



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Rekonstrukce příčného řízení ultralehkého
letounu**

Redesign of UL airplane aileron control system

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Tomáš SKALICKÝ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Robert Theiner, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Skalický** Jméno: **Tomaš** Osobní číslo: **459876**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
 Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
 Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rekonstrukce příčného řízení ultralehkého letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Redesign of UL airplane aileron control system

Pokyny pro vypracování:

Provedte:

- popis stávajícího stavu
- konstrukční návrh úpravy transmisie příčného řízení vlivem posunutí křídla
- stanovení zatížení trasy řízení
- pevnostní kontrola transmisie

Seznam doporučené literatury:

Předpis letové způsobilosti UL-2/2019
 Stávající dokumentace k letounu

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Robert Theiner, Ph.D., ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Rekonstrukce příčného řízení ultralehkého letadla“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Roberta Theinera, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Zelenči 13. 08. 2020

Tomáš Skalický

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Robertu Theinerovi, Ph.D. za odborné vedení práce, velmi cenné a užitečné rady a za velkou ochotu při konzultacích.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Tomáš SKALICKÝ
Název BP:	Rekonstrukce příčného řízení ultralehkého letounu
Anglický název:	Redesign of UL airplane aileron control system
Rok:	2020
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí BP:	Ing. Robert Theiner, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 44
	počet obrázků 34
	počet tabulek 15
	počet příloh 1
Klíčová slova:	příčné řízení, ultralehký letoun
Keywords:	aileron control, microlight airplane

Anotace:

SKALICKÝ, T.: Rekonstrukce příčného řízení ultralehkého letounu: bakalářská práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2020, 44 stran. Vedoucí práce: THEINER, R.

Z důvodu posunutí křídla v předchozích pracích na letounu Typhoon ČVUT vzniklá potřeba upravit trasu příčného řízení. Tato bakalářská práce se zabývá návrhem rekonstrukce tohoto systému v souladu s předpisem UL-2, podle kterého letoun v budoucnosti získá typový průkaz.

Abstract:

SKALICKÝ, T.: Redesign of UL airplane aileron control system: bachelor thesis. Prague: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2020, 44 pages. Tutor: THEINER, R.

Due to displacement of the wing that has resulted from previous bachelor and diploma thesis on Typhoon ČVUT airplane a demand to redesign aileron control system has arisen. This bachelor work addresses a proposal of redesign of the aileron control system in accordance with UL-2 regulation under which the airplane will get its type certificate.

Obsah

1	Úvod.....	- 2 -
2	Popis stávajícího stavu.....	- 3 -
2.1	Popis současného stavu letounu Typhoon ČVUT	- 3 -
2.2	Popis současného stavu systému příčného řízení	- 5 -
2.2.1	Popis funkce systému příčného řízení.....	- 5 -
2.2.2	Popis mechaniky systému příčného řízení	- 8 -
3	Konstrukční návrh úpravy transmise vlivem posunutí křídla	- 11 -
3.1	Popis návrhu	- 12 -
3.2	Kinematika	- 15 -
3.2.1	Kontrola převodového poměru příčného řízení po rekonstrukci	- 15 -
4	Stanovení zatížení trasy řízení	- 17 -
4.1	Výpočet zatížení od kormidla.....	- 17 -
4.1.1	Výpočet provozního závěsového momentu.....	- 18 -
4.1.2	Výpočet provozního zatížení vstupující do střední části trasy řízení	- 19 -
4.1.3	Výpočet početního zatížení	- 20 -
4.1.4	Výpočet provozního zatížení prvků příčného řízení od závěsového momentu	- 20 -
4.1.5	Zatížení prvků příčného řízení silami od pilota	- 24 -
4.2	Výpočet zatížení prvků příčného řízení pro pevnostní kontroly (silami od pilota)	- 25 -
5	Pevnostní kontrola transmise.....	- 27 -
5.1	Kontrola páky (14) na ohyb.....	- 27 -
5.1.1	Stanovení geometrie	- 27 -
5.1.2	Stanovení zatížení prvku	- 28 -
5.1.3	Kontrola napjatosti.....	- 28 -
5.2	Kontrola čepu mezi pákou (14) a táhlem (13)	- 29 -
5.2.1	Stanovení geometrie	- 29 -
5.2.2	Stanovení zatížení prvku	- 29 -
5.2.3	Kontrola napjatosti.....	- 29 -
5.3	Kontrola táhla (3) na vzpěr	- 31 -
5.3.1	Stanovení geometrie	- 31 -
5.3.2	Stanovení zatížení prvku	- 33 -
5.3.3	Kontrola napjatosti.....	- 33 -

5.4	Kontrola táhla (13) na vzpěr	- 33 -
5.4.1	Stanovení geometrie	- 33 -
5.4.2	Stanovení zatížení prvku	- 35 -
5.4.3	Kontrola napjatosti.....	- 35 -
5.5	Kontrola táhla (17) na vzpěr	- 35 -
5.5.1	Stanovení geometrie	- 35 -
5.5.2	Stanovení zatížení prvku	- 37 -
5.5.3	Kontrola napjatosti.....	- 37 -
5.6	Kontrola předlohové trubky (5) na kombinaci ohybu a krutu	- 37 -
5.6.1	Stanovení geometrie	- 37 -
5.6.2	Stanovení zatížení prvku	- 38 -
5.6.3	Kontrola napjatosti.....	- 40 -
6	Závěr	- 42 -
7	Přílohy.....	- 43 -
8	Literatura	- 44 -

Seznam obrázků

Obrázek 1 TL-32 Typhoon.....	- 3 -
Obrázek 3 Trup Typhoon ČVUT – současný stav	- 4 -
Obrázek 2 Křídlo Typhoon ČVUT – současný stav	- 4 -
Obrázek 4 Půdorys křídélka	- 5 -
Obrázek 5 Schéma původního příčného řízení.....	- 6 -
Obrázek 6 Zástavba palivových nádrží	- 7 -
Obrázek 7 Výstup táhel z trupu (Zdroj [1])	- 8 -
Obrázek 8 Naměřená závislost $\delta_p = f(\delta_{kr})$	- 9 -
Obrázek 9 3D model návrhu mechanismu	- 11 -
Obrázek 10 3D model návrhu zástavby	- 11 -
Obrázek 11 Schematický obrázek návrhu transmise příčného řízení	- 12 -
Obrázek 12 Axiální pojištění páky (14)	- 13 -
Obrázek 13 Přínýtování páky k torzní trubce	- 14 -
Obrázek 14 Poloha sedadel vůči svislé rovině táhla (13)	- 15 -
Obrázek 15 Zatížení křídélka podle Předpisu (Zdroj: UL 2 část I_26.03.2019 - upraveno) .	- 17 -
Obrázek 16 Zatížení křídélka	- 19 -
Obrázek 17 Důležité konstrukční rozměry částí příčného řízení.....	- 20 -
Obrázek 18 Reakce vahadla (4)	- 21 -
Obrázek 19 Páka (2).....	- 21 -
Obrázek 20 Vahadlo (4)	- 22 -
Obrázek 21 Páka (12) / Páka (14)	- 22 -
Obrázek 22 Páka (16).....	- 23 -
Obrázek 23 Řídicí páka (18)	- 24 -
Obrázek 24 Ohyb řídicí páky.....	- 25 -
Obrázek 25 Trubka mezi řídicími pákami	- 26 -
Obrázek 26 Geometrie páky (14)	- 27 -
Obrázek 27 Geometrie cepu mezi pákou (14) a táhlem (13)	- 29 -
Obrázek 28 Stanovení tvarového součinitele K_p a $K_{0,2}$ (Zdroj: [8]).....	- 30 -
Obrázek 29 Geometrie táhel (3).....	- 32 -
Obrázek 30 Geometrie táhla (13).....	- 34 -
Obrázek 31 Geometrie táhla (17).....	- 36 -
Obrázek 32 Geometrie předlohové trubky (5)	- 38 -
Obrázek 33 Průběh krouticího momentu na předlohové trubce (5)	- 39 -
Obrázek 34 Průběh ohybového momentu předlohové trubky (5).....	- 40 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 Důležité parametry	- 5 -
Tabulka 2 Měření závislosti $\delta_p = f(\delta_{kr})$	- 9 -
Tabulka 3 Závislost převodového poměru na výchylce křídélka	- 10 -

Tabulka 4 Řídicí páka doprava ve směru letu	- 16 -
Tabulka 5 Řídicí páka doleva ve směru letu	- 16 -
Tabulka 6 Stanovení provozního momentu M_{lp1}	- 19 -
Tabulka 7 Důležité konstrukční rozměry částí příčného řízení.....	- 20 -
Tabulka 8 Důležité parametry páky (12)	- 28 -
Tabulka 9 Materiálové hodnoty duralu 2024T3	- 28 -
Tabulka 10 Parametry čepu mezi pákou (14) a táhlem (13)	- 29 -
Tabulka 11 Materiálové hodnoty oceli 11109.....	- 29 -
Tabulka 12 Parametry táhla (3)	- 32 -
Tabulka 13 Parametry táhla (13)	- 34 -
Tabulka 14 Parametry táhla (17).....	- 36 -
Tabulka 15 Parametry předlohové trubky (5)	- 38 -

Seznam použitého softwaru

Autodesk Inventor Professional 2019

Seznam použitých symbolů

Symbol	Definice	Jednotky
δ_p	Výchylka páky	[°]
δ_{kr}	Výchylka křídélka	[°]
i	Převodový poměr	[-]
\bar{W}	Průměrné provozní zatížení plochy	[Pa]
W	Velikost měrného lokálního zatížení na ploše	[Pa]
l_{kr}	Rozpětí křídélka	[m]
b_{kr}	Hloubka křídélka	[m]
$MTOM$	Maximální vzletová hmotnost	[kg]
index L	Provozní zatížení	[N]
index U	Početní zatížení	[N]
f	Součinitel bezpečnosti	[-]
index $'$	Zatížení od pilota	[N]
W_O	Průřezový modul v ohybu	[mm ³]
W_k	Průřezový modul v krutu	[mm ³]
J_z	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
j	Jistota	[-]
m	Počet střížných průřezů	[-]
M_O	Ohybový moment	[Nm]
M_k	Krouticí moment	[Nm]

1 Úvod

Ústav letadlové techniky FS ČVUT v 90. letech zakoupil ultralehký letoun TL-32 Typhoon se záměrem umožnit studentům získávat zkušenosti a psát závěrečné práce týkající se problémů s létající m letadlem. Práce na letounu pokračují s cílem získat od Letecké Amatérské Asociace ČR technický průkaz typu Z pro ultralehký letoun Typhoon ČVUT podle předpisu UL 2 [5] (dále jen Předpis).

Závěrem diplomové práce [1] bylo posunutí polohy křídla o 227mm vzad z důvodu zvýšení zásoby statické stability a vhodnějšího umístění vzpěry. Z těchto úprav vyplynula potřeba upravit ovládání křidélek – neboli rekonstruovat systém příčného řízení. Cílem této bakalářské práce bude vypracovat návrh konstrukčního řešení této úpravy.

Nejprve je vhodné zdokumentovat současný stav systému příčného řízení. Tomu bude věnována druhá kapitola.

Ve třetí kapitole bude představen návrh konstrukčního řešení úpravy systému příčného řízení. Vzhledem k úpravám křídla, kvůli kterým dochází k rekonstrukci, bude navrženo nové konstrukční řešení převodu příčného řízení v trupu – tj. od řídicí páky po vstup táhel řízení do křídla.

V souladu s Předpisem bude v čtvrté kapitole stanoveno zatížení trasy řízení, jehož výsledky budou základem pevnostním kontrolám.

Těm bude věnována pátá – poslední – kapitola.

2 Popis stávajícího stavu

2.1 Popis současného stavu letounu Typhoon ČVUT

Typhoon ČVUT je dvoumístný vzpěrový aerodynamicky ovládaný hornoplošník s tříkolovým podvozkem. Má kovové křídlo, namísto původního plátěného, se dvěma nosníky, které bylo navrženo na ČVUT. Trup je z duralových trubek. Posádka sedí vedle sebe v laminátové kabině. Pohonná jednotka Rotax 582 je umístěna na hlavním trupovém nosníku nad přídílí. Ocasní plochy jsou z duralových trubek s textilním potahem. Tento typ vznikl úpravami původního TL-32 Typhoon.



Obrázek 1 TL-32 Typhoon

Letoun je v době vzniku práce uložený v prostorách Ústavu letadlové techniky FS ČVUT v Praze. Křídla jsou od trupu odpojena. Motor je taktéž demontován.



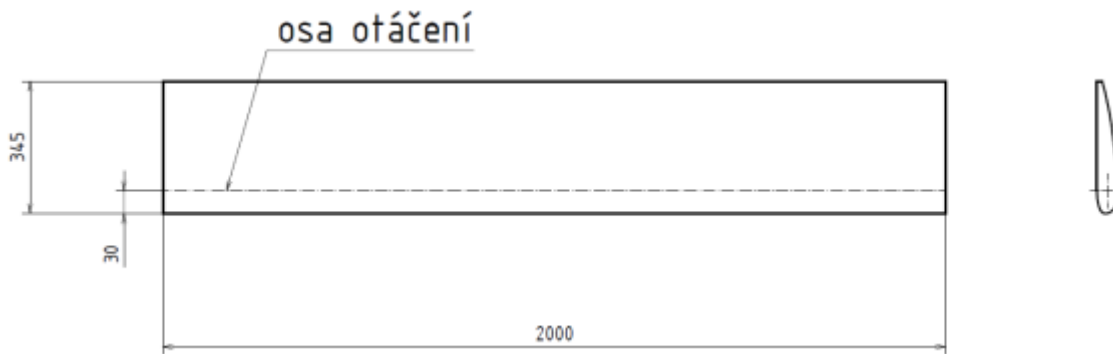
Obrázek 3 Trup Typhoon ČVUT – současný stav



Obrázek 2 Křídlo Typhoon ČVUT – současný stav

Do doby vzniku této práce bylo s cílem navrátit letadlo do provozu napsáno několik prací. Jejich souhrn, popis a přínos je popsán v [1]. Závěrem diplomové práce [1] bylo nejenom sjednocení poznatků z předchozích prací, ale i návrh zástavby avioniky, návrh úpravy zavěšení křídla a návrh posunutí křídla o 227mm dozadu. Důvodem pro tuto změnu bylo zvýšení statické stability a možnost umístění vzpěry křídla do roviny kolmé na podélnou osu letadla.

V některých pracích se nacházejí rozpory v naměřených rozměrech. Proto byly rozměry podstatné pro tuto práci přeměřeny a tím ověřeny. Na „Obrázek 4“ jsou tyto rozměry znázorněny a v „Tabulka 1“ jsou jejich hodnoty.



Obrázek 4 Půdorys křídélka

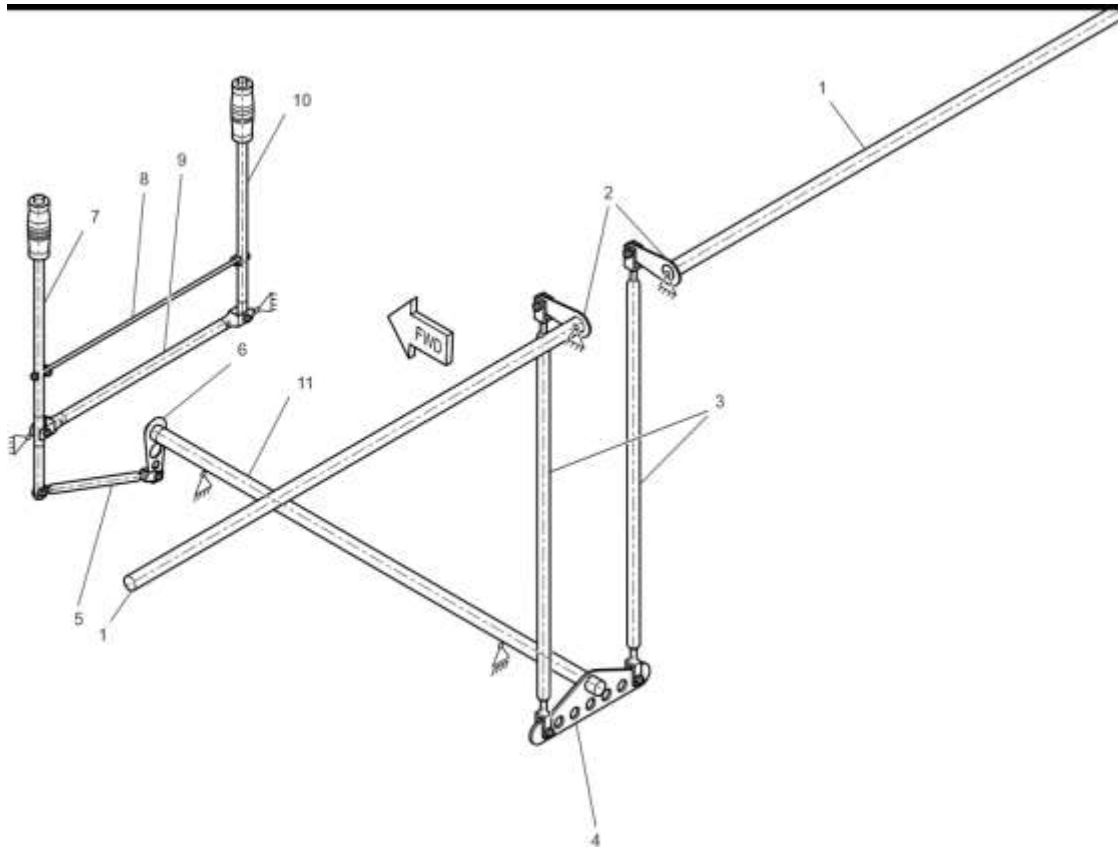
Tabulka 1 Důležité parametry

Parametr	Hodnota
Plocha křídla S [m ²]	11.5
Rozpětí křidel [m]	9,5
Maximální vzletová hmotnost MTOM [kg]	600
Hloubka křídélka b_{kr} [mm]	345
Hloubka křídélka b_{krSAT} [%]	28.75
Poloha osy otáčení od náběžné hrany o_{kr} [mm]	30
Rozpětí křídélka l [mm]	2000
Výchylka křídélka nahoru [°]	27
Výchylka křídélka dolů [°]	16

2.2 Popis současného stavu systému příčného řízení

2.2.1 Popis funkce systému příčného řízení

Původní řešení systému příčného řízení je schematicky znázorněno na „Obrázek 5“.



Obrázek 5 Schéma původního příčného řízení

Klonění letounu Typhoon ČVUT je realizováno opačným vychylováním křidélek. Soustava se dá rozdělit do dvou částí:

- část v trupu,
- část v křídle.

Část soustavy v trupu se skládá z páky řízení a soustavy táhel a pák. Řízení je zdvojené s řídicími pákami (7, 10) umístěnými mezi nohama posádky. Spodní části řídicích pák jsou spojeny trubkami (8, 9). Na úrovni spojení řídicích pák a trubky (8) jsou řídicí páky připevněny k duralové trubce konstrukce trupu. Od spodní části řídicí páky pilota vede táhlo (5) k páce (6). Horní část páky (6) je přichycená k torzní trubce (11). Torzní trubka (11) je uložena ve dvojici silonových pouzder, která jsou upevněna k příhradové konstrukci trupu. Torzní trubka (11) vede pod sedadly posádky do prostoru mezi sedadly a palivovými nádržemi. Zde je na ni uchyceno vahadlo (4), na jehož koncích jsou táhla (3). Tato táhla vedou přímo nahoru a otvorem opouští trup v horní části.

Část řízení v křídle se s částí v trupu spojí kulovou vazbou mezi koncem táhla z trupové části a pákou v části v křídle. Páky (2) jsou spojeny s trubkou (1), na kterou je ve dvou místech přichycený pákový mechanismus, který pohybuje křidélkem.

Pohyb řídicí páky (7, 10), který jeden z členů posádky provede, způsobí posun táhla (5). Pomocí trubek (8, 9) se pohyb páky (7 nebo 10) přenesou na druhou řídicí páku (10 nebo 7). Posun táhla (5) natočí páku (6) a s ní i torzní trubku (11). Toto natočení se přenesou na vahadlo (4) a způsobí

vychýlení táhel (2, 3) ve vertikálním směru. Jedno táhlo se posune nahoru a druhé dolů. Posunutí táhel (2, 3) způsobí natočení pák (2). Toto natočení je přeneseno na trubky (1), jejichž natočením se vychýlí pákový mechanismus, který vychýlí křídélka.

Soustava řízení v křídle, která byla navržena během jeho vývoje, je hotová a funkční a tato práce se nebude zabývat konstrukčními zásahy do této části. V této práci bude navrženo nového přepákování od vahadla (4) k pákám (2).

Soustava řízení v trupu je připevněna k příhradové nosné konstrukci trupu. K připevnění lze využít i konstrukci instalace palivových nádrží, která je umístěna za sedadly posádky.



Obrázek 6 Zástavba palivových nádrží

Nakonec bude nutné vyříznout nové otvory pro výstup táhel (3) z trupu. Současný tvar otvorů je patrný z „Obrázek 7“.



Obrázek 7 Výstup táhel z trupu (Zdroj [1])

2.2.2 Popis mechaniky systému příčného řízení

Pro nový návrh trasy řízení je nutné mít rozměry částí a z nich plynoucí kinematické poměry trasy řízení v křídle - tj. od pák (2) po křídélka. Vzhledem k nedochované dokumentaci křídla však potřebné rozměry nejsou dostupné, a tak je nutné mechanismus popsat znovu.

Nejjednodušší by bylo rozměry mechanismu změřit. Avšak rozměry potřebné pro další výpočty nebylo možné přímo změřit s uspokojivou přesností, protože díly nejsou příliš dobře dostupné. Z tohoto důvodu byla proměřena závislost výchylky křídélka na výchylce páky (2) – viz „Obrázek 8“.

Typickou charakteristikou závislosti je, že maximální hodnota výchylky kormidla nahoru je vyšší než maximální hodnota výchylky kormidla dolů. Tato charakteristika se nazývá diferenciací křidélek. Slouží ke snížení nepříznivého klonivě-zatáčivého momentu.

Ten vzniká, jelikož křídélko, jež se vychýlí dolů, způsobí nejen zvýšení vztlaku, ale i zvýšení odporu. Naopak křídélko, které se vychýlí nahoru, čímž klesne vztlak i odpor. Například vychýlení řídicí páky doprava způsobí vychýlení levého křídélka dolů a pravého křídélka nahoru. Tím se zvětší vztlaková síla na levém křídle a sníží na pravém křídle. To způsobí naklonění letounu doprava. Zároveň se však na levém křídle zvýší odporová síla a sníží odporová síla na pravém křídle, čímž dojde k nežádoucímu zatáčení letadla doleva.

Diferenciací křidélek se docílí zvýšení odporu křídélka vychýleného nahoru, čímž dojde ke snížení tohoto nepříznivého zatáčivého momentu.

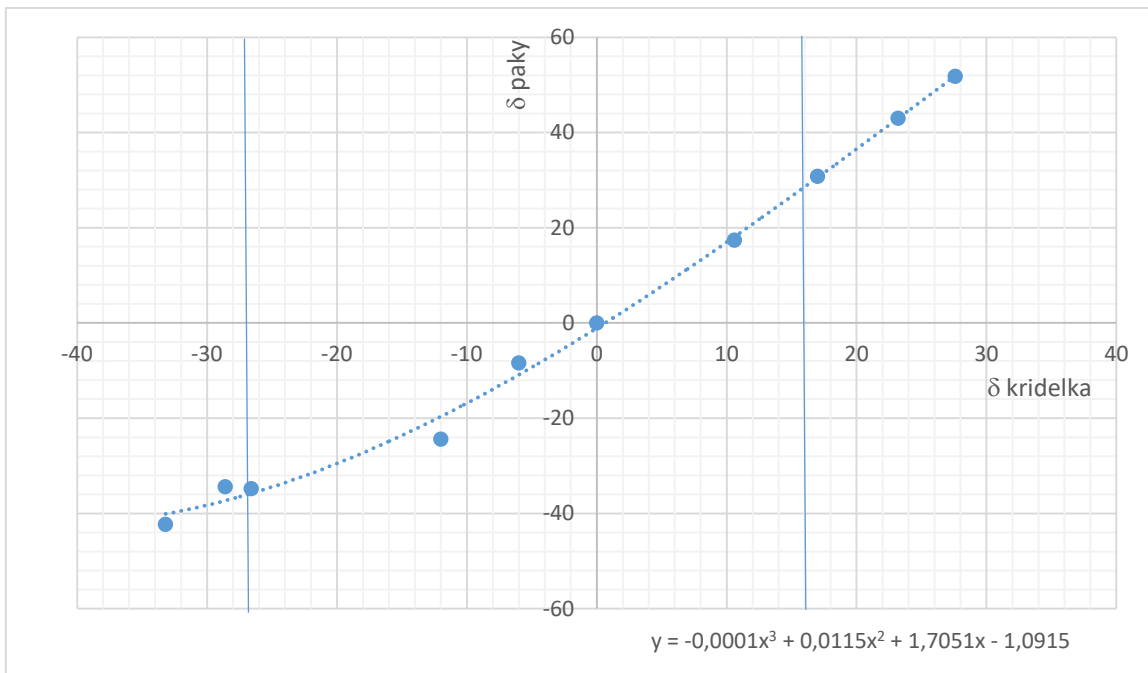
Standardně se uvádí závislost $\delta_{kr} = f(\delta_p)$, kde δ_p bývá výchylka řídicí páky. Avšak z důvodu lepší dostupnosti prvků byla závislost naměřena vychýlením křídélka o zvolený úhel a následným změněním výchylky páky. Tím byla naměřena závislost $\delta_p = f(\delta_{kr})$. Pro další výpočty bude pracováno s naměřenou závislostí.

Naměřené hodnoty jsou v „Tabulka 2“.

Tabulka 2 Měření závislosti $\delta_p = f(\delta_{kr})$

Měření	δ_p [°]	δ_{kr} [°]
1	0	0
2	10,6	17,4
3	17	30,8
4	23,2	43
5	27,6	51,8
6	-6	-8,4
7	-12	-24,4
8	-26,6	-34,8
9	-28,6	-34,4
10	-33,2	-42,3

Výsledkem měření je graf závislosti $\delta_p = f(\delta_{kr})$.



Obrázek 8 Naměřená závislost $\delta_p = f(\delta_{kr})$

Záporná výchylka křídélka znamená výchylku nahoru.

Křídélka jsou diferencovaná, což plyne z mírného zakřivení grafu ve třetím kvadrantu.

Hlavním poznatkem pro nadcházející výpočty však je, že směrnice tohoto grafu je převodový poměr mezi výchylkou páky (2) a výchylkou křídélka. Tím je pro účely této práce dostatečně popsáno chování části mechanismu v křídle. Kvůli diferencovaným křídélkům však nevychází převodový poměr lineární, a proto musí být zjištěny hodnoty převodového poměru v závislosti na výchylce kormidla. Hodnotu převodového poměru se určí jako směrnice křivky $\delta_p = f(\delta_{kr})$ v bodě δ_{kr} .

$$i(\delta_{kr}) = \delta'_p(\delta_{kr})$$

$$\delta_p = -0,0001 \delta_{kr}^3 + 0,0115 \delta_{kr}^2 + 1,7051 \delta_{kr} - 1,0915$$

$$i(\delta_{kr}) = \delta'_p = -0,0003 \delta_{kr}^2 + 0,0230 \delta_{kr} + 1,7051$$

Vypočítané hodnoty jsou v „Tabulka 3“.

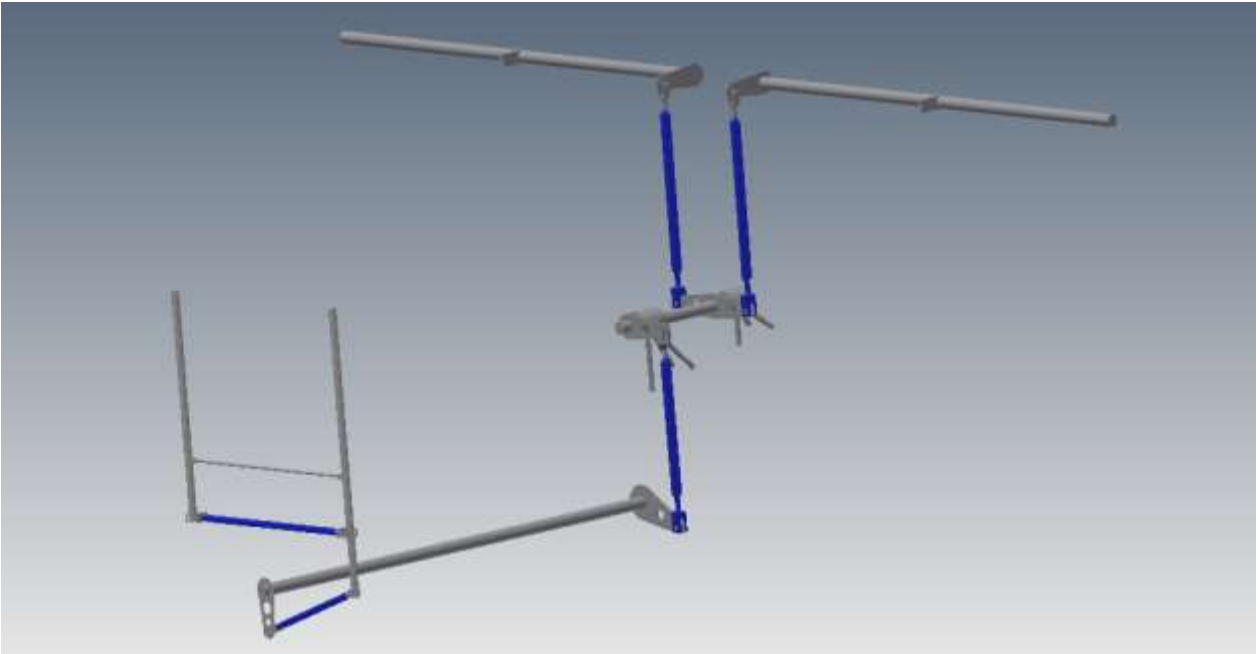
Tabulka 3 Závislost převodového poměru na výchylce křídélka

δ_{kr} [°]	-27	-21	-14	-7	4	8	12	16
δ_p [°]	-35,69	-29,81	-21,34	-11,34	7,00	14,33	21,94	29,82
i [-]	0,8654	1,0898	1,3243	1,5294	1,7923	1,8699	1,9379	1,9963

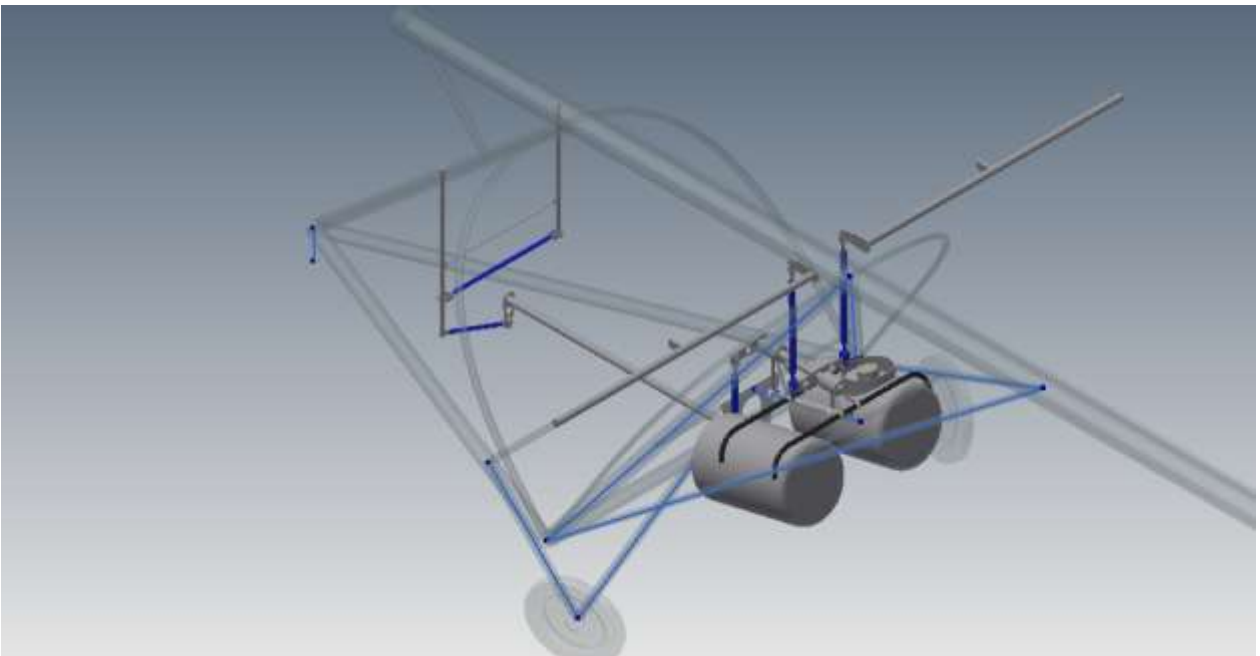
3 Konstrukční návrh úpravy transmise vlivem posunutí křídla

K návrhu úpravy byl použit software Autodesk Inventor Profesional 2019. Základem modelu byla sestava příhradové konstrukce trupu z práce [1]. Do této konstrukce byla namodelována sestava trupové části mechanismu příčného řízení. Výstřižek modelu je na „Obrázek 9“ a „Obrázek 10“. Schematicky je model znázorněný na „Obrázek 11“. Modely ve formátech .step a .iam jsou dostupné jako přílohy k této práci a také na adrese:

https://drive.google.com/folderview?id=1ur0boWn3u6QfqptZr8iM_JmEseoGfBeS.



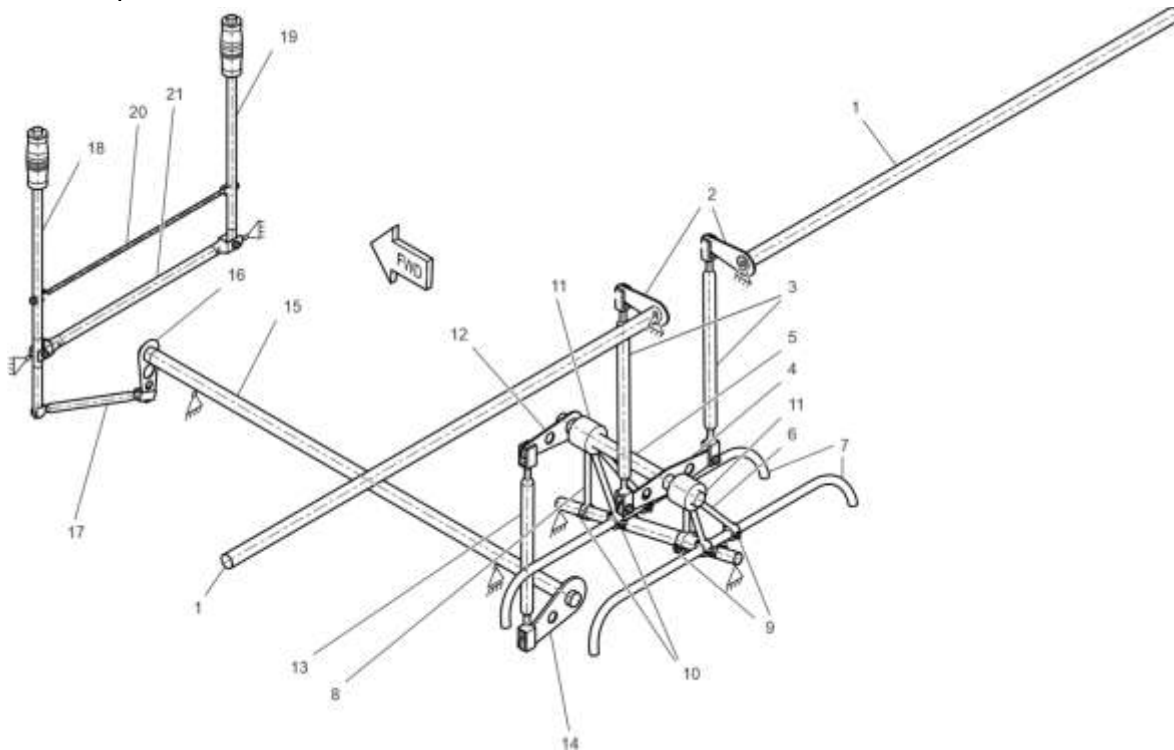
Obrázek 9 3D model návrhu mechanismu



Obrázek 10 3D model návrhu zástavby

Nejjednodušší konstrukční úpravou trasy příčného řízení by bylo prodloužení torzní trubky (11) z „Obrázek 5“ o 227mm dozadu, vyvedení táhel (3) nahoru ke křídlu, tak jako tomu bylo doposud, a uchycení vahadla (4) k příhradové konstrukci trupu podobným způsobem, jako tomu bylo dosud. Toto však nebylo možné kvůli zástavbě palivových nádrží. Bylo tedy nutné palivové nádrže obejít.

3.1 Popis návrhu



Obrázek 11 Schematický obrázek návrhu transmise příčného řízení

Části jsou zobrazené na schematickém obrázku (viz „Obrázek 11“). Původní zástavba má od řídicích pák (18 a 19) až po spodní torzní trubku (15) pouze jednu změnu. Ta se týká dorazů.

Dorazy budou navrženy tak, aby zabránily vychylce křidélek větší, než je jejich maximální výchylka – tj. 27° nahoru. Doraz bude umístěn u upevnění trubky (21) na řídicích pákách (18, 19). Bude se sestávat ze stavěcího šroubu, který se bude zašroubovat do vidlic trubky (21) tak, aby při dosažení výchylky řídicí páky odpovídající maximální výchylce křidélek dosedl na řídicí páku a tím zamezil jejímu dalšímu vychýlení.

Páka (14) je nakloněná o 20° vůči horizontální rovině podle geometrie původního vahadla. Oproti původnímu vahadlu je páka (14) z důvodu úspory váhy jednoramenná. Axiální pohyb páky (14) je vyloučen z jedné strany přinýtováním páky (14) k přírubě přišroubované k torzní trubce (15) a z druhé strany opřením o konzolu silonového pouzdra. To je přichyceno k plechu, který je pevně spojen s příhradovou konstrukcí trupu. Axiální zajištění je řešeno stejně, jako bylo řešeno na původní zástavbě (viz „Obrázek 12“).



Obrázek 12 Axiální pojištění páky (14)

Vahadlo (4) a páky (12, 14) byly navrženy tak, aby všechny měly stejná ramena. Ta byla zmenšena z původních 110mm na 100mm kvůli zvětšení mezery mezi vahadlem (4) a hrdlem palivové nádrže. Volbou stejných ramen vahadla (4) a pák (12, 14) se zajistí konstantní převodový poměr trupové části soustavy. Jediný převodový poměr v řízení bude zajištěn mezi pákami (2) a křídélky. Tím se mechanismus zjednodušil. Oka vahadla (4) a pák (12, 14) pro spojení s táhlem zajišťují kulovou vazbu pomocí kulového ložiska zaválcovaného pomocí zaválcovacího zařízení podle ONL 8612.

Táhlo (13) propojuje páky (14) a (12). Konce táhla budou opatřeny vidlicí přinýtovanou k trubce táhla. Jeden konec táhla (13) bude mít stavitelnou vidlici podle ONL 3774. Ta bude sloužit k seřízení délky táhla (13) při montáži. Na druhém konci bude k táhlu (13) přinýtovaná vidlice pevná podle ONL 3776. K pákám (12, 14) bude táhlo připojeno čepem spojujícím oka pák a otvory vidlic. Oproti původnímu táhlu je přibližně poloviční délky.

Páka (12) je výrobně stejný kus jako páka (14). Liší se tím, že při nulové výchylce křidélek je přímka spojující osu otáčení páky (12) se středem oka páky (12) vodorovná. Přední část páky (12) ve směru letu bude přinýtována k přírubě, která bude přinýtována k předlokové torzní trubce (5), obdobně jako je uchycena páka (14), viz „Obrázek 13“. Zadní část ve směru letu bude opřena přírubou páky (12) o přední silonové pouzdro (11).



Obrázek 13 Přinýtování páky k torzní trubce

Přední i zadní konzola kluzného ložiska (11) bude přivařená k prutům konzoly (6, 8). Proto budou vyrobeny ze svařitelné oceli. Do konzol bude vloženo silonové pouzdro ukládající předlohou torzní trubku (5).

Předlohou torzní trubka (5) bude vyrobena z duralu, který je jedním z nejpoužívanějších materiálů v letectví, neboť má relativně nízkou měrnou hmotnost a dobré pevnostní charakteristiky. Předlohou torzní trubka (5) bude uložena ve dvojici kluzných ložisek. Přední ložisko ve směru letu bude pojištěno proti axiálnímu posuvu.

Pruty konzoly (6, 8) se budou skládat z předního prutu a bočních prutů. Ty budou orientované dozadu ve směru letu. Pruty budou ke konzole kluzných ložisek (11) přivařené tak, aby se osy všech prutů protínaly v jednom bodě, který musí ležet na ose předlohou torzní trubky (5). Tím budou vyloučena smyková a ohybová zatížení. Na druhém konci bude přivařená jedna část dvoudílné objímky (9, 10), s jejíž pomocí budou pruty konzoly připevněny svěrným spojem ke konstrukci. Pruty orientované dozadu budou přenášet boční zatížení do dostatečně tuhé konstrukce zavěšení palivových nádrží a přední pruty budou přenášet svislá zatížení do dostatečně tuhé příhradové konstrukce letadla.

Vahadlo (4) bude dvouramenná přímá páka. Rameno bude zmenšeno proti původním 110mm na 100mm pro zvětšení mezery mezi vahadlem (4) a hrdlem ve směru letu pravé palivové nádrže. Do otvorů pro připojení táhel (3) bude zaválcované kulové ložisko pro vytvoření kulové vazby stejně jako u pák (12, 14). Střední vzdálenost páky (12) a vahadla (4) je 227mm, která odpovídá posunutí křídla.

Z pevnostního hlediska by bylo vhodné umístit vahadlo (4) a páku (12) mezi ložiska, aby nevznikl nosník s převislým koncem. To však nebylo možné z důvodu blízkosti sedadel posádky (viz „Obrázek 14“).



Obrázek 14 Poloha sedadel vůči svislé rovině táhla (13)

Táhla (3) jsou konstrukčně obdobná s táhlem (13). Oproti původním táhlům mají přibližně poloviční délku.

Páky (2) zůstanou nezměněné.

3.2 Kinematika

3.2.1 Kontrola převodového poměru příčného řízení po rekonstrukci

Pro kinematiku převodu primárního řízení platí podmínky §143 Předpisu, který říká: „*Letoun musí být schopen provádět za všech pravděpodobných letových podmínek plynulý přechod z jedné letové polohy do druhé (včetně zatáček, pokud jsou na základě konfigurace možné) bez mimořádných nároků na pilotní dovednost, pohotovost a sílu pilota a bez nebezpečí překročení provozních násobků při každé přípustné změně výkonu motoru nebo jeho náhlém vysazení. Mírné odchylky od doporučených postupů nesmí vést k nebezpečné letové situaci.*“

Proto je nutné zkontrolovat, zda změna ve zrekonstruované trupové části soustavy příčného řízení nezpůsobila nežádoucí změnu v převodu.

Kontrola kinematiky byla provedena pomocí 3D modelu následujícím postupem:

1. V modelu byla vychýlena páka (2) postupně o 5°, 10°, 20°, 30° nahoru.
2. Byla změřena výchylka druhé páky (2).
3. Byla změřena výchylka řídicí páky (18).

4. Podle převodového poměru mezi pákou (2) a křídélkem $\delta_p = -0,0001 \delta_{kr}^3 + 0,0115 \delta_{kr}^2 + 1,7051 \delta_{kr} - 1,0915$ byla vypočtena výchylka křídélka.
5. Body 1-4 byly zopakovány pro druhou páku (2).

Naměřené hodnoty jsou v „Tabulka 4“ a „Tabulka 5“.

Tabulka 4 Řídicí páka doprava ve směru letu

δ_p nahoru [°]	5	10	20	30	40
δ_{kr} nahoru [°]	2	5,5	12	21	33
δ_p dolů [°]	4,99	9,98	19,90	29,60	38,76
δ_{kr} dolů [°]	3	6	11	17	22
$\delta_{\check{r}p}$ [°]	2,77	7,99	10,44	14,80	18,50

Tabulka 5 Řídicí páka doleva ve směru letu

δ_p nahoru [°]	5	10	20	30	40
δ_{kr} nahoru [°]	2	5,5	12	21	33
δ_p dolů [°]	5,01	10,01	19,95	29,68	38,87
δ_{kr} dolů [°]	3	6	11	17	22
$\delta_{\check{r}p}$ [°]	2,77	7,99	10,44	14,80	18,50

Porovnáním naměřených hodnot výchylek křidélek s hodnotami naměřenými v kapitole 2.2.2 a v „Tabulka 4“ a „Tabulka 5“ bylo zjištěno, že převodový poměr nově navržené transmisy příčného řízení má velmi podobný průběh s původním poměrem. Novou konstrukcí se tedy nijak zásadně neovlivní vlastnosti řízení.

4 Stanovení zatížení trasy řízení

K dimenzování, pevnostní kontrole a zaručení, že konstrukční řešení odpovídá požadavkům Předpisu, je nutné stanovit zatížení v systému příčného řízení.

Předpis rozlišuje dva typy zatížení:

- Provozní
- Početní.

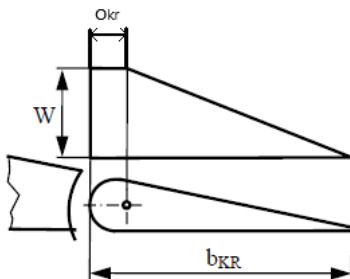
Provozní zatížení je maximální zatížení, které lze očekávat v provozu. Při provozním zatížením nesmí v jakékoliv části konstrukce dojít k trvalé deformaci (§305). Vzniklé deformace nesmí nikterak ohrozit provoz. Provozní zatížení budou značena dolním indexem L podle anglického „limit“.

Početní zatížení se z provozního zatížení získá vynásobením příslušným součinitelem bezpečnosti. Pokud je konstrukce vystavena početnímu zatížení, nesmí dojít alespoň 3 sekundy k její poruše (§305). Početní zatížení budou značena dolním indexem U podle anglického „ultimate“.

Ideálním způsobem vyšetření zatížení řídicích ploch by bylo měření v aerodynamickém tunelu, ze kterého by bylo možné získat hodnoty závěsových momentů kormidel v závislosti na jejich výchylce a úhlu náběhu případně vybočení. Tyto podklady k danému letounu nejsou k dispozici, proto pro stanovení zatížení bude použit §455 z Předpisu.

4.1 Výpočet zatížení od kormidla

Postup stanovení zatížení vychází z přílohy III. „Jednotková zatížení zadní části letounu“ Předpisu. V této příloze je rovnice (viz níže), ze které se ze základních parametrů letadla dá vypočítat průměrné provozní zatížení plochy \bar{W} .



Obrázek 15 Zatížení křídélka podle Předpisu (Zdroj: UL 2 část I_26.03.2019 - upraveno)

$$\bar{W} = 17,24 \cdot \frac{MTOM}{S} = 17,24 \cdot \frac{600}{11,5} = 899,48 \text{ Pa}$$

Předpis vyžaduje, aby byla pro výpočty volena hodnota $\bar{W} \geq 575 \text{ Pa}$. To je splněno, a pro další výpočty tudíž bude použita vypočtená hodnota zatížení \bar{W} .

4.1.1 Výpočet provozního závěsového momentu

Předpis uvažuje zjednodušené schéma zatížení řídicí plochy, jehož rozložení po hloubce je na „Obrázek 15“. Po rozpětí se většinou zatížení uvažuje v poměru kořenové a koncové hloubky. Vzhledem k obdélníkovému půdorysu - tzn. $b_{kr}(l_{kr}) = konst.$ - bude rozložení po rozpětí konstantní. Výslednou provozní sílu F_L lze tedy stanovit vynásobením průměrného provozního zatížení plochy \bar{W} plochou křídélka:

$$F_L = \bar{W} \cdot S_{kr} = 899,48 \cdot 2 \cdot 0,345 = 620,64 \text{ N.}$$

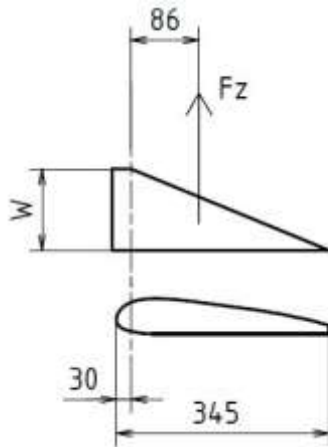
Velikost provozního závěsového momentu M_{zL} je dána vztahem:

$$|M_{zL}| = |F_L \cdot (x_T - o_{kr})|.$$

K jeho určení je nutné zjistit polohu působišť x_T provozní síly F_L . Tato poloha je dána poměrem součtu statických momentů jednotlivých ploch obrazců průběhu měrného lokálního zatížení k celkové síle.

$$\begin{aligned} x_T &= \frac{\sum_{i=1}^2 F_i x_i}{F} = \frac{F_1 x_1}{F} + \frac{F_2 x_2}{F} = \frac{W \cdot o_{kr} \cdot \frac{o_{kr}}{2}}{F_1 + F_2} + \frac{\frac{1}{2} W (b_{kr} - o_{kr}) \cdot (o_{kr} + \frac{1}{3} (b_{kr} - o_{kr}))}{F_1 + F_2} \\ &= \frac{W \cdot \frac{o_{kr}^2}{2} + \frac{1}{2} W \cdot o_{kr} (b_{kr} - o_{kr}) + \frac{1}{6} W (b_{kr} - o_{kr})^2}{W \cdot o_{kr} + \frac{1}{2} W (b_{kr} - o_{kr})} \\ &= \frac{\frac{W \cdot o_{kr} \cdot b_{kr}}{2} + \frac{1}{6} W (b_{kr}^2 - 2 \cdot o_{kr} \cdot b_{kr} + o_{kr}^2)}{\frac{W}{2} [b_{kr} + o_{kr}]} \\ &= \frac{\frac{W \cdot o_{kr} \cdot b_{kr}}{6} + \frac{W b_{kr}^2}{6} + \frac{W \cdot o_{kr}^2}{6}}{\frac{W}{2} [b_{kr} + o_{kr}]} = \\ & x_T = \frac{1}{3} \cdot \frac{o_{kr}^2 + o_{kr} \cdot b_{kr} + b_{kr}^2}{b_{kr} + o_{kr}} \\ x_T &= \frac{1}{3} \cdot \frac{0,03^2 + 0,03 \cdot 0,345 + 0,345^2}{0,345 + 0,03} = 0,116 \text{ m} \end{aligned}$$

Poloha působišť provozní síly F_L je 116mm od náběžné hrany křídélka.



Obrázek 16 Zatížení křídélka

Provozní závěsový moment se tedy vypočítá podle vztahu:

$$|M_Z| = |F_L \cdot (x_T - o_{kr})|$$

$$M_Z = 620,64 \cdot (0,116 - 0,03) = 53,38 \text{ Nm}$$

4.1.2 Výpočet provozního zatížení vstupující do střední části trasy řízení

Cílem výpočtů je však provozní zatížení ve střední části trasy řízení, tj. mezi pákou v křídle a řídicí pákou. K tomuto je nutné znát převodový poměr mezi výchylkou křídélka a výchylkou páky spojující trasu řízení v křídle a v trupu $\delta_p = f(\delta_{kr})$. Tato závislost byla stanovena v „Tabulka 6“.

Jelikož směrem od křídélka k páce je převod do rychla (na křídélku je menší výchylka než na páce – mimo výchylku křídélka -27°), bude provozní moment na páce:

$$M_{p1}(\delta_{kr}) = \frac{M_Z}{i(\delta_{kr})}$$

 Tabulka 6 Stanovení provozního momentu M_{p1}

δ_{kr} [°]	-27	-21	-14	-7	4	8	12	16
i [-]	0,8654	1,0898	1,3243	1,5294	1,7051	1,7923	1,8699	1,9379
M_Z [Nm]	53,38	53,38	53,38	53,38	53,38	53,38	53,38	53,38
M_{p1} [Nm]	61,68	48,98	40,31	34,90	29,78	28,55	27,55	26,74

Maximální očekávané zatížení v provozu (neboli provozní zatížení M_{Lp1}) vstupující do trupové části trasy řízení vznikne podle Tabulka 6 při výchylce křídélka 27° nahoru.

Jeho velikost se získá vynásobením největší dosažené hodnoty $M_{p1} = 61,68 \text{ Nm}$ koeficientem 1,25 podle §395 Předpisu. Podle §395: „všechny části hlavní soustavy řízení mezi dorazem a řídicí plochou musí být navrženy na zatížení, které odpovídá přinejmenším 125 % zatížení řídicích ploch podle bodů UL 2 § 423 a UL 2 § 441 a rovněž podle bodu UL 2 § 455“.

$$M_{Lp1} = 61,68 \cdot 1,25 = 77,10 \text{ Nm}$$

4.1.3 Výpočet početního zatížení

Pro určení početního zatížení je nutné zjistit, jaký součinitel bezpečnosti stanovuje Předpis a zda nařizuje použití pomocných součinitelů bezpečnosti.

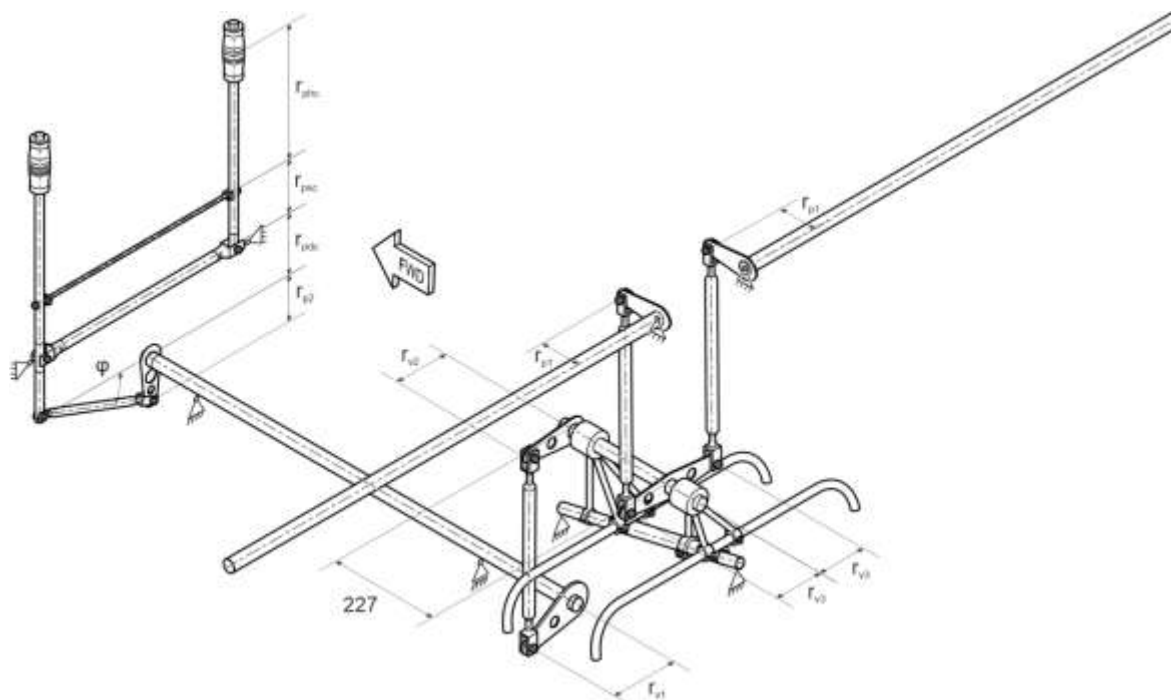
Podle §303 musí být použit součinitele bezpečnosti 1,5, pokud není stanoveno jinak.

$$M_{Up1} = M_{Lp1} \cdot f = 77,10 \cdot 1,5 = 115,65 \text{ Nm}$$

4.1.4 Výpočet provozního zatížení prvků příčného řízení od závěsového momentu

V tomto odstavci budou uvažována všechna zatížení jako provozní.

K výpočtu silových poměrů byly z modelu odečteny všechny potřebné rozměry. Tyto rozměry jsou zobrazené na „Obrázek 17“ a jejich velikosti v „Tabulka 7“.



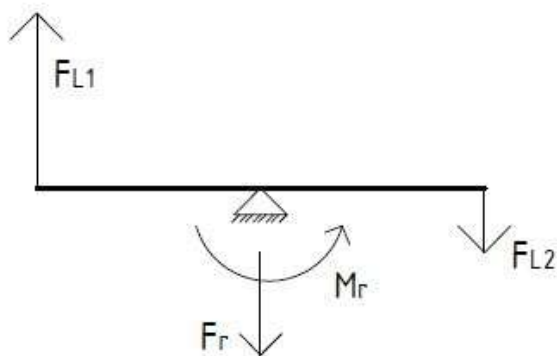
Obrázek 17 Důležité konstrukční rozměry částí příčného řízení

Tabulka 7 Důležité konstrukční rozměry částí příčného řízení

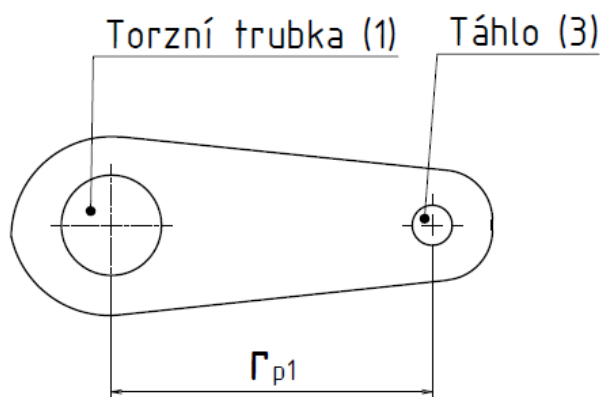
Rozměr	Velikost
r_{v1}, r_{v2}, r_{v3} [mm]	100
r_{p1} [mm]	80
r_{p2} [mm]	100
r_{pdc} [mm]	115
r_{psc} [mm]	110
r_{phc} [mm]	290
φ [°]	15

Vzhledem k nelineárnímu převodovému poměru budou závěsové momenty od jednotlivých křidélek různé, jelikož při výchylce jednoho křídélka o -27° bude druhé křídélko vychýleno o $+16^\circ$.

Od křídélka vychýleného nahoru (-27°) bude do trasy zaváděn provozní moment $M_{Lp1up} = 51,63 \text{ Nm}$. Od křídélka vychýleného dolů ($+16^\circ$) bude do trasy zaváděn provozní moment $M_{Lp1down} = 26,74 \cdot 1,25 = 33,43 \text{ Nm}$. Tento rozdíl způsobí na vahadle (4) reakční provozní sílu a provozní moment, viz „Obrázek 18“. Tyto reakce budou důležité pro dimenzování ložiska uložení předlohové torzní trubky.



Obrázek 18 Reakce vahadla (4)



Obrázek 19 Páka (2)

Táhlo (3) mezi pákou (2), (viz „Obrázek 19“) a vahadlem (4) je při výchylce křídélka nahoru namáháno tahovou silou F_{L1up} , jejíž velikost se určí ze vztahu:

$$F_{L1up} = \frac{M_{Lp1up}}{r_{p1}} = \frac{77,10}{0,08} = 963,75 \text{ N}.$$

Druhé táhlo (3) je navázáno na křídélko, které je vychýleno dolů. Toto táhlo je namáháno tlakovou silou F_{L1down} , která se vypočítá z rovnice:

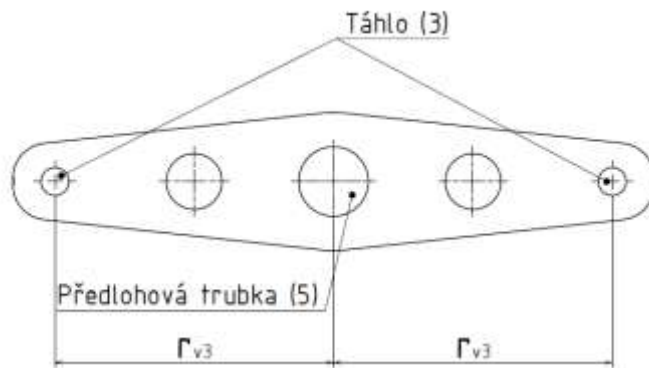
$$F_{L1down} = \frac{M_{Lp1down}}{r_{p1}} = \frac{33,43}{0,08} = 417,88 \text{ N}.$$

Síly z táhel jsou přenášeny na vahadlo (4), (viz „Obrázek 20“), na kterém vyvolají moment M_{Lv1} . Jeho velikost je dána vztahem:

$$M_{Lv1} = r_{v1} \cdot (F_{L1up} + F_{L1down}) = 0,1 \cdot (963,75 + 417,88) = 138,16 \text{ Nm.}$$

Vahadlo (4) a páka (12), (viz „Obrázek 21“) jsou spojeny předlohovou torzní trubkou (5). Budeme-li předpokládat bezztrátový přenos energie mezi vahadly a torzní trubkou zanedbáním třecích ztrát v ložiskách a ztrát elastickými deformacemi torzní trubky, vahadla a páky, bude moment na páce (12) stejný jako na vahadle (4):

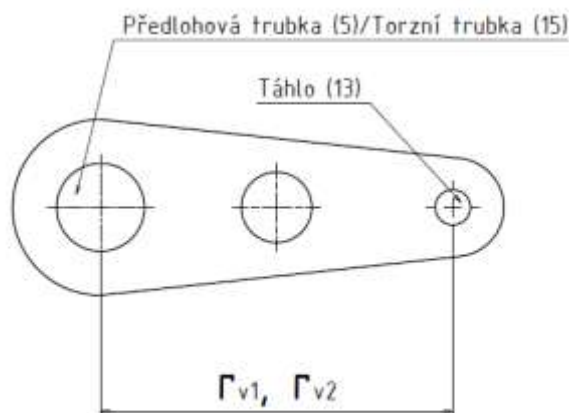
$$M_{Lv1} = M_{Lv2} = 138,16 \text{ Nm.}$$



Obrázek 20 Vahadlo (4)

Na táhlo (13), které je připojeno k páce (12), se přenesou moment M_{Lv2} . Tento moment vyvolá v táhlu tahovou/tlakovou sílu F_{L2} :

$$F_{L2} = \frac{M_{Lv2}}{r_{v2}} = \frac{138,16}{0,1} = 1381,6 \text{ N.}$$

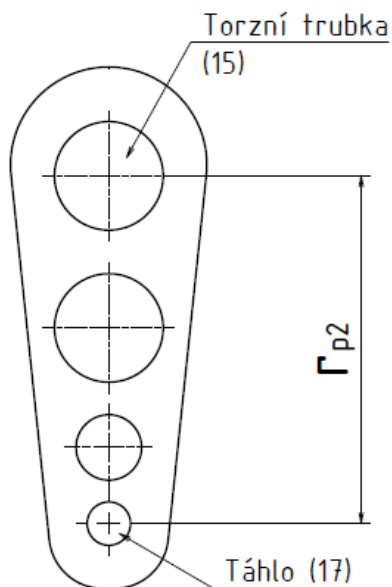


Obrázek 21 Páka (12) / Páka (14)

Síly F_{L2} vytvoří silovou dvojici M_{Lv3} na páce (14), (viz „Obrázek 21“). Silová dvojice o velikosti

$$M_{Lv3} = F_{L2} \cdot r_{v3} = 1381,6 \cdot 0,1 = 138,16 \text{ Nm}$$

je - s předpokladem zanedbání ztrát - přenesena torzní trubkou (15) na páku (16), (viz „Obrázek 22“).



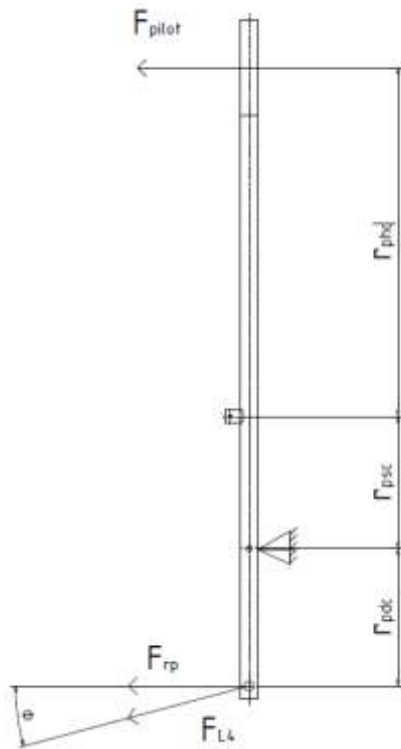
Obrázek 22 Páka (16)

Moment M_{Lv3} přivedený na páku (16), vyvolá tahovou/tlakovou sílu F_{L4} v táhlu (17):

$$F_{L4} = \frac{M_{Lv3}}{r_{p2}} = \frac{138,16}{0,08} = 1726,99 \text{ N.}$$

Táhlo (17) působí průmětem síly F_{L4} do horizontální roviny na řídicí páku (18), (viz „Obrázek 23“). Průmět je označen symbolem F_{rp} . Tato síla je vyrovnána silou od pilota F_{pilot} .

$$F_{pilot} = \frac{F_{rp} \cdot r_{pdc}}{r_{phc}} = \frac{F_{L4} \cdot \cos \varphi \cdot r_{pdc}}{r_{phc}} = \frac{1726,99 \cdot \cos 15^\circ \cdot 0,115}{0,4} = 479,59 \text{ N}$$



Obrázek 23 Řídící páka (18)

4.1.5 Zatížení prvků příčného řízení silami od pilota

§399 Předpisu nařizuje, aby v případě dvojího řízení byla soustava „navržena pro následující zatížení:

- a) současné působení obou pilotů stejným směrem a
- b) současné působení obou pilotů opačným směrem,

přičemž se uvažuje pro oba piloty 75 % sil uvedených v bodě UL 2 § 397.“

§397 Předpisu dále nařizuje, aby „všechny řídicí soustavy k bezprostřednímu řízení letounu kolem jeho podélné, příčné nebo svislé osy (hlavní soustava řízení) a jiné soustavy řízení, které mají vliv na chování letounu za letu, stejně tak jako místa jejich uchycení nebo podepření, musí být navrženy až po dorazy (poslední připojení) na provozní zatížení, která jsou definována v tabulce sil od pilota.“ Tabulka stanovuje pro soustavu příčného řízení působící sílu 20daN.

Síla, pro kterou musí být podle Předpisu navržena soustava je tedy:

$$F_{UL-2} = 2 \cdot 0,75 \cdot 20 = 30daN = 300N.$$

V odstavci 4.1.4 Výpočet provozního zatížení prvků příčného řízení od závěsového momentu byla vypočítána celková síla v řídicí páce od zatížení od kormidla $F_{pilot} = 479,59 N = 47,959 daN$. Tato hodnota je vyšší než F_{UL-2} , na kterou mají být navrženy všechny prvky příčného řízení až po dorazy. Zatížení, na které budou dimenzovány části soustavy až po dorazy, lze tedy vynásobit koeficientem α :

Pokud: (Vypočítané zatížení F_{pilot}) > (Zatížení z §397 Předpisu), pak

$$\alpha = \frac{\text{Zatížení z §397 Předpisu}}{\text{Vypočítané zatížení } F_{pilot}} = \frac{30}{47,959} = 0,626 [-].$$

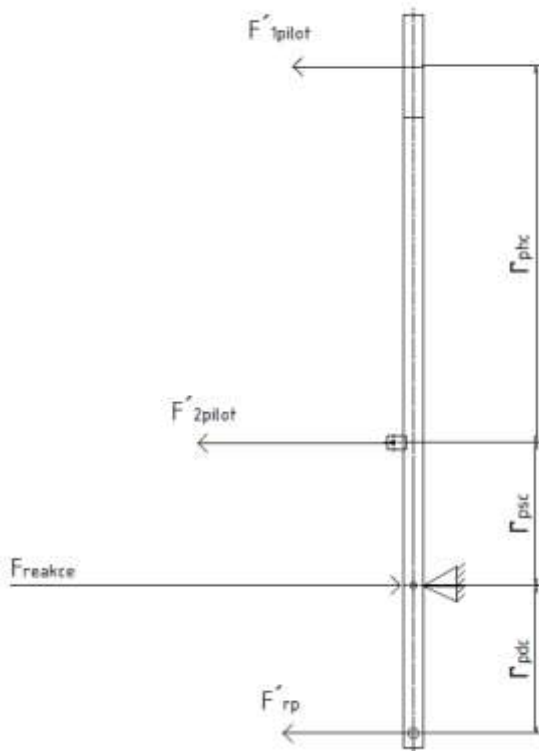
Neboli všechny části soustavy až po dorazy musí být dimenzovány na zatížení od pilota.

4.2 Výpočet zatížení prvků příčného řízení pro pevnostní kontroly (silami od pilota)

V této části je proveden přepočtení zatížení celé trasy řízení na hodnotu stanovenou podle Předpisu. Tyto hodnoty zatížení budou vstupními parametry pro pevnostní kontrolu.

Horní index ' označuje provozní zatížení od pilota. Pokud není uvedeno jinak, jsou všechna zatížení provozní.

Řídicí páky jsou namáhány ohybovým momentem od sil od pilotů a od síly, kterou na sebe vzájemně působí táhlo (17) a řídicí páka (18).



Obrázek 24 Ohyb řídicí páky

Velikost ohybového momentu horní části řídicí páky je

$$M_{ohc} = F'_{1pilot} \cdot r_{psc} + F'_{2pilot} \cdot r_{phc},$$

kde ramena jsou na „Obrázek 24“ a

$$F'_{2pilot} = F'_{1pilot} \cdot \frac{r_{psc}}{r_{phc}}.$$

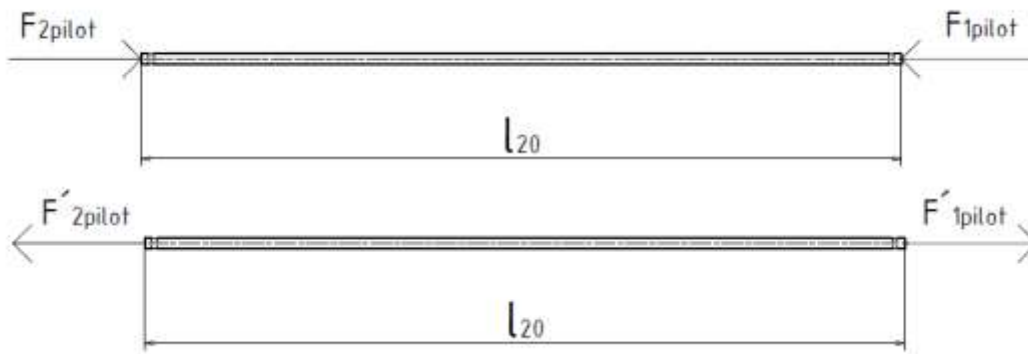
Ohybový moment dolní části řídicí páky je dán vztahem

$$M_{odc} = F'_{rp} \cdot r_{pdc}$$

Trubka mezi řídicími pákami je namáhána buď tlakovou silou v případě že piloti působí na řídicí páky proti sobě, nebo tahovou silou pokud piloti působí na řídicí páky ve stejném směru.

Velikost síly je dána vztahem

$$F'_{1pilot} = F'_{2pilot} = F_{1pilot} \cdot \frac{r_{phc}}{r_{psc}} = 150 \cdot \frac{0,4}{0,11} = 545,45 \text{ N}$$



Obrázek 25 Trubka mezi řídicími pákami

Síla F'_{L4} (viz „Obrázek 23“) přenášena z řídicí páky do táhla (17) má velikost

$$F'_{L4} = \frac{F_{pilot} \cdot r_{phc}}{\cos \varphi \cdot r_{pdc}} = \frac{300 \cdot 0,4}{\cos 15^\circ \cdot 0,115} = 1080,29 \text{ N.}$$

Síla F'_{L4} vyvolá na torzní trubce (15) přes páku (16) moment

$$M'_{Lv3} = F'_{L4} \cdot r_{p2} = 1080,29 \cdot 0,08 = 86,42 \text{ Nm.}$$

Páka (14) přenese moment M'_{Lv3} na táhlo (13). Táhlo (13) vychýlené nahoru bude namáháno tlakovou silou a táhlo (13) vychýlené dolů bude namáháno tahovou silou.

$$F'_{L2} = \frac{M'_{Lv3}}{r_{v1}} = \frac{86,42}{0,1} = 864,2 \text{ N}$$

Táhlo (13) vytvoří na páce (12) silovou dvojici M'_{Lv2} o velikosti

$$M'_{Lv2} = r_{v2} \cdot F'_{L2} = 0,1 \cdot 864,2 = 86,42 \text{ Nm,}$$

která bude přenesena předlohou torzní trubkou (5) na vahadlo (4). K němu jsou připojena táhla (3), ve kterých bude momentem M'_{Lv2} vyvolána tahová respektive tlaková síla

$$F'_{L1} = \frac{M'_{Lv2}}{2 \cdot r_{v1}} = \frac{86,42}{2 \cdot 0,1} = 432,12 \text{ N.}$$

5 Pevnostní kontrola transmise

Pevnostní kontrola bude provedena na dvě úrovně zatížení – na provozní a na početní – podle jejich definic v Předpise.

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

Z toho plyne, že kontrola na provozní zatížení bude mít jako hodnotu konečné přípustné napětí mez kluzu materiálu $R_{0,2}$ a konečné přípustné napětí pro kontrolu na početní zatížení bude mez pevnosti materiálu R_m .

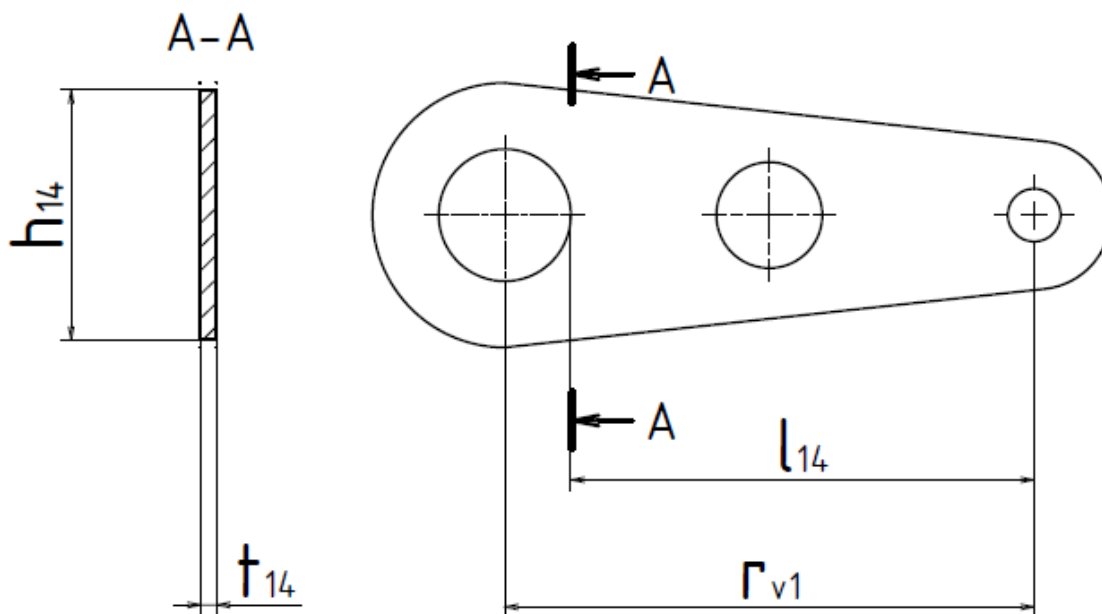
Provozní zatížení je podle §395 Předpisu 125% reálného zatížení. Početní zatížení je podle §301 a §303 Předpisu 1,5 násobek provozního zatížení.

Provozní zatížení bude v dalším textu značeno spodním indexem „L“ (z anglického limit) a početní zatížení bude značeno spodním indexem „U“ (z anglického ultimate).

5.1 Kontrola páky (14) na ohyb

5.1.1 Stanovení geometrie

Rozměry podstatné pro pevnostní kontrolu páky (14) na ohyb jsou na „Obrázek 26“ a v „Tabulka 8“.



Obrázek 26 Geometrie páky (14)

Tabulka 8 Důležité parametry páky (12)

Rozměr	Velikost
l_{14} [mm]	87,5
t_{14} [mm]	3
h_{14} [mm]	47,24
r_{v1} [mm]	100

Průřezový modul v ohybu W_o profilu v řezu A-A je:

$$W_o = \frac{t_{14} \cdot l_{14}^2}{6} = \frac{3 \cdot 47,24^2}{6} = 1115,81 \text{ mm}^3$$

5.1.2 Stanovení zatížení prvku

Páka bude zkoumána v místě, kde je očekáváno největší koncentrace napětí.

Provozní moment je dán vztahem:

$$M_{OL} = F'_{L2} \cdot l_{14} = 864,2 \cdot 87,5 = 75617,5 \text{ Nmm.}$$

Počtení moment vznikne vynásobením provozního hodnotou součinitele bezpečnosti podle Předpisu.

$$M_{OU} = M_{OL} \cdot f = 75617,5 \cdot 1,5 = 113426,25 \text{ Nmm}$$

5.1.3 Kontrola napjatosti

Páka bude vyrobena z duralu s označením 2024T3, který je běžně používán pro letecké aplikace. Jeho pevnostní hodnoty jsou uvedeny v „Tabulka 9“.

Tabulka 9 Materiálové hodnoty duralu 2024T3

Rozměr	Velikost
$R_{0,2}$ [MPa]	270
R_m [MPa]	420

5.1.3.1 Provozní zatížení

$$\sigma_{OL} = \frac{M_{OL}}{W_o} = \frac{75617,5}{1115,81} = 67,77 \text{ MPa}$$

Podmínka $\sigma_{OL} \leq R_{0,2}$ je splněna s jistotou j_L , jejíž hodnota je:

$$j_L = \frac{R_{0,2}}{\sigma_{OL}} = \frac{270}{67,77} = 3,98$$

5.1.3.2 Početní zatížení

$$\sigma_{OU} = \frac{M_{OU}}{W_O} = \frac{113426,25}{1115,81} = 101,65 \text{ MPa}$$

Podmínka $\sigma_{OU} \leq R_m$ je splněna s jistotou j_U , jejíž hodnota je:

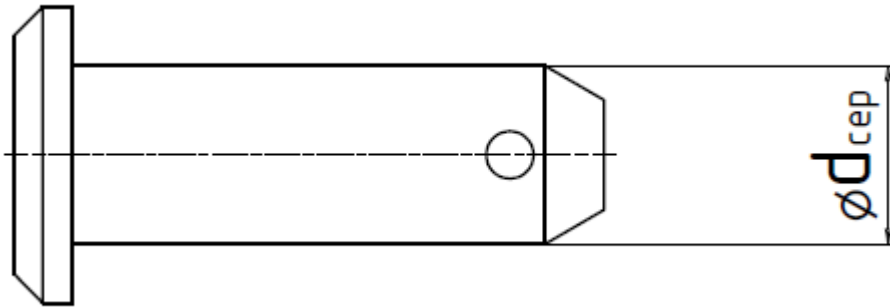
$$j_U = \frac{R_m}{\sigma_{OL}} = \frac{420}{101,65} = 4,13.$$

✓ Vyhovuje.

5.2 Kontrola čepu mezi pákou (14) a táhlem (13)

5.2.1 Stanovení geometrie

Parametry podstatné pro kontrolu čepu mezi pákou (14) a táhlem (13) jsou na „Obrázek 27“ a v „Tabulka 10“.



Obrázek 27 Geometrie čepu mezi pákou (14) a táhlem (13)

Tabulka 10 Parametry čepu mezi pákou (14) a táhlem (13)

Rozměr	Velikost
$d_{čep}$ [mm]	4
d_0 [mm]	0

Plocha průřezu čepu je

$$F = \frac{\pi \cdot d_{čep}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 12,57 \text{ mm}^2.$$

5.2.2 Stanovení zatížení prvku

5.2.3 Kontrola napjatosti

Materiál čepu byl zvolen 11109, ze kterého jsou ocelové čepy běžně dostupné. Pevnostní hodnoty tohoto materiálu jsou v „Tabulka 11“.

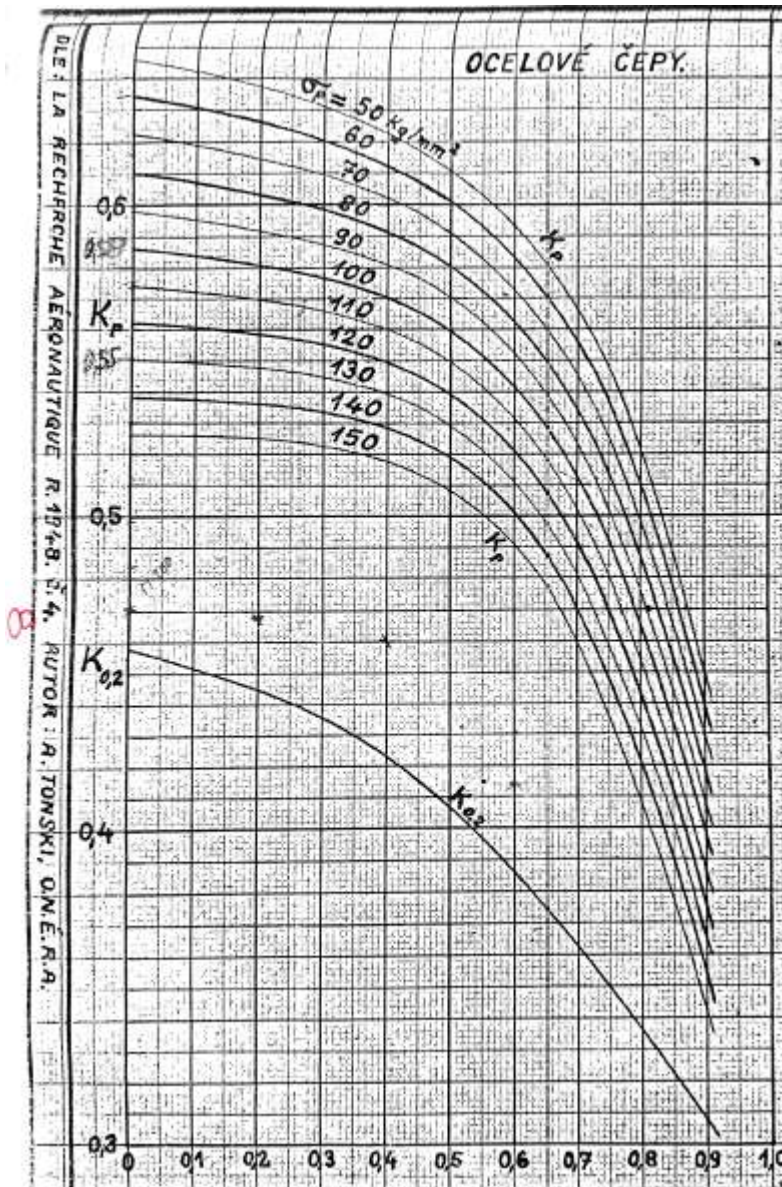
Tabulka 11 Materiálové hodnoty oceli 11109

Rozměr	Velikost
--------	----------

$R_{0,2}$ [MPa]	215
R_m [MPa]	500

Kontrola bude provedena podle metodiky uvedené v [8]. Ta stanovuje pevnost čepů na základě diagramů získaných z laboratorních zkoušek. Na základě hodnoty meze pevnosti a průměru vnitřního otvoru se z naměřených hodnot stanoví tvarový součinitel K_p .

Z „Obrázek 28“ byla odečtena hodnota $K_p = 0,65$ a $K_{0,2} = 0,458$ (pro $\frac{d_0}{d} = 0$ a $\sigma_p = 500$ MPa).



Obrázek 28 Stanovení tvarového součinitele K_p a $K_{0,2}$ (Zdroj: [8])

5.2.3.1 Provozní zatížení

Táhlo (13), které je spojeno s pákou (12) pomocí zkoumaného čepu, je namáháno provozní tahovou/tlakovou silou o velikosti $F'_{L2} = 864,2$ N.

Maximální provozní síla $T_{0,2}$ má podle [8] splňovat nerovnici

$$T_{0,2} \leq m \cdot F \cdot K_{0,2} \cdot \sigma_{0,2} = 2 \cdot 12,57 \cdot 0,458 \cdot 215 = 2475,54 \text{ N},$$

kde m je počet střižných průřezů.

Podmínka $F'_{L2} \leq T_{0,2}$ je splněna s jistotou j_L , jejíž hodnota je

$$j_L = \frac{T_{0,2}}{F'_{L2}} = \frac{2475,54}{864,2} = 2,86.$$

5.2.3.2 Početní zatížení

Táhlo (13), které je spojeno s pákou (12) pomocí zkoumaného čepu, je namáháno početní tahovou/tlakovou silou o velikosti $F'_{U2} = F'_{L2} \cdot f = 864,2 \cdot 1,5 = 1296,3 \text{ N}$.

Maximální početní síla T_p má podle [8] splňovat nerovnici

$$T_p \leq m \cdot F \cdot K_p \cdot \sigma_p = 2 \cdot 12,57 \cdot 0,65 \cdot 500 = 8170,5 \text{ N}.$$

podmínka $F'_{U2} \leq T_p$ je splněna s jistotou j_U , jejíž hodnota je

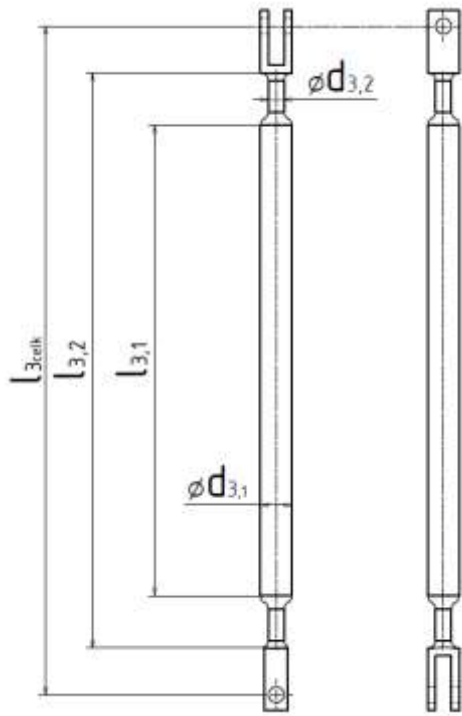
$$j_U = \frac{T_p}{F'_{U2}} = \frac{8170,5}{1296,3} = 6,30.$$

✓ Vyhovuje.

5.3 Kontrola táhla (3) na vzpěr

5.3.1 Stanovení geometrie

Důležité rozměry jsou znázorněny na „Obrázek 29“ a jejich velikosti jsou uvedeny v „Tabulka 12“.



Obrázek 29 Geometrie táhla (3)

Tabulka 12 Parametry táhla (3)

Rozměr	Velikost
$D_{3,1}$ [mm]	16
$d_{3,1}$ [mm]	10
$d_{3,2}$ [mm]	6
l_{celk} [mm]	430
$l_{3,1}$ [mm]	303
$l_{3,2}$ [mm]	360

Průměr trubky a tloušťka její stěny byly voleny z normalizované řady podle ONL 3772.

Táhl (3) je nekonztantního průřezu. Pro jednoduchost výpočtu však bude uvažováno, že táhl má konstantní průřez trubky táhla po celé délce l_{celk} . Tím se výpočty zjednoduší, avšak chyba bude na bezpečnou stranu. Kvadratickým momentem J_z pak je:

$$J_z = \frac{\pi}{64} \cdot (D_{3,1}^4 - d_{3,1}^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (16^4 - 10^4) = 2776,18 \text{ mm}^4.$$

Plocha průřezu S je:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{3,1}^2 - d_{3,1}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (16^2 - 10^2) = 122,52 \text{ mm}^2.$$

5.3.2 Stanovení zatížení prvku

Táhlo bude vyrobeno z duralu 2024T3, jehož důležité parametry jsou uvedeny v „Tabulka 9“. Tento materiál má nevýraznou mez kluzu, a proto je mez úměrnosti σ_u přibližně totožná se smluvní mezí kluzu $R_{0,2}$.

Jedná se o druhý případ vzpěru. Při tom jsou oba konce prutu uloženy v kloubu a jeden z nich se může axiálně pohybovat.

Nejprve musí být stanovena štíhlost táhla λ

$$\lambda = \frac{l_{celk}}{i_z} = \frac{l}{\sqrt{\frac{J_z}{S}}} = \frac{430}{\sqrt{\frac{2776,18}{122,52}}} = 90,33.$$

Poté je nutné vypočítat λ_{mez} .

$$\lambda_{mez} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 73800}{215}} = 58,2.$$

Prut se nachází v oblasti Eulerově pružné oblasti, neboť $\lambda > \lambda_{mez}$. Proto lze pro stanovení kritické síly F_{3kr} použít Eulerův vztah:

$$F_{3kr} = n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_z}{l^2} = 1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 73800 \cdot 2776,18}{430^2} = 10936,21 \text{ N}$$

5.3.3 Kontrola napjatosti

5.3.3.1 Provozní zatížení

Vzhledem k tloušťce stěny trubky nezbytné pro přenos početního zatížení je kontrola napjatosti od provozního zatížení nerelevantní.

5.3.3.2 Početní zatížení

$$F'_{U1} = F'_{L1} \cdot f = 432,12 \cdot 1,5 = 648,18 \text{ N.}$$

podmínka $F'_{U1} \leq F_{3kr}$ je splněna s jistotou j_U , jejíž hodnota je

$$j_U = \frac{F_{3kr}}{F'_{U1}} = \frac{10936,21}{648,18} = 16,87.$$

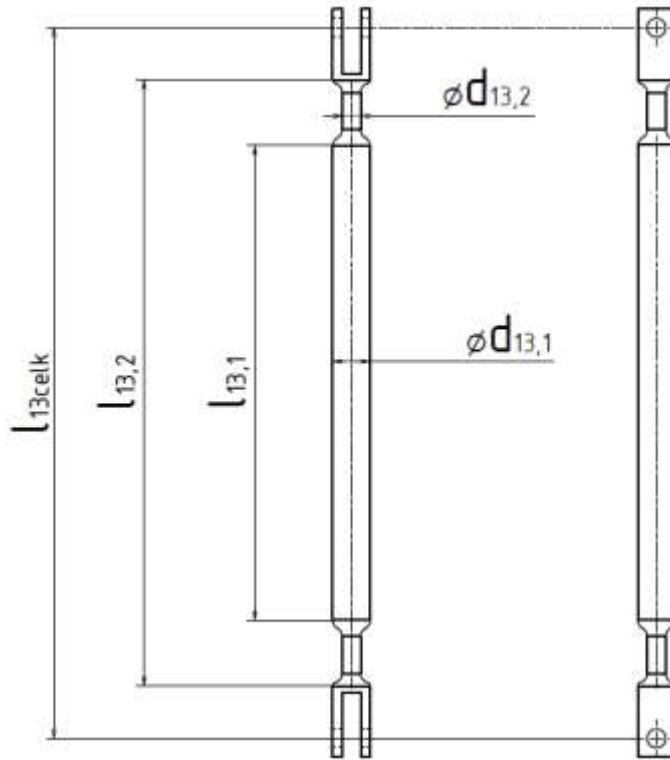
✓ Vyhovuje.

Vzhledem k vysoké hodnotě jistoty by bylo možné zvolit trubku s menším průměrem a/nebo tloušťkou stěny, čímž by došlo ke snížení kritické síly.

5.4 Kontrola táhla (13) na vzpěr

5.4.1 Stanovení geometrie

Důležité rozměry jsou znázorněny na „Obrázek 30“ a jejich velikosti jsou uvedeny v „Tabulka 13“.



Obrázek 30 Geometrie táhla (13)

Tabulka 13 Parametry táhla (13)

Rozměr	Velikost
$D_{13,1}$ [mm]	16
$d_{13,1}$ [mm]	10
$d_{13,2}$ [mm]	6
l_{13celk} [mm]	383
$l_{13,1}$ [mm]	255
$l_{13,2}$ [mm]	313

Táhlo (13) je – stejně jako táhlo (3) - nekonztantního průřezu. Pro jednoduchost výpočtu však bude uvažováno, že táhlo má konstantní průřez trubky táhla po celé délce l_{13celk} . Tím se výpočty zjednoduší, avšak chyba bude na bezpečnou stranu. Kvadratickým momentem J_z pak je:

$$J_z = \frac{\pi}{64} \cdot (D_{13,1}^4 - d_{13,1}^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (16^4 - 10^4) = 2776,18 \text{ mm}^4.$$

Plocha průřezu S je:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{13,1}^2 - d_{13,1}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (16^2 - 10^2) = 122,52 \text{ mm}^2.$$

5.4.2 Stanovení zatížení prvku

Táhlo bude vyrobeno z duralu 2024T3. Tento materiál má nevýraznou mez kluzu, a proto je mez úměrnosti σ_u přibližně totožná se smluvní mezí kluzu $R_{0,2}$.

Jedná se o druhý případ vzpěru. Při tom jsou oba konce prutu uloženy v kloubu a jeden z nich se může axiálně pohybovat.

Nejprve musí být stanovena štíhlost táhla λ

$$\lambda = \frac{l_{13celk}}{i_z} = \frac{l_{13celk}}{\sqrt{\frac{J_z}{S}}} = \frac{383}{\sqrt{\frac{2776,18}{122,52}}} = 80,46.$$

Poté je nutné vypočítat λ_{mez} .

$$\lambda_{mez} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 73800}{215}} = 58,2$$

Prut se nachází v oblasti Eulerově pružné oblasti, neboť $\lambda > \lambda_{mez}$. Proto lze pro stanovení kritické síly použít Eulerův vztah:

$$F_{13kr} = n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_z}{l^2} = 1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 73800 \cdot 2776,18}{383^2} = 13784,98 \text{ N}$$

5.4.3 Kontrola napjatosti

5.4.3.1 Provozní zatížení

Vzhledem k tloušťce stěny trubky nezbytné pro přenos početního zatížení je kontrola napjatosti od provozního zatížení nerelevantní.

5.4.3.2 Početní zatížení

$$F'_{U2} = F'_{L2} \cdot f = 864,2 \cdot 1,5 = 1296,3 \text{ N}.$$

podmínka $F'_{U2} \leq F_{13kr}$ je splněna s jistotou j_U , jejíž hodnota je

$$j_U = \frac{F_{13kr}}{F'_{U2}} = \frac{13784,98}{1296,3} = 10,63.$$

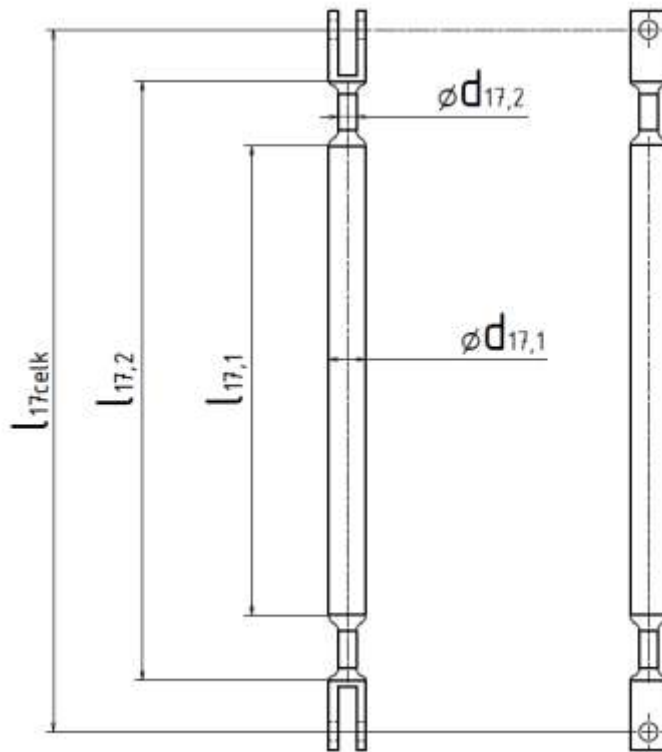
✓ Vyhovuje.

Vzhledem k vysoké hodnotě jistoty by bylo možné zvolit trubku s menším průměrem a/nebo tloušťkou stěny, čímž by došlo ke snížení kritické síly.

5.5 Kontrola táhla (17) na vzpěr

5.5.1 Stanovení geometrie

Důležité rozměry jsou znázorněny na „Obrázek 31“ a jejich velikosti jsou uvedeny v „Tabulka 14“.



Obrázek 31 Geometrie táhla (17)

Tabulka 14 Parametry táhla (17)

Rozměr	Velikost
$D_{17,1}$ [mm]	16
$d_{17,1}$ [mm]	10
$d_{17,2}$ [mm]	6
l_{17celk} [mm]	275
$l_{17,1}$ [mm]	200
$l_{17,2}$ [mm]	234

Táhl (17) je nekonztantního průřezu. Pro jednoduchost výpočtu však bude uvažováno, že táhl má konstantní průřez trubky táhla po celé délce l_{17celk} . Tím se výpočty zjednoduší, avšak chyba bude na bezpečnou stranu. Kvadratickým momentem J_z pak je:

$$J_z = \frac{\pi}{64} \cdot (D_{17,1}^4 - d_{17,1}^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (16^4 - 10^4) = 2776,18 \text{ mm}^4.$$

Plocha průřezu S je:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{17,1}^2 - d_{17,1}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (16^2 - 10^2) = 122,52 \text{ mm}^2.$$

5.5.2 Stanovení zatížení prvku

Táhlo bude vyrobeno z duralu 2024T3. Tento materiál má nevýraznou mez kluzu, a proto je mez úměrnosti σ_u přibližně totožná se smluvní mezí kluzu $R_{0,2}$.

Jedná se o druhý případ vzpěru. Při tom jsou oba konce prutu uloženy v kloubu a jeden z nich se může axiálně pohybovat.

Nejprve musí být stanovena štíhlost táhla λ

$$\lambda = \frac{l_{17celk}}{i_z} = \frac{l_{17celk}}{\sqrt{\frac{J_z}{S}}} = \frac{275}{\sqrt{\frac{2776,18}{122,52}}} = 57,77.$$

Poté je nutné vypočítat λ_{mez} .

$$\lambda_{mez} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 73800}{215}} = 58,2$$

Prut se nachází v oblasti Eulerově pružné oblasti, neboť $\lambda > \lambda_{mez}$. Proto lze pro stanovení kritické síly použít Eulerův vztah:

$$F_{17kr} = n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_z}{l^2} = 1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 73800 \cdot 2776,18}{275^2} = 26738,58 \text{ N}$$

5.5.3 Kontrola napjatosti

5.5.3.1 Provozní zatížení

Vzhledem k tloušťce stěny trubky nezbytné pro přenos početního zatížení je kontrola napjatosti od provozního zatížení nerelevantní.

5.5.3.2 Početní zatížení

$$F'_{U4} = F'_{L4} \cdot f = 1080,29 \cdot 1,5 = 1620,44 \text{ N}.$$

podmínka $F'_{U4} \leq F_{17kr}$ je splněna s jistotou j_U , jejíž hodnota je

$$j_U = \frac{F_{17kr}}{F'_{U4}} = \frac{26738,5}{1620,44} = 16,50.$$

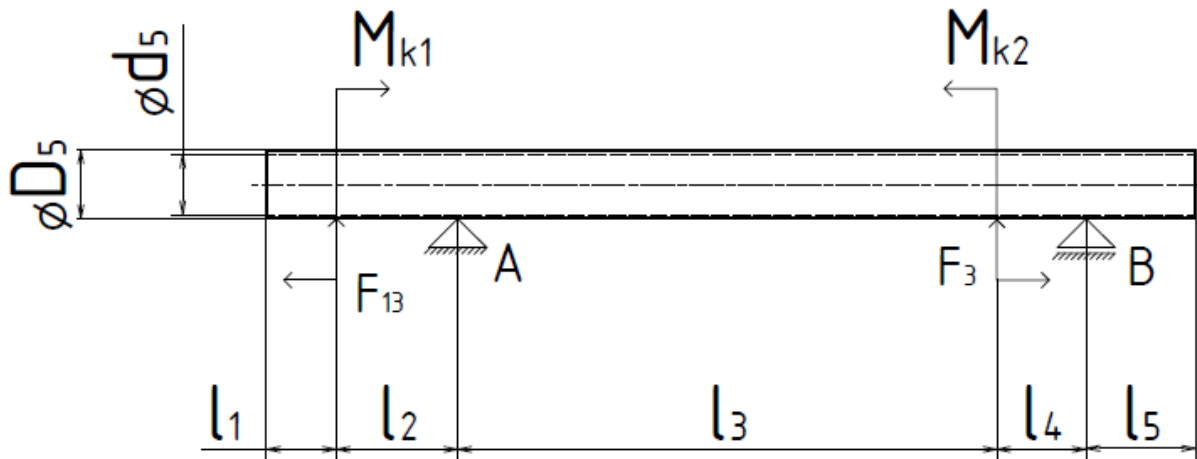
✓ Vyhovuje.

Vzhledem k vysoké hodnotě jistoty by bylo možné zvolit trubku s menším průměrem a/nebo tloušťkou stěny, čímž by došlo ke snížení kritické síly.

5.6 Kontrola předlokové trubky (5) na kombinaci ohybu a krutu

5.6.1 Stanovení geometrie

Důležité rozměry jsou znázorněny na „Obrázek 32“ a jejich velikosti jsou uvedeny v „Tabulka 15“.



Obrázek 32 Geometrie předlokové trubky (5)

Tabulka 15 Parametry předlokové trubky (5)

Rozměr	Velikost
d_5 [mm]	22
D_5 [mm]	25
l_1 [mm]	20
l_2 [mm]	50
l_3 [mm]	227
l_4 [mm]	53
l_5 [mm]	40
M_{k1} [Nm]	86,42
M_{k2} [Nm]	86,42
F_{L13} [Nm]	864,2
F_{L3} [Nm]	432,12

Průřezový modul trubky v ohybu W_o se vypočítá vztahem pro mezikruží:

$$W_o = \frac{\pi \cdot D_5^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d_5}{D_5} \right)^4 \right] = \frac{\pi \cdot 25^3}{32} \left[1 - \left(\frac{22}{25} \right)^4 \right] = 641,06 \text{ mm}^3$$

a průřezový modul trubky v krutu je W_k

$$W_k = \frac{\pi \cdot D_5^3}{16} \left[1 - \left(\frac{d_5}{D_5} \right)^4 \right] = \frac{\pi \cdot 25^3}{16} \left[1 - \left(\frac{22}{25} \right)^4 \right] = 1228,12 \text{ mm}^3.$$

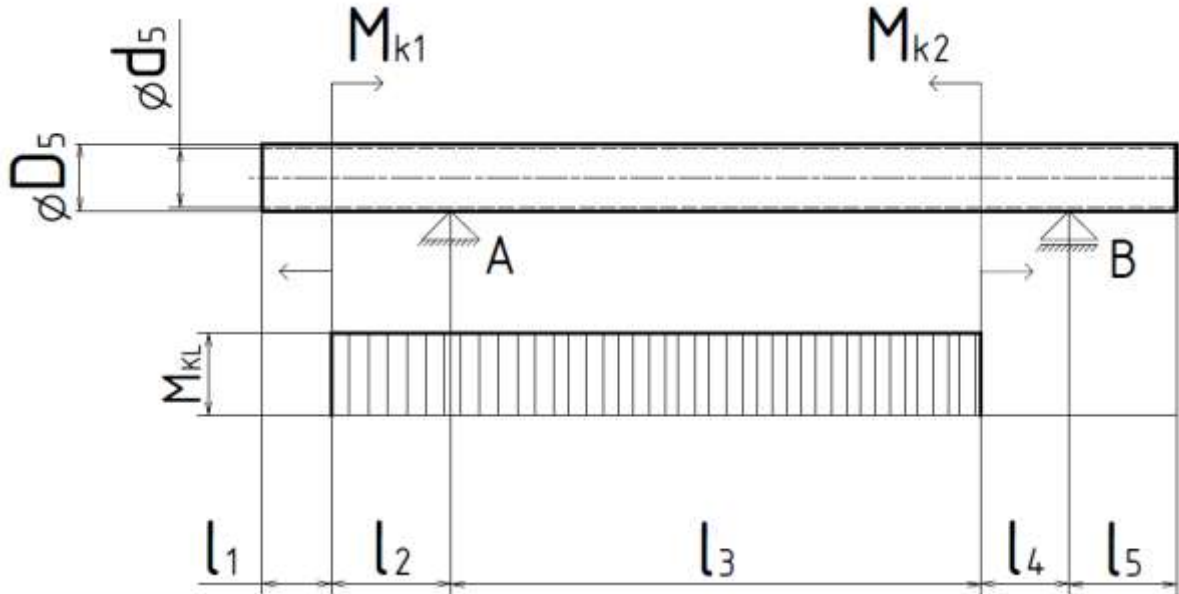
5.6.2 Stanovení zatížení prvku

Předloková trubka je zatěžována kombinovaným namáháním krutu a ohybu. Nejprve je nutné řešit zatížení od krutu a ohybu zvlášť, poté zjistit redukované napětí a kontrolovat, zda jistota je větší než 1.

Předlohová trubka bude vyrobena z duralu 2024T3, jehož pevnostní parametry jsou uvedeny v „Tabulka 9“.

5.6.2.1 Provozní zatížení

Průběh krutu je na „Obrázek 33“.



Obrázek 33 Průběh krouticího momentu na předlohové trubce (5)

Velikost krouticího momentu M_{KL} byla stanovena v kapitole 4.1.5 pod označením $M'_{Lv2} = 86,42 \text{ Nm}$.

Pro průběh ohybu je nutné určit reakce v podporách.

Rovnice statické rovnováhy tohoto prutu jsou:

$$y: F_{13} + R_B - R_A - 2 \cdot F_3 = 0$$

$$M_A: F_{13} \cdot l_2 + 2 \cdot F_3 \cdot l_3 - R_B \cdot (l_3 + l_4) = 0$$

Velikosti provozních zatížení F_{13} a F_3 byly určeny v kapitole 4.1.5. Síla v táhle (13) je $F_{13} = F'_{L2}$ a síla v táhle je $F_3 = F'_{L1}$.

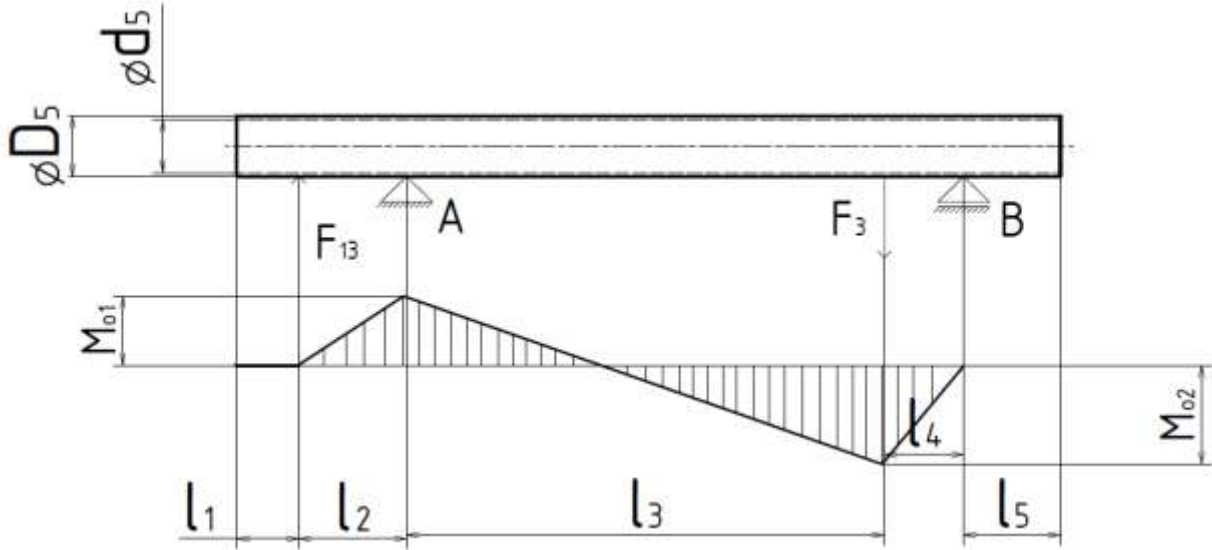
Řešením těchto rovnic lze získat reakce v podporách A a B

$$R_{LB} = \frac{F_{13} \cdot l_2 + 2 \cdot F_3 \cdot l_3}{l_3 + l_4} = \frac{864,2 \cdot 50 + 2 \cdot 432,12 \cdot 227}{227 + 53} = 854,9N$$

$$R_{LA} = F_{13} + \frac{F_{13} \cdot l_2 + 2 \cdot F_3 \cdot l_3}{l_3 + l_4} - 2 \cdot F_3 = 864,2 + \frac{864,2 \cdot 50 + 2 \cdot 432,12 \cdot 227}{227 + 53} - 2 \cdot 432,12 = 854,9N$$

Průběhy ohybového momentu po délce táhla jsou znázorněny na „Obrázek 34“. Místa podezřelá z největšího ohybového momentu jsou místa u podpory A s momentem označeným M_{01} a místo

pod silou F_3 s momentem označeným M_{o2} . Velikosti momentů jsou vypočteny pomocí metody řezu.



Obrázek 34 Průběh ohybového momentu předlohové trubky (5)

$$M_{o1L} = F_{13} \cdot l_2 = 864,2 \cdot 50 = 43210 \text{ Nmm}$$

$$M_{o2L} = F_{13} \cdot (l_3 + l_2) - R_{LA} \cdot l_3 = 864,2 \cdot (227 + 50) - 854,9 \cdot 227 = 45321,1 \text{ Nmm}$$

Na ohyb bude kontrolováno místo s největší velikostí momentu $M_{o2L} = 45321,1 \text{ Nmm}$, který je pod silou F_3 .

5.6.2.2 Početní zatížení

Početní zatížení lze získat vynásobením zatěžujících sil a momentů součinitelem bezpečnosti $f = 1,5$.

$$F_{U13} = F_{13} \cdot f = 864,2 \cdot 1,5 = 1296,3 \text{ N}$$

$$F_{U3} = F_3 \cdot f = 432,12 \cdot 1,5 = 648,18 \text{ N}$$

$$R_{UB} = R_{LB} \cdot f = 854,9 \cdot 1,5 = 1282,35 \text{ N}$$

$$R_{UA} = R_{LA} \cdot f = 854,9 \cdot 1,5 = 1282,35 \text{ N}$$

$$M_{KU} = M_{KL} \cdot f = 864,2 \cdot 1,5 = 129630 \text{ Nmm}$$

$$M_{o2U} = M_{o2L} \cdot f = 45321,1 \cdot 1,5 = 67981,8 \text{ Nmm}$$

$$F_{U3} = F_3 \cdot f = 432,12 \cdot 1,5 = 648,18 \text{ N}$$

5.6.3 Kontrola napjatosti

5.6.3.1 Provozní zatížení

Redukované provozní napětí kombinovaného namáhání na krut a ohyb se podle teorie H.M.H vypočítá podle vztahu

$$\sigma_{redL} = \sqrt{\left(\frac{M_{o2L}}{W_o}\right)^2 + \left(\alpha \cdot \frac{M_{kL}}{W_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{45321,1}{641,06}\right)^2 + \left(\sqrt{3} \cdot \frac{86420}{1228,12}\right)^2} = 140,90 \text{ N/mm}^2$$

Podmínka $\sigma_{redL} \leq R_{0,2}$ je splněna s jistotou j_L , jejíž hodnota je

$$j_L = \frac{R_{0,2}}{\sigma_{redL}} = \frac{270}{140,90} = 1,92.$$

✓ Vyhovuje.

5.6.3.2 Početní zatížení

Redukované početní napětí kombinovaného namáhání na krut a ohyb se podle teorie H.M.H vypočítá podle vztahu

$$\sigma_{redU} = \sqrt{\left(\frac{M_{o2U}}{W_o}\right)^2 + \left(\alpha \cdot \frac{M_{kU}}{W_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{67981,8}{641,06}\right)^2 + \left(\sqrt{3} \cdot \frac{129630}{1228,12}\right)^2} = 211,35 \text{ N/mm}^2$$

Podmínka $\sigma_{redU} \leq R_m$ je splněna s jistotou j_U , jejíž hodnota je

$$j_U = \frac{R_m}{\sigma_{redU}} = \frac{420}{211,35} = 1,99.$$

✓ Vyhovuje.

6 Závěr

V této bakalářské práci byl proveden návrh konstrukčního řešení ultralehkého letounu Typhoon ČVUT.

Nejprve byl stručně popsán stav, ve kterém se v současné chvíli nachází letadlo samotné a poté bylo popsáno současné konstrukční řešení příčného řízení. Jelikož křídlo včetně křídélka je již hotové, bylo nutné popsat mechaniku převodu řízení v křídelní části. To bylo provedeno měřením, jehož výsledkem bylo stanovení převodové funkce mezi výchylkou křídélka a hnací pákou na křídle.

Ve třetí kapitole byl popsán konstrukční návrh rekonstrukce příčného řízení. Návrh byl vymodelován v software Autodesk Inventor Professional 2019 jako samotný mechanismus a jako mechanismus upevněný k příhradové konstrukci trupu letadla. Změnou oproti původnímu uspořádání bylo přidání předlohové trubky, která bude mít za úkol přenést krouticí moment na vahadlo posunuté o 227mm dozadu ve směru letu. Bylo navrženo uložení předlohové trubky v kluzných ložiskách a upevnění konzol ložisek ke konstrukci trupu a k zástavbě palivových nádrží pomocí prutů.

Další kapitola se zabývala stanovením zatížení v trase řízení. Nejprve bylo stanoveno zatížení od křídélka. Byla zvolena metoda výpočtu zatížení podle Předpisu. Tím se zjednodušil výpočet na úkor přesnosti. Lze však předpokládat, že konstanta ve vzorci uvedeném v Předpisu je navržena tak, aby chyba ve výpočtu byla na bezpečnou stranu. Po následném porovnání sil v řízení s požadavkem Předpisu na sílu od pilota bylo stanoveno zatížení ve všech částech trupové části řízení na maximální zatížení od pilota.

Tato zatížení byla použita pro pevnostní kontrolu vybraných uzlů. Pevnostní kontrola byla u vybraných uzlů provedena jak na provozní, tak na početní zatížení, jejichž hodnoty vycházely z předchozí kapitoly a z požadavků Předpisu. Všechny provedené pevnostní kontroly vyhověly na obě úrovně zatížení s jistotou větší než 1.

7 Přílohy

3D model mechanismu

8 Literatura

- [1] PIKSA, Š.: Rekonstrukce malého sportovního letounu: diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2019, 66 s. Vedoucí práce: THEINER, R.
- [2] HRNČÍŘ, M.: Návrh křídélka malého sportovního letounu: bakalářská práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2017, 40 s. Vedoucí práce: BRABEC, J.
- [3] NOSEK, Z.: Rekonstrukce ultralehkého letounu: diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2015, 115 s. Vedoucí práce: THEINER, R.
- [4] TYLL, A.: Návrh provozní dokumentace ultralehkého letadla TL-32. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letadlové dopravy, 2015, 105 s. Vedoucí práce: THEINER, R., NOVAK, M.
- [5] ČR, Letecká amatérská asociace v. předpis UL2- I. Část. Praha : z pověření ÚCL vydala Letecká amatérská asociace ČR, 2002.
- [6] SLAVÍK, Svatomír. Stavba letadel. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01671-4.
- [7] ŠULŽENKO, Michail Nikolajevič. Konstrukce letadel. 2. opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. Řada strojnické literatury.
- [8] Tabulky pro statické výpočty Letov