---Air/Sukhoi-Su-24M/1739721/L/>
- 2.15: Kombinovaný podvozek (zde podvozek z A-7 Corsair II)
<http://www.airliners.net/photo/USA---Air/LTV-A-7D-Corsair/1788155/L/>
- 3.1: Výkres letounu NG-4
Poskytnuto firmou Roko Aero, a.s.

3.2: Letoun NG-4 LSA

<http://jetphotos.net/viewphoto.php?id=6552177&nseq=6>

3.3: Letoun NG-4 UL

<http://www.rokoaero.com/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ#>

3.4: Letoun VL-3 Sprint s vysunutým podvozkem

<http://www.vl-3.cz/letoun-vl-3-sprint/technicke-informace/podvozek/>

3.5: Letoun VL-3 Sprint se zasunutým podvozkem

<http://www.vl-3.cz/letoun-vl-3-sprint/technicke-informace/podvozek/>

3.6: Letoun WT-9 Dynamic se zatahovacím podvozkem

http://aerospool.sk/index.php?option=com_phocagallery&view=category&id=27%3Awt9-dynamic-moments-from-wgc2010&Itemid=53&lang=sk&limitstart=40

3.7: Letoun WT-9 Dynamic s pevným podvozkem

http://aerospool.sk/index.php?option=com_phocagallery&view=category&id=27%3Awt9-dynamic-moments-from-wgc2010&Itemid=53&lang=sk&limitstart=40

3.8: Letoun TL-2000 Sting se zatahovacím podvozkem

<http://www.google.cz/imgres?imgurl=http://cdn-www.airliners.net/aviation-photos/>

3.9: Letoun TL-2000 Sting s pevným podvozkem

<http://www.airliners.net/photo/TL-Ultralight-TL-2000/1867493/M/>

3.10: Model letounu NG-4 se zatahovatelným podvozkem

3.11: Celkové schéma zatahovacího mechanismu

3.12: Pohon mechanismu vysouvání

3.13: Zámek hlavního podvozku

3.14: Kulisa pro otočení příďového podvozku

3.15: Detail válce s drážkou

4.1: Geometrie podvozku a těžiště letounu NG-4

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

4.2: Zatížení podvozku při stání na zemi

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

4.3: Zatížení podvozku při vodorovném přistání

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

4.4: Zatížení podvozku při přistání s příďovým kolem těsně nad zemí

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

4.5: Zatížení podvozku při přistání s velkým úhlem náběhu

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

4.6: Schéma zatížení podvozku bočními silami

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

4.7: Schéma zatížení podvozku brzdnými silami

<http://www.skvelestranky.cz/test/roko-aero/index.php?page=airc&rebuild=1&lang=CZ>

5.1: Příďová podvozková noha s kolem

5.2: Výpočtový model příďové podvozkové nohy

5.3: Rozměry koncové vidlice příďového podvozku

5.4: Zlamovací vzpěra příďového podvozku

5.5: Výpočtový model čepu

5.6: Hlavní podvozek letounu a jeho idealizace pro výpočet

5.7: Pohled na levý hlavní podvozek shora

6.1: Ovládací kolo a hřídel nouzového vysunutí podvozku

6.2: Výstupní hřídel hlavní převodovky a ovládací hřídel příďového podvozku

6.3: Posuvový šroub hlavního podvozku

7.1: Signalizace stavu podvozku

Pozn. Obrázky bez uvedeného zdroje byly vytvořeny autorem.

Seznam použitých zkratk

AMC	Acceptable means of compliance (přijatelné způsoby plnění předpisů)
CFD	Computational fluent dynamics
CS	Certification specifications (předpisy pro stavbu a certifikaci letadel vydané evropskou organizací EASA)
EASA	European aviation safety agency
FAA	Federal Aviation Administration
FAR	Federal aviation regulations (předpisy pro stavbu a certifikaci letadel vydané americkou organizací FAA)
IFR	Instrument flight rules
LSA	Light sport aircraft (kategorie lehkých sportovních letadel)
MKP	Metoda konečných prvků
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
SAT	Střední aerodynamická těliva
SOP	Svislá ocasní plocha
UL	Ultra-light (kategorie ultralehkých letadel)
VFR	Visual flight rules
VLA	Very light aircraft (kategorie velmi lehkých letadel)
VOP	Vodorovná ocasní plocha
VPD	Vzletová a přistávací dráha

Seznam použitých matematických symbolů

Symbol	Jednotka SI	Popis
μ	[-]	Součinitel
Δ	[m]	Stoupání závitu
σ	[Pa]	Normálové napětí
τ	[Pa]	Smykové napětí
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \varphi$	[rad]	Úhel sevřený dvěma přímkami
σ_{red}	[Pa]	Redukované napětí
a	[m]	Vzdálenost těžiště letounu od předového podvozku
b	[m]	Vzdálenost těžiště letounu od hlavního podvozku
c_{sat}	[m]	Hloubka střední aerodynamické tětiny
d, D	[m]	Rozvor podvozku, průměr kruhové tyče či čepu
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti materiálu
E_{tl}	[J]	Utlumená energie při dosednutí
f_B	[-]	Součinitel bezpečnosti
F	[N]	Síla
F_{kr}	[N]	Kritická vzpěrná síla
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
h	[m]	Vzdálenost, dráha, šířka obdélníkové tyče
i	[-]	Převodový poměr
J	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu součásti
K	[-]	Konstanta
l	[m]	Délka, výška
L	[N]	Vztlková síla
m	[kg]	Hmotnost
M_k	[Nm]	Krouticí moment
M_o	[Nm]	Ohybový moment
m_{TOW}	[kg]	Vzletová hmotnost
n	[-]	Násobek zatížení
$\emptyset$	[m]	Průměr polotovaru
r	[m]	Poloměr
RF	[-]	Součinitel rezervy
R_m	[Pa]	Mez pevnosti materiálu
$R_{p0,2}$	[Pa]	Smluvní mez kluzu materiálu
S	[m ²]	Plocha křídla letounu, plocha průřezu součásti
t	[m]	Vzdálenost těžiště letounu od počátku SAT
v_{kl}	[m/s]	Vertikální složka rychlosti letounu při klesání na přistání
W	[J]	Energie napjatosti

Další zkratky a symboly jsou vysvětleny v textu.

Seznam příloh

Příloha 1: Kontrola vybraných částí podvozku metodou konečných prvků

- Přední podvozková noha
- Zlamovací vzpěra – část A
- Zlamovací vzpěra – část B
- Hlavní podvozková noha, osa otáčení a tlumič

Příloha 2: Výkres letounu NG-4 ve verzi se zatahovacím podvozkem a ve verzi s pevným podvozkem

Příloha 3: Výkres letounu NG-4 se zataženým podvozkem

Příloha 1: Kontrola vybraných částí podvozku metodou konečných prvků

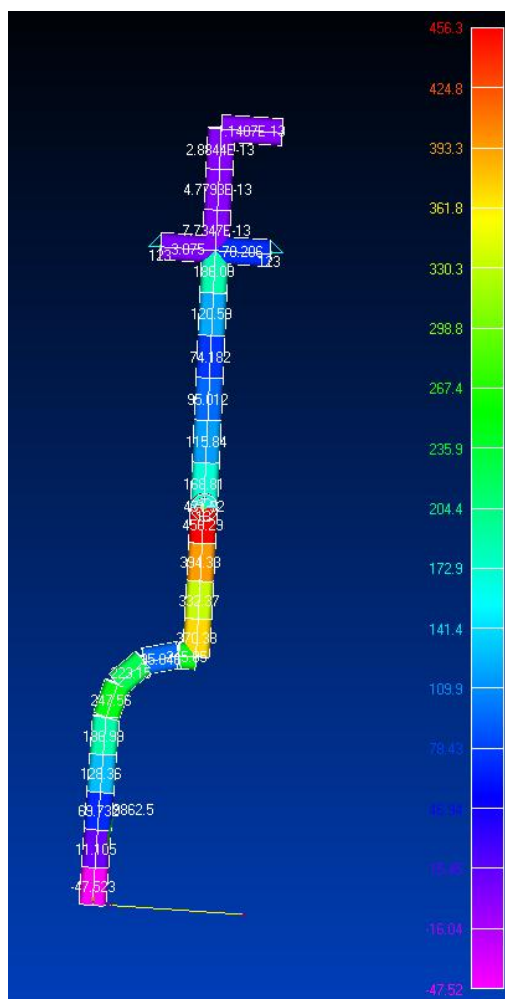
Veškeré modely jsou vytvořeny pomocí prutových prvků BEAM, které přenášejí šest stupňů volnosti. Použitá ocel i dural splňují předpoklady pro aplikaci lineárního elastického materiálu, který je proto použit. Dále je zapotřebí definovat příčný průřez prutů pro výpočet průřezových charakteristik. Jako řešič byl použit MSC/MD NASTRAN 2004.

Příďová podvozková noha

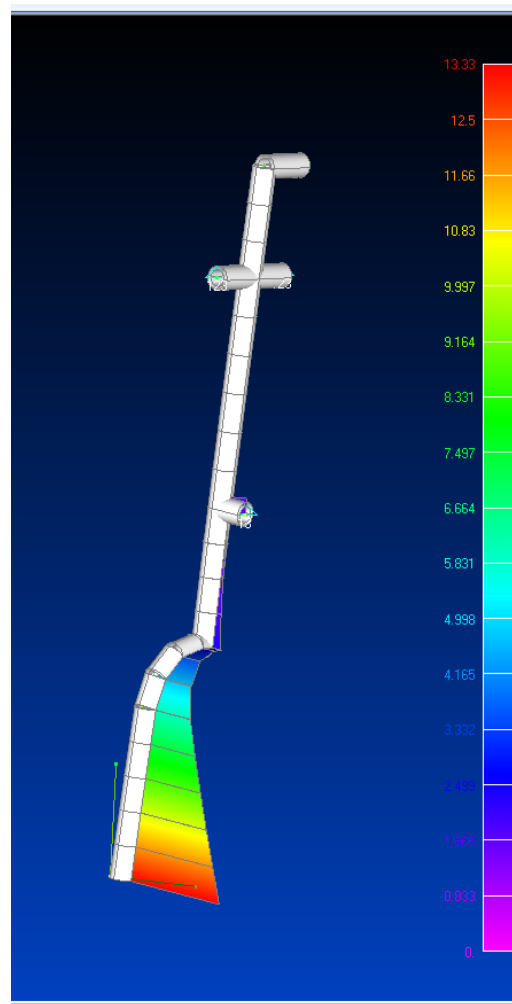
Model je zatížen třemi osamělými silami působícími v místě zavěšení příďového podvozkového kola. Každá síla působí v jedné ose a dohromady představují nejkritičtější případ zatížení.

Uzly výpočetní sítě, které leží na ose zatahování, mají zamezeny posuvy ve všech osách. Stejná vazebná podmínka je aplikována i na koncovém uzlu podvozkové nohy v místě, kde se připojuje ovládací táhlo. Tím se tento problém stává staticky určitým.

Na výpočtový model je aplikována lineární statická analýza, tedy základní typ řešení, který metoda konečných prvků nabízí. Jako pre-procesor a post-procesor byl použit program FEMAP 10.2.



*Rozložení redukovaného napětí
na příďové podvozkové noze*



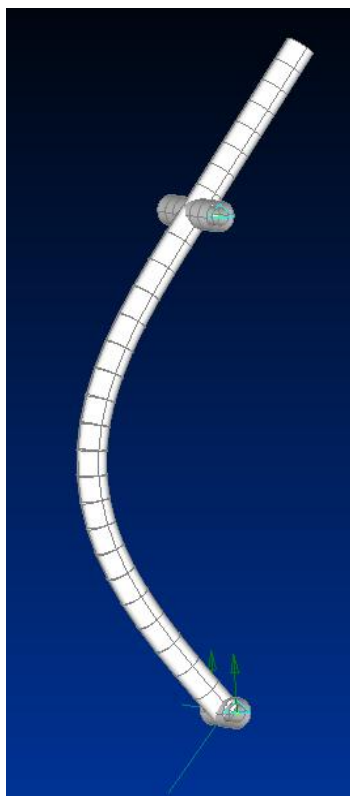
*Průběh deformačních posuvů
na příďové podvozkové noze*

Zlamovací vzpěra – část A

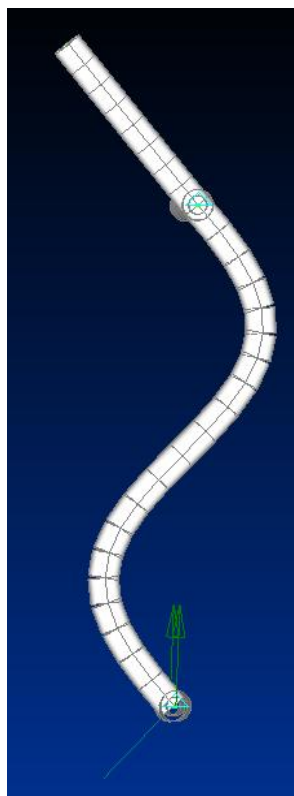
Model je zatížen osovou silou 4434 N, resp. na každé rameno koncového čepu je aplikována síla 2217 N.

Uzly sítě, které se nachází na čepu spojující části A a B, mají zakázány posuvy ve všech osách. Uzly sítě, na něž je aplikováno zatížení, mají zakázány radiální posuvy.

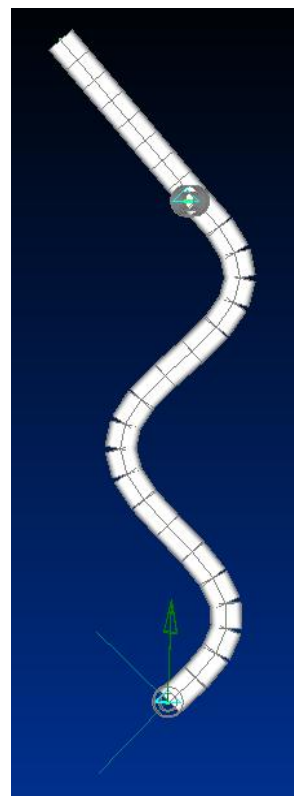
Je použit řešič BUCKLING. Výsledkem jsou první tři tvary ztráty stability a jim odpovídající součinitele rezervy.



1. tvar: $RF=2,54$



2. tvar: $RF=9,6$

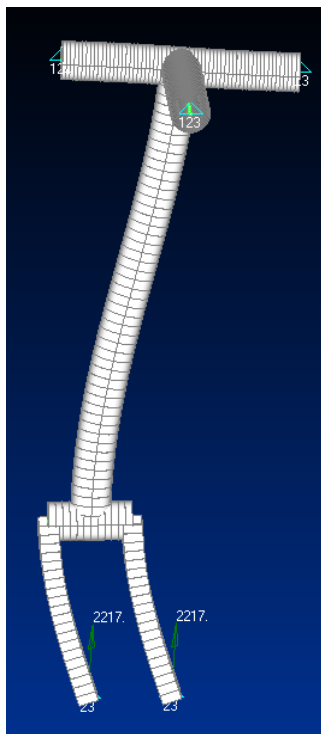


3. tvar: $RF=19,8$

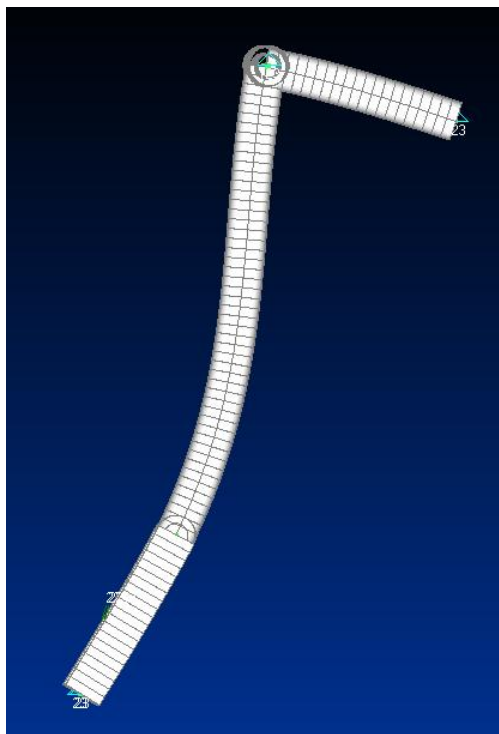
Výsledkem analytického výpočtu pro první tvar ztráty stability je součinitel rezervy 2,56 (viz kap. 5.1.2), což dobře odpovídá metodě MKP.

Zlamovací vzpěra – část B

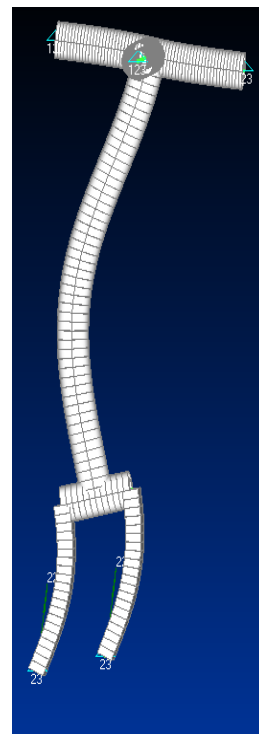
Model je vytvořen, zatížen a uložen zcela analogickým způsobem jako model části A. Je také použit stejný řešič.



1. tvar: $RF=3,6$



2. tvar: $RF=4,2$



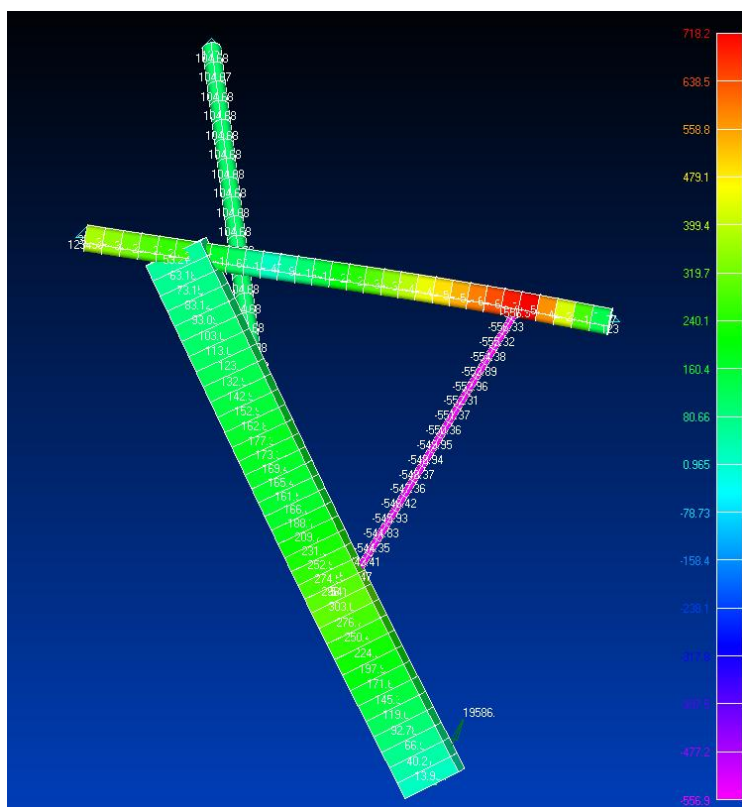
3. tvar: $RF=10,2$

Podle analytického výpočtu (kapitola 5.1.2) je součinitel rezervy 2,16 pro 1. tvar ztráty stability. Relativně výrazný rozdíl vzhledem k metodě konečných prvků lze vysvětlit rozdílným způsobem uložení (metoda konečných prvků lépe zohledňuje reálnou situaci). Obě výpočetní metody však shodně ukazují, že součást vydrží předpokládané namáhání.

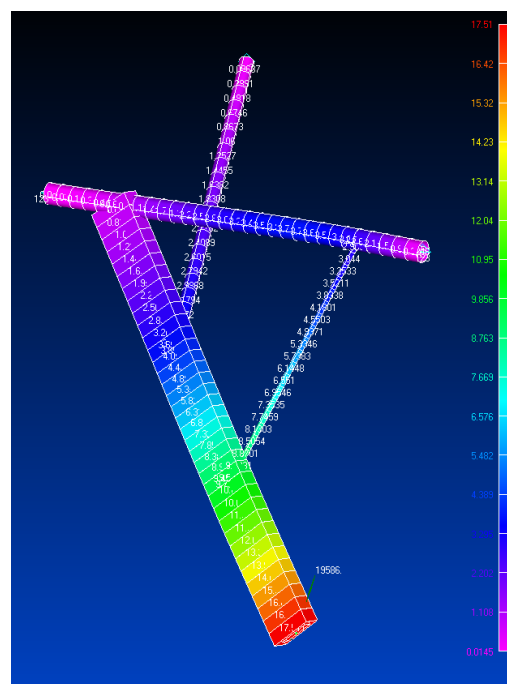
Hlavní podvozková noha, osa otáčení a tlumič

Model je zatížen třemi osamělými silami v místě uchycení podvozkového kola. Jednotlivé části celého kompletu jsou spojeny pomocí prvků RBE2, které mají omezeny stupně volnosti tak, aby simulovaly kloubové spoje, případně Kardanův závěs v místě spoje tlumiče a osy otáčení.

Přední konec osy otáčení je vetknut, čímž simuluje působení zámku podvozku. Druhý konec osy a také konec ovládací vzpěry mají zakázány posuvy.



Rozložení napětí na hlavním podvozku



Rozložení posuvů na hlavním podvozku

Podle ručního výpočtu (kap. 5.2.3) je nejvíce namáhán řez D-D, což je místo, kde se tlumič připojuje k ose otáčení podvozku. Zde bylo spočteno napětí přibližně 764 MPa. Výpočet metodou MKP předpovídá napětí 718,2 MPa. Při takto vysokých hodnotách napětí se jedná o poměrně dobrou shodu.