



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

MODIFIKACE VOP LETOUNU VUT100

MODIFICATION OF HORIZONTAL TAIL OF VUT100 AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUBOŠ JANHUBA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. IVO JEBÁČEK, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Luboš Janhuba

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Stavba letadel (2301T039)**

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

Modifikace VOP letounu VUT100

v anglickém jazyce:

Modification of Horizontal Tail of VUT100 aircraft

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a ověřte modifikaci VOP letounu VUT100 s cílem zvýšení výkonů letounu při současném zachování letových vlastností daných mohutností VOP. Navrhněte zvětšení ramene VOP se zmenšením plochy VOP pro snížení potřebné vyvažovací síly působící proti vztlakové síle. Ověřte výpočtem vliv na výkony letounu (aerodynamický odpor a potřebnou vztlakovou charakteristiku), navrhněte možné vyplývající úpravy pro zvýšení rychlosti letounu.

Proveďte konstrukční návrh zmenšení VOP a uspořádání vůči trupu.

Posuďte možnosti a přínos či nevýhody dědičnosti konstrukce.

Zhodnoťte vliv na hmotnost a centráž letounu.

Cíle diplomové práce:

Návrh VOP, výpočet výkonů a vlastností modifikovaného letounu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Čalkovský, A., Pávek, J.: Konstrukce a pevnost letadel I., Brno, 1986
- [2] Píštěk, A., Grégr, O., Kahánek, V., Böhm, R.: Pevnost a životnost letadel, Brno, 1987

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem modifikace vodorovné ocasní plochy letounu VUT 100, zvětšením ramene VOP a zmenšením plochy VOP. Práce se skládá z posouzení přínosů úpravy polohy VOP, výpočet zatížení a návrhí základní konstrukce.

Abstract

The goal of the submitted Diploma Thesis is the Proposal of modifications of the horizontal tail (HT) of the plane VUT 100 by increasing the shoulder of HT and reduce of the HT surface.

The Diploma Thesis consists of assessing the benefits of position adjustments, load calculation and the proposal of the basic design.

Klíčová slova

Letoun, Letadlo, Vodorovné ocasní plochy, VUT100, zatížení, konstrukce, CS-23, Stabilita, říditelnost, modifikace

Key words

Airplane, Horizontal tail, VUT 100, loading, construction, CS-23, stability, control, modification

Bibliografická citace

JANHUBA, L. Modifikace VOP letounu VUT100. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 101 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D..

Poděkování

Nec spe, Nec metu. Jelikož nic z toho co děláme, nemá v očích věčnosti větší smysl než poletující prach. Pouze silou snů lze dobít hvězd.



Obsah

ÚVOD	11
1. VUT-100 Cobra	12
1.1. Popis letounu	12
1.2. Základní technické charakteristiky	13
1.3. Tří-pohledový náčrt letounu	14
1.4. Souřadný systém	15
2. Modifikace VOP.....	16
2.1. Funkce vodorovných ocasních ploch.....	16
2.2. Důvody modifikace	18
2.3. Navržení modifikace	19
2.3.1. Změna plochy VOP.....	19
2.3.2. Konstrukční řešení.....	19
2.3.3. Hmotový odhad.....	20
2.4. Aerodynamické charakteristiky	22
2.5. Posouzení přínosu	25
2.5.1. Horizontální let.....	25
2.5.2. Stoupavý let.....	28
2.6. Volba parametrů modifikace	30
3. Důsledky modifikace na letové vlastnosti	32
3.1. Podélná stabilita	32
3.1.1. Aerodynamická data letounu.	32
3.1.2. Aerodynamický střed letounu	33
3.2. Podélná říditelnost	37
3.2.1. Dynamický bod letounu	37
3.3. Zhodnocení důsledků modifikace na letové vlastnosti	40
4. Zatížení vodorovných ocasních ploch	41
4.1. Obálka zatížení dle CS-23.....	41
4.2. Vyvažovací zatížení.....	44
4.3. Zatížení při obratech.....	46



4.4.	Zatížení při poryvu.....	49
4.4.1.	Výpočet poryvového zatížení	51
4.5.	Nesymetrické zatížení	52
4.6.	Definice rozhodujících případů zatížení	53
4.7.	Průběh zatížení po rozpětí VOP	53
5.	Konstrukce VOP	55
5.1.	Konstrukční návrh	55
5.2.	Výpočet zatížení pro pevnostní kontrolu	56
5.2.1.	Liniové zatížení VOP	56
5.2.2.	Posouvající síla, ohybový a krouticí moment	57
5.3.	Stabilizátor VOP	58
5.3.1.	Vstupní hodnoty	58
5.3.2.	Pevnostní výpočet.....	60
5.4.	Výpočet závěsů.....	67
5.4.1.	Zatížení závěsů.....	67
5.4.2.	Přední závěs	68
5.4.3.	Zadní závěs.....	70
5.5.	Výškové kormidlo	72
5.5.1.	Vstupní hodnoty	72
5.5.2.	Pevnostní výpočet.....	73
ZÁVĚR		81
LITERATURA.....		82
Seznam použitých symbolů.....		83
Seznam příloh		88



ÚVOD

Letoun jako sofistikovaný produkt strojího průmyslu stojí vysoko na pomyslné pyramidě konstrukční komplexnosti. Skládá se z celé řady součástí, komponentů a vybavení. Právě pro náročnost vybalancování jednotlivých prvků nelze téměř nikdy letoun považovat za konečný a neměnný. Standardním postupem moderního inženýrství je dlouhodobé vylepšování parciálních částí celku ve snaze o přiblížení optima. Jak praktické zkušenosti vzešlé z reálného používání, tak dynamický rozvoj leteckého průmyslu umožňuje přinášet nové poznatky do praxe.

Cílem této diplomové práce je prozkoumání přínosu posunutí vodorovných ocasních ploch letounu VUT-100. Je diskutováno posouzení důsledků zvětšení ramene a zmenšení plochy VOP na letové vlastnosti, letové výkony a zhodnocení pozitiv a negativ spojených s takovou úpravou. Dále je proveden výpočet zatížení upravené vodorovné ocasní plochy. Práce obsahuje i návrh základní konstrukce modifikované VOP.



1. VUT-100 Cobra

1.1. Popis letounu

Před samotnou prací na modifikaci vodorovných ocasních se nejprve blíže seznámíme s letounem. VUT 100 je jednomotorový dolnoplošník se zatahovatelným podvozkem navržený primárně pro turistické a sportovní létání. Nezanedbatelným způsobem využití jsou základní výcvikové lety pilotů případně nácvik nočních letů, startů a přistání. Letoun se zdvojeným volantovým řízením a kapacitou až pěti cestujících (včetně dvou pilotů) je pro tyto činnosti velmi prakticky navržen. Tím pádem je VUT 100 konstruován a později certifikován podle evropského předpisu CS-23.



Obr. 1.1.

Křídlo je navrženo jako celokovové s lichoběžníkovým půdorysem, základními „stavebními“ kameny jsou centroplán a vnější křídlo obě konstruované jako samonosná polo-skořepina. Integrální palivové nádrže, jsou umístěné v přední dutině křídla (s objemem 340l). Vztlaková mechanizace se skládá z Fowleorových klapek, konce křídel jsou zakončeny winglety. Centroplán je pevně připojen k zadní části trupu.

Cílovým zájmem této práce jsou ocasní plochy respektive vodorovné ocasní plochy, které na VUT 100 jsou uspořádány standardně. Standardem v současnosti rozumíme sestavu vodorovné a svislé ocasní plochy.

Svislá ocasní plocha je rozdělena na stabilizátor, který je pevnou součástí trupu a směrové kormidlo.

Vodorovné ocasní plochy jsou taktéž rozděleny na dvě části, stabilizátor pevně spojený s trupem pomocí závěsů a dělené výškové kormidlo s rohovými odlehčeními.

Konstrukce je složená s nosníku, podélníků a žeber, překrývaná duralovým potahem. Přejechod mezi kýlem a trupem je vytvářen z kompozitu.



Trup letounu je polo-skořepinovou konstrukcí, složenou z nosníku, přepážek a duralových potahů. Po délce je trup rozdělen na přední masku s kryty motorů (oddělené protipožární přepážkou), střední a zadní část trupu.

1.2. Základní technické charakteristiky

Koncepční parametry

- Samonosný dolnoplošník
- Celokovová konstrukce
- Motor: WALTER M337A
- Vrtule: V456 (třilístá, stavitelná za letu)

Hmotnost

- Maximální vzletová hmotnost - kategorie NORMAL: 1330 kg
- Maximální vzletová hmotnost - kategorie UTILITY: 1100 kg
- Prázdná hmotnost: 690 kg
- Hmotnost paliva: max. 242 kg

Křídlo

- Plocha: 13, 11 m²
- Rozpětí: 10, 2 m
- Štíhlost: 7, 936
- Profil: LS – 417 kořenový
LS – 413 koncový

Vodorovné ocasní plochy

- Plocha: 1,424 m²
- Rozpětí: 1,76 m

Svislé ocasní plochy

- Plocha: 1, 424 m²
- Celková výška: 1, 76 m

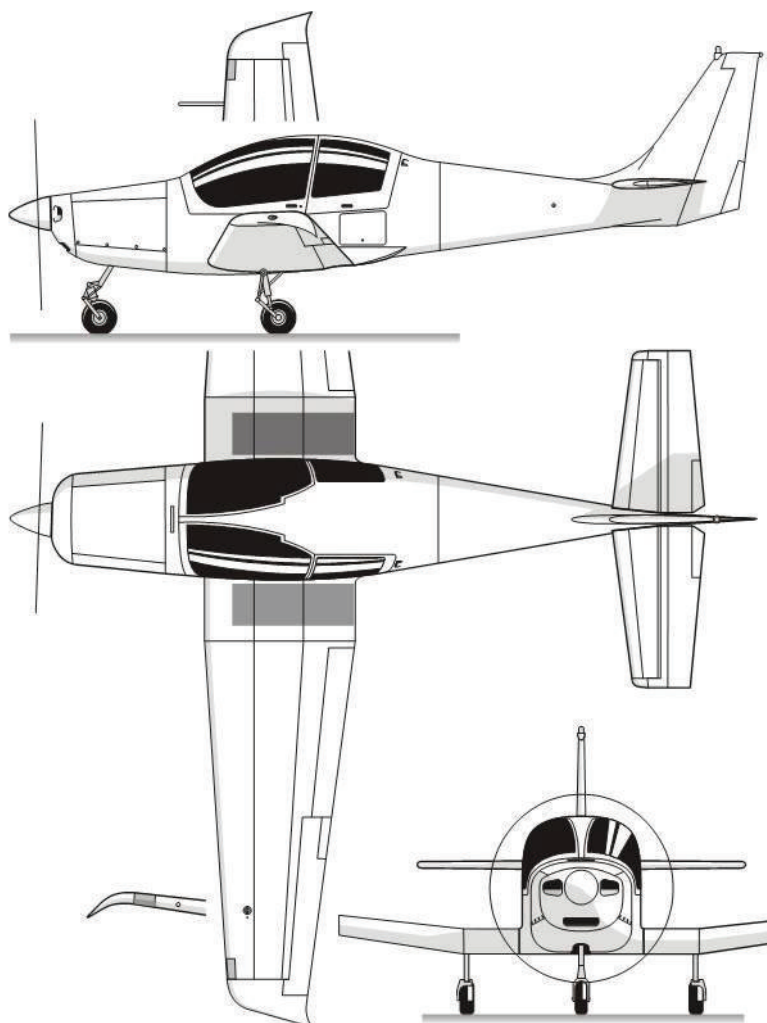
Výkony

- Navrhovaná rychlost strmého letu V_D : 380 km/h
- Maximální rychlost cestovního letu V_C : 280 km/h
- Návrhová rychlost obrátů V_A : 220 km/h

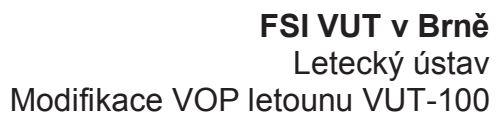


- Maximální přípustná rychlost při plně vychýlených vztlakových klapkách V_{FE} : 180 km/h
- Minimální rychlost při vysunutých klapkách V_{S0} : 95 km/h
- Minimální rychlost bez klapek V_{S1} : 115 km/h
- Dolet (45' rezerva): 2000 km

1.3. Tří-pohledový náčrt letounu



Obr. 1.2. Muška VUT-100



Souřadný systém je převzat ze základních aerodynamických podkladů pro pevnostní výpočet letounu VUT-100 [3].



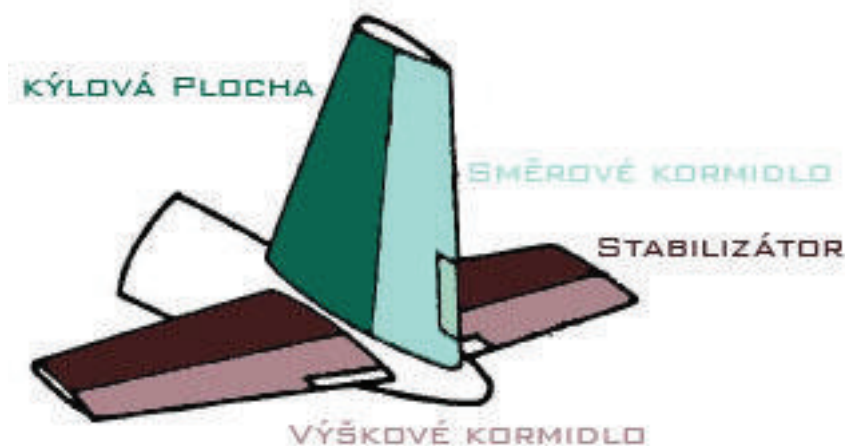


2. Modifikace VOP

2.1. Funkce vodorovných ocasních ploch

Prvním logickým krokem před návrhem respektive modifikací VOP je obecné zhodnocení funkce ocasních ploch. Zjednodušeně řečeno z poznatků aerodynamiky jasně vyplývá, že samotný let je umožněn působením výsledné aerodynamické síly na křídlo, jejíž složky (vztlak, odpor a klopivý moment) jsou vyjadřovány v závislosti na součinitelích jednotlivých složek, ploše křídla a konečně kinematickém tlaku. Křídlo jakožto primární vztlakové těleso letounu generuje rozhodující vztlak umožňující samotný let. Bohužel ani se započtením trupu nezajišťuje dostatečnou stabilitu a řiditelnost letounu jako celku (nejsou-li vybaveny dodatečnými prvky jako například autostabilní profily).

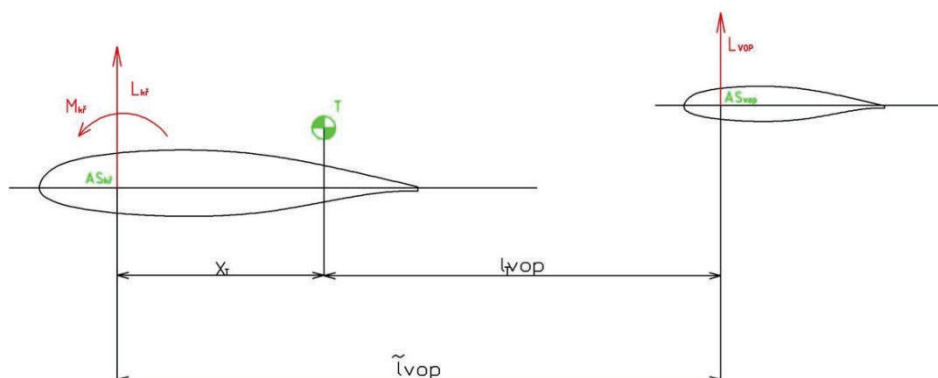
Ocasní plochy zajišťují stranovou, podélnou stabilitu a řiditelnost letounu. Pro současné letectví je typické uspořádání ocasu, složeného z vodorovné (VOP) a svislé ocasní plochy (SOP), (viz obr 2.1). SOP se standardně skládají z kýlové plochy a směrového kormidla. Jejich funkcí je zajištění požadované směrové stability.



Obr 2.1

Samotné vodorovné ocasní plochy se skládají ze stabilizátoru a výškového kormidla. VOP umožňují ustálený vyvážený let, tedy zabezpečení dostatečné podélné stability a řiditelnosti letounu. Sama podstata zajištění této stability spočívá v působení vztlaku VOP na hostečném rameni k těžišti, tento moment vyvažuje účinek klopivého momentu křídla viz obr 2.2.

;



Obr. 2.2.

Moment vodorovných ocasních ploch bereme jako zápornou hodnotu koeficientu vztlačku $c_{l_{VOP}}$ (malé momenty rozložení tlaku na VOP se zanedbávají) na rameni $\tilde{l}_{VOP}$. Přistoupíme-li ke kvantifikaci této závislosti, získáme následující vztah:

$$M_{kVOP} = -L_{VOP} \cdot \tilde{l}_{VOP} = -c_{LVOP} \cdot g_{VOP} \cdot S_{VOP} \cdot \tilde{l}_{VOP} \quad [1]$$

Součinitel klopivého momentu VOP, vyjádříme jednoduchou úpravou.

$$m_{kVOP} = \frac{M_{kVOP}}{g \cdot S_{kř} \cdot c_{SAT}} = -c_{LVOP} \cdot \frac{g_{VOP}}{g} \cdot \frac{S_{VOP} \cdot \tilde{l}_{VOP}}{S_{kř} \cdot c_{SAT}}$$

Dále:

Definujme mohutnost VOP, přičemž tato hodnota bude hrát rozhodující roli v budoucím výpočtu modifikace VOP. Zřetelně definuje poměr mezi umístěním a velikostí VOP ve vztahu k rozměrům křídla.

$$\tilde{V}_{VOP} = \frac{S_{VOP} \cdot \tilde{l}_{VOP}}{S_{kř} \cdot c_{SAT}}$$

Změnu dynamického tlaku na ocasních plochách oproti volnému proudu vzduchu definujeme poměr dynamického tlaku v místě křídla a VOP.

Konečně přikročíme ke konečnému dosazení do vztahu pro součinitel klopivého momentu.

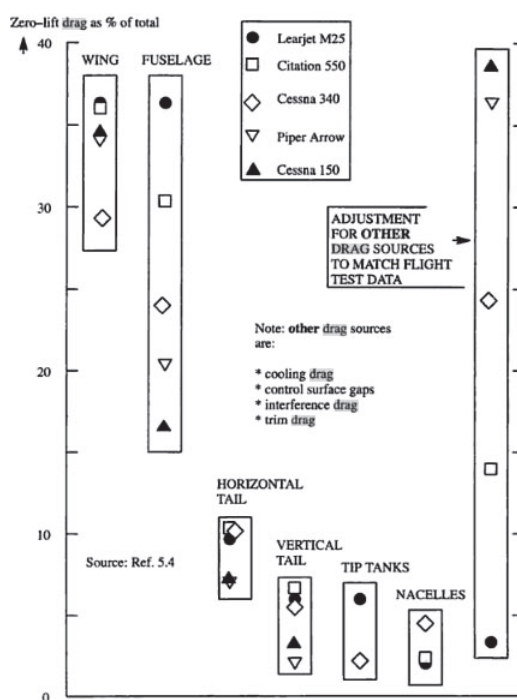
$$m_{kVOP} = -(\alpha + \varphi - \varepsilon) \cdot a_{VOP} \cdot k_{VOP} \cdot A_{VOP} \quad [1]$$

Výpis toho odvození je zcela zásadní pro pochopení funkce VOP v komplexním uvažování jeho funkce.



2.2. Důvody modifikace

Iniciační myšlenkou této diplomové práce je prozkoumání přínosů změny velikosti plochy (zmenšení) VOP při současném zvětšení ramene VOP tedy zachování mohutnosti VOP. Tato změna se projeví na částečném snížení odporu VOP respektive letounu jako celku. Změna odporu se dále projeví na snížení potřebného tahu letounu a tedy nárůstu hodnoty maximální rychlosti. Dalším přínosem je nepochybně ekonomičtější provoz letounu, i když tento přínos je poměrně malý.



Obr. 2.3 [6] Procentuální rozložení c_D pro jednotlivé části draku

Jak je popsáno výše vodorovné ocasní plochy zcela zásadně ovlivňují letové vlastnosti. Modifikace musí být navržena tak, aby nebyly podstatně ovlivněny letové vlastnosti (podélná stabilita, říditelnost atd.) Důsledky modifikace na tyto vlastnosti budou rozebírány později.

Velikost ocasních ploch má ve velké míře vliv na centráž a polohu těžiště. I tento fakt je třeba uvážit a prošetřit. Dá se předpokládat, že právě tento omezující faktor určí maximální hodnotu $\tilde{l}_{VOP}$. Příliš velké rameno $\tilde{l}_{VOP}$ by mělo za následek nutnost přídatného vyvážení letounu na přídí, nárůst hmotnosti by potom způsobil paradoxně více ztrát nežli přínosů.



Modifikace VOP v každém případě výrazně ovlivňuje další součásti letounu především trup a SOP. Podrobné vyřešení úprav těchto částí v důsledku modifikace není ani nemůže být součástí této diplomové práce.

Modifikace obsažená v této diplomové práci je navržena pro verzi letounu VUT100-120i.

2.3. Navržení modifikace

2.3.1. Změna plochy VOP

Jak již bylo zmíněno dříve, hlavní úpravou bude, zvětšení ramene VOP, tím pádem vztaková síla vodorovných ocasních ploch potřebná pro zajištění podélné stability se sníží. Plocha VOP se sníží společně se snížením odporu VOP. Ztrátu vztlaku vykompenzuje nárůst ramene.

$$\tilde{V}_{VOP} = \frac{S_{VOP} \cdot \tilde{l}_{VOP}}{S_{kř} \cdot c_{SAT}} \Rightarrow S_{VOPX} = \frac{\tilde{V}_{VOP} \cdot S_{kř} \cdot c_{SAT}}{\tilde{l}_{VOP}}$$

Z rovnice vyplývá, že vztah mezi velikostí plochy VOP, její vzdáleností AS vodorovných ocasních ploch a těžiště je nepřímo úměrný. Proto je nezbytné určit mezní hodnotu $\tilde{l}_{VOP}$ pro níž bude modifikace stále výhodná. Níže uvedeným způsobem definujeme základní parametry VOP, podle kterých bude zvolena výsledná koncepce.

2.3.2. Konstrukční řešení

Způsobů úpravy VOP existuje celá řada. Mimo zvýšení ramene se změnou plochy, by bylo možné využít změny poměrných parametrů VOP. V této diplomové práci se autor rozhodl pro co největší možné zachování dědičnosti konstrukce, zachovat hodnoty štiřlosti A_{vop} , vzepětí γ_{vop} a zúžení VOP λ_{vop} . Tento postup je zvolen také pro co nejmenší zásah do letových vlastností, při současném využití předností výchozí koncepce VOP VUT-100.

A_{vop}	4,613
γ_{vop}	0°
λ_{vop}	0,5799



Pomocí jednoduché algoritmizace je proveden výpočet základních parametrů konstrukce, v dalších částech budou pro jednotlivé kroky vypočteny příslušné charakteristiky. Tento postup je zvolen ze snahy, zjištění co nejoptimálnější polohy VOP. A zároveň zhodnocení kladů a záporu zvětšování ramene VOP, podpořených výpočtem.

V tabulce 2.1 jsou římskými číslicemi označeny a vypsány charakteristické varianty modifikace. Nulou je označené přibližné původní upořádání VOP.

Modifikace	Uspořádání VOP			Geometrie VOP		
	l_{vop}	S_{vop}	Posun VOP	Rozpětí	C_{root}	C_{tip}
0	4,15	2,71	0,00	3,80	0,97	0,56
I	4,35	2,58	0,19	3,72	0,95	0,55
II	4,55	2,47	0,39	3,64	0,93	0,54
III	4,75	2,37	0,59	3,57	0,91	0,53
IV	4,95	2,27	0,79	3,50	0,89	0,52
V	5,15	2,18	0,99	3,44	0,87	0,50
VI	5,35	2,10	1,19	3,38	0,85	0,50
VII	5,55	2,03	1,39	3,32	0,84	0,49
VIII	5,75	1,96	1,59	3,27	0,82	0,48
IX	5,95	1,89	1,79	3,22	0,81	0,47
X	6,15	1,83	1,99	3,17	0,80	0,46

Tab. 2.1. Geometrie VOP

2.3.3. Hmotový odhad

Hmotnost trupu

Je logické, že s posunem VOP dojde k prodloužení trupu. S tímto prodloužením, vzrůstá i hmotnost trupu. Hmotnost trupu lze určit v tomto bodě pouze přibližně. Aproximace je provedena podle metodiky USAF. *Převzato [12]*

$$W_F = 200 \left[\left(\frac{W_{TO} \cdot n_{ult}}{10^5} \right)^{0,286} \cdot \left(\frac{l_f}{10} \right)^{0,857} \cdot \left(\frac{w_f + h_f}{10} \right) \cdot \left(\frac{v_c}{100} \right)^{0,338} \right]^{1,1}$$

Kde:

W_F je vypočtená hmotnost v librách

W_{TO} je vzletová hmotnost v librách

n_{ult} je maximální násobek zatížení

h_f je délka trupu udaná ve stopách



w_f je maximální šířka trupu udaná ve stopách

h_f je maximální výška trupu udaná ve stopách

v_c je návrhová rychlost cestovního letu KEAS v uzlech

Hmotnost VOP

Hmotnost samotné VOP je aproximována podle totožné metodiky USAF pro vodorovné ocasní plochy. *Převzato [12]*

$$W_H = 127 \left[\left(\frac{W_{TO} \cdot n_{ult}}{10^5} \right)^{0,87} \cdot \left(\frac{S_h}{100} \right)^{1,2} \cdot 0,289 \left(\frac{l_h}{10} \right)^{0,483} \cdot \left(\frac{b_h}{t_{rh}} \right)^{0,5} \right]^{0,458}$$

Kde:

W_H je vypočtená hmotnost VOP v librách

S_h je plocha VOP ve čtverečních stopách

l_h je vzdálenost AS křídla a AS VOP ve stopách

b_h je rozpětí VOP ve stopách

t_{rh} je maximální štíhlost kořenového profilu ve stopách

Shrnutí

Výsledky odhadů hmotností trupu a VOP pro jednotlivé modifikace jsou uvedeny v *tab. 2.2*, přičemž hodnoty jsou převedeny z liber na kilogramy.

Modifikace	Hmotnost TRUP		Hmotnost VOP	
	Hmot. Trup [kg]	Δ hmot. [kg]	Hmotnost VOP [kg]	Δ hmot. [kg]
0	150,15	0,00	25,66	0,00
I	154,00	3,85	25,27	-0,39
II	157,97	7,82	24,90	-0,76
III	161,93	11,78	24,55	-1,11
IV	165,89	15,74	24,22	-1,44
V	169,84	19,69	23,90	-1,76
VI	173,78	23,63	23,61	-2,05
VII	177,72	27,57	23,32	-2,34
VIII	181,65	31,50	23,05	-2,61
IX	185,58	35,43	22,80	-2,86
X	189,50	39,35	22,55	-3,11

Tab. 2.2. Odhad hmotností



Interpretace odhadu hmotnosti

Aproximace hmotnosti jak bylo uvedeno je pouze přibližná, v žádném případě není možné ji považovat za konečnou. Nicméně tento odhad nám umožní do značné míry určit trend negativního důsledku modifikace. Právě narůstající hmotnost trupu je důležitým faktorem pro určení optimálního ramene VOP. Nepřekročitelným parametrem modifikace je zachování vzletové hmotnosti $m_{TOW} = 1330\text{kg}$, při dodržení současné obálky letových konfigurací.

Poloha těžiště prázdného letounu (690kg) je rovna $x_{T,plet} = 0,184$ vztaženo střední aerodynamické těživě. Modifikací se zvýší hmotnost trupu zadní části, pro zachování vyvážení existují dvě základní možnosti:

- Vysazení motoru, tedy malé posunutí motoru dopředu
- Přidávaná zátěž na před letounu

Detailní vyřešení tohoto problému není pro svou náročnost součástí této diplomové práce.

2.4. Aerodynamické charakteristiky

Způsobů aerodynamického zefektivnění vodorovné ocasní plochy, tedy navýšení součinitele vztlaku, je celá řada. Nejjednodušší způsob je změna profilových charakteristik VOP, výběr profilu s větším součinitelem vztlaku, což samo o sobě umožní zmenšení potřebné plochy. Případně použití asymetrického profilu. V současnosti je pro VOP použit symetrický profil, tak jak je běžné u většiny letounů. Symetrický profil je používán zejména pro zajištění dostatečného vztlaku ve všech fázích letu. Z tohoto důvodu, bylo použití asymetrického profilu zavrženo.

Při modifikaci byl původní profil NACA 0010 nahrazen NACA 0009.

Pro každou verzi modifikace definujeme základní aerodynamické charakteristiky, na základě kterých bude kvantifikován přínos.

1. Součinitel vztlaku VOP při nulovém úhlu náběhu:

$$c_{Lvop} = c_{La,vop} \cdot k_{vop} \cdot \frac{S_{vop}}{S_{kř}} \left(\varphi_{vop} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \right)$$



Kde:

Velikost sklonu vztlakové čáry určíme podle vztahu: [4]

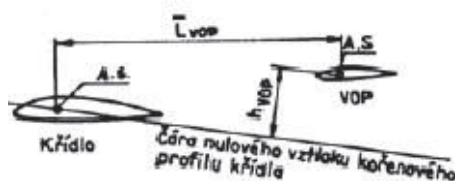
$$C_{L\alpha, vop} = \frac{2\pi}{1 + \frac{3}{\lambda_{vop} \cdot \cos(4,613^\circ)}}$$

Poměrem dynamických tlaků vyjádříme ovlivnění VOP přítomností křídla v proudu vzduchu.

$$k_{vop} = 1 - \frac{\Delta q}{q}$$

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{2,42 \cdot \sqrt{c_{D0kř}}}{\frac{l_{vop,1}}{c_{sat,kř}} + 0,3}$$

Vliv modifikace na srázový úhel je příznivý, s posunutím VOP se zmenšuje interference křídla na proud vzduchu v místě VOP.



Obr. 2.4 [2] Parametry pro určení srázového úhlu

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right) = 1,75 \cdot \frac{C_{L\alpha, vop}}{\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \bar{l}_{vop}}{b_{kř} \cdot \lambda}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(1 + \left|\frac{2 \cdot h_{vop}}{b_{kř}}\right|\right)}$$

Úhel náběhu VOP

$$\alpha_{vop} = \alpha \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right) + \varphi_{vop}$$

Úhel náběhu VOP je definován předešlou rovnicí, přičemž je ovlivněn derivací úhlu zešikmení proudu vzduchu v místě VOP. Úhel zešikmení sám o sobě je závislý na poloze křídla vzhledem k VOP (srázový úhel).



2. Součinitel odporu VOP

$$C_{Dvop} = C_{D0vop} + C_{Di vop}$$

Kde:

První složkou je součinitel odporu VOP při nulovém vztlaku. Jednotlivé koeficienty budou spočítány dále při konkrétním řešení. *Převzato [2]*

$$C_{D0vop} = R_{wf} + R_{LS} + C_f \cdot \left(1 + L' \cdot \left(\frac{t}{c} \right) + 100 \cdot \left(\frac{t}{c} \right)^4 \right) \cdot \frac{S_{wet}}{S_{kř}}$$

Druhou složkou je součinitel indukovaného odporu VOP.

$$C_{Di,vop} = \frac{C_{Lvop}^2}{\pi \cdot A_{vop} \cdot e_{vop}} \cdot \frac{S_{vop}}{S_{kř}}$$

Kde:

$e_{vop} = 0,5$ což je koeficient efektivity VOP

Shrnutí

Zcela zásadní pro posouzení modifikace je hodnota součinitele odporu. Hodnota odporu je závislá na poloze, geometrii, profilových parametrech a součiniteli vztlaku VOP. Hodnota indukovaného odporu vypočítána pro nulový úhel náběhu křídla.

Modifikace	$C_{D0,vop}$	$C_{Di,vop}$	$C_{D,vop}$
0	0,00168	0,00095	0,00263
I	0,00161	0,00076	0,00237
II	0,00154	0,00065	0,00219
III	0,00147	0,00057	0,00204
IV	0,00141	0,00049	0,00190
V	0,00136	0,00043	0,00179
VI	0,00131	0,00038	0,00169
VII	0,00126	0,00034	0,00160
VIII	0,00122	0,00030	0,00152
IX	0,00118	0,00027	0,00145
X	0,00114	0,00025	0,00139

Tab. 2.3 Koeficient odporu



2.5. Posouzení přínosu

2.5.1. Horizontální let

Pro každou variantu modifikace byla spočtena celková hodnota odporu letounu. A to pro rozsah rychlostí 115÷405 km/h.

Modifikace	Δ Opor			
	Δ průměr [%]	Max [%]	Min [%]	cd (vc)
0	-	-	-	0,6877
I	-0,9385	-1,1789	-0,2221	0,0396
II	-1,5626	-1,9651	-0,3679	0,0394
III	-2,1305	-2,6822	-0,4993	0,0393
IV	-2,6160	-3,2964	-0,6107	0,0393
V	-3,0268	-3,8169	-0,7042	0,0392
VI	-3,4064	-4,2987	-0,7901	0,0391
VII	-3,7604	-4,7486	-0,8698	0,0390
VIII	-4,0550	-5,1234	-0,9357	0,0000
IX	-4,1402	-5,1914	-0,9874	0,0000
X	-4,3481	-5,4521	-1,0370	0,0000

Tab. 2.4 Změna odporu letounu při horizontálním letu

Potřebný a využitelný výkon

Potřebný tah je tah nutný k překonání odporu letounu. Ke stanovení jeho hodnoty se vychází z rovnováhy odporu a tahu, a rovnováhy tíhové a vztlakové síly během ustáleného horizontálního letu.

$$F_p = \frac{c_D}{c_L} \cdot G$$

Využitelný tah je motorovou charakteristikou.

$$F_v = T \cdot g$$

Potřeba a využitelný výkon vypočteme jednoduchým vynásobením tahu rychlostí, přičemž výkon má větší vypovídající hodnotu při posuzování letounů s pístovým motorem.

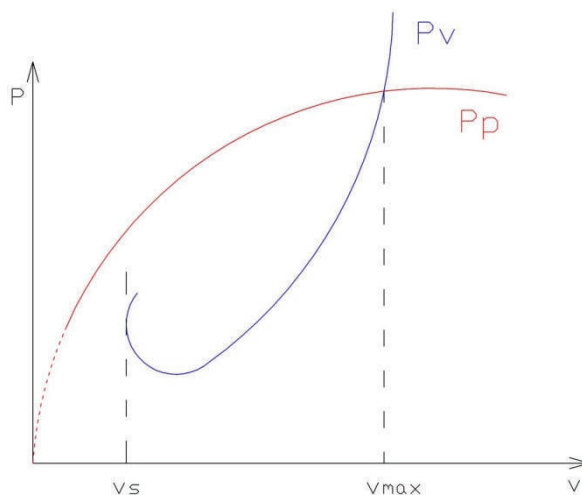
$$P_p = F_p \cdot v = \frac{c_D}{c_L^{3/2}} \cdot \sqrt{\frac{2G^3}{\rho \cdot S}}$$



Naopak využitelný výkon je násobkem účinnosti vrtule a výkonu motoru.

$$P_v = \eta_{vrt} \cdot P_{mot}$$

Pomocí závislosti potřebného výkonu na rychlosti a využitelného výkonu jednoduše určíme maximální rychlosti letounu.



Obr. 2.5 Potřebný a využitelný tah

Pro výpočet maximální rychlosti je použita grafická metoda. Maximální rychlost náleží bodu, ve kterém platí rovnost $P_p = P_v$.

Modifikace	Maximální rychlost	
	V_{max} [km/h]	ΔV_{max} [km/h]
0	284,14	-
I	285,5	2,07
II	286,21	1,36
III	287,21	3,07
IV	287,86	3,72
V	288,43	4,29
VI	289,01	4,87
VII	289,43	5,29
VIII	289,86	5,72
IX	290,28	6,14
X	290,42	6,28

Tab. 2.5

Hodnoty potřebného a využitelného výkonu následně vybrané verze modifikace jsou uvedeny v příloze C. Stejně tak tabulka účinnosti vrtule.



Dolet

Prodloužení trupu a sním spjatý nárůst hmotnosti se v každém případě projeví na velikosti doletu letounu. Pro větší názornost, a současném zjednodušení výpočtu je vypočítán pouze poměr doletu modifikace k původní verzi. První člen je konstantní, z toho důvodu není rozebírán.

$$R = \frac{2 \cdot K_{max} \cdot \eta_{vrt}}{g \cdot c_{eP}} \cdot \arctg \frac{\frac{c_{L1}}{c_{kL}} \cdot \bar{m}_{pal}}{1 + \left(\frac{c_{L1}}{c_{kL}}\right)^2 \cdot (1 - \bar{m}_{pal})}$$
$$\Rightarrow \Delta = \frac{R_x}{R_0}$$

Kde:

c_{L1} je součinitel vztlaku pro danou rychlost

c_{kL} je součinitel vztlaku pro maximální klouzavost

$\bar{m}_{pal} = (1 - \frac{m_2}{m_1})$ což je poměrné množství paliva (hmotnost s prázdnými nádržemi k maximální vzletové hmotnosti)

Modifikace	ΔR [%]
0	-
I	-0,56233
II	-1,14662
III	-1,73314
IV	-2,32157
V	-2,91167
VI	-3,5032
VII	-4,09597
VIII	-4,6898
IX	-5,28455
X	-6,38356

Tab. 2.6 Změna doletu

Interpretace výsledků

Postupné zmenšování plochy VOP, snižuje celkový součinitel odporu letounu. Pro rozsah rychlostí 115 ÷ 405 km/h se hodnota průměrného procentuálního snížení součinitele odporu letounu pohybuje cca 1 ÷ 4 % $c_{D,let}$.

Přínos modifikace je závislý na rychlosti horizontálního letu, při nižších rychlostech je přínos výrazně menší. V intervalu (115 ÷ 165 km/h) je průměrné snížení od 0,3 ÷ 2 %



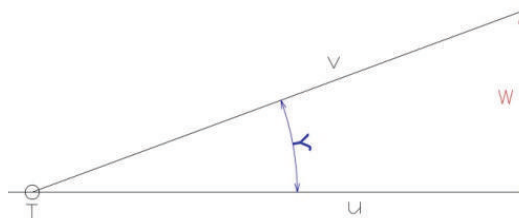
$c_{D,let}$ v závislosti na poloze VOP. Z aerodynamiky je jasné, že třecí odpor narůstá s rychlostí, proto se vliv modifikace (zmenšení S_{vop}) více projeví při vyšších rychlostech, kde se průměrný přínos pohybuje od $2,5 \div 4 \%$ $c_{D,let}$.

Ze snížení $c_{D,let}$ plyne pozitivní vliv úpravy ramene VOP na zvyšování maximální rychlosti, snížení c_D snižuje potřebný výkon letounu tím pádem i maximální rychlost v rozsahu $2 \div 6,3$ km/h.

Zcela zásadní je hledisko doletu letounu při horizontálním letu, které modifikace nepříznivě ovlivňuje z důvodu zvyšování hmotnosti draku respektive hmotnosti prázdného letounu. Jak již bylo rozebíráno, další přidané negativum modifikace je potřebné vyvážení přidané hmotnosti ocasní částí trupu. Přesný přírůstek hmotnosti není možné určit, nicméně z výše uvedeného odhadu lze získat představu o vlivu nárůstu l_{vop} na dolet a vytrvalost letounu.

2.5.2. Stoupavý let

V této kapitole zhodnotíme vliv posunu VOP během ustáleného stoupavého letu. Ustálený stoupavý let je z definice přímočarý let konstantní rychlostí ve vertikální rovině, za jehož charakteristické hodnoty můžeme považovat rychlost stoupání w a podélný sklon dráhy tedy úhel stoupání Y , případně gradient rychlosti.



Obr. 2.6 Stoupavý let

Rychlost stoupání

Stoupací rychlost je definovaná jako podíl přebytku výkonu a tíhové síly.

$$w = \frac{\Delta P}{G}$$



Úhel stoupání

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{w}{v}\right)$$

Modifikace	Δw	ΔY
	Průměr [%]	Průměr [%]
0	-	-
I	1,3458	1,3470
II	2,2261	3,0200
III	3,0172	2,8522
IV	3,6860	3,6894
V	4,2467	4,2507
VI	4,7606	4,5004
VII	5,2363	5,2412
VIII	5,6295	5,6348
IX	5,9964	6,0021
X	6,2975	6,3036

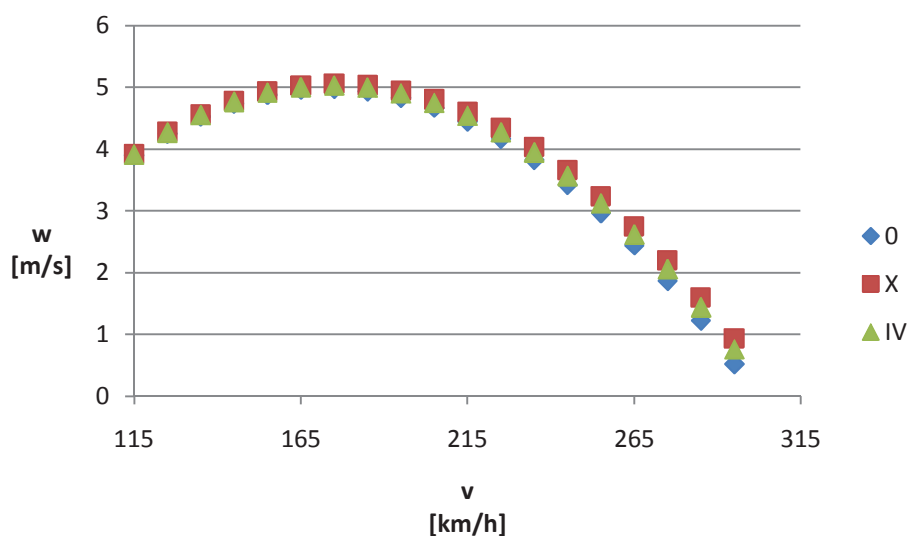
Tab. 2.7 Přírůsky modifikace pro stoupavý let

Interpretace výsledků

Vliv modifikace na vlastnosti stoupavého letu je poměrně zásadní, stoupací rychlost definujeme jako podíl přebytku tahu a tíhové síly. Přičemž přebytek tahu je rozdíl tahu využitelného a potřebného. Potřebný tah se zmenšením S_{vop} respektive $c_{D,let}$ zmenšuje a tím pádem roste rychlost stoupání.

Průměrný přírůstek stoupací rychlosti se jednotlivými kroky výpočtu zvětšuje z 1,3 na 6,3 %.

Velikost úhlu stoupání Y je odvozena z rychlosti letu a stoupací rychlosti, proto jeho změna vlivem modifikace je podobná změně w .



Obr. 2.7 Stoupavost

2.6. Volba parametrů modifikace

Dle výše uvedených výpočtů je nyní třeba zvolit finální modifikaci a její parametry. Jelikož VUT-100 Cobra je letoun určený pro sportovní a turistické létání a také výcvikové lety. Proto by úprava měla být efektivní v první řadě při horizontálním letu, tudíž dolet je jedním z kritických parametrů letounu. Nicméně vliv modifikace je pro stoupavý let je pozitivní a tento fakt je třeba přičíst k pozitivům modifikace.

Ačkoliv výše předložené výpočty jsou orientační (odhady hmotnosti trupu, VOP atd.), jasně z nich vyplývá, že prodloužení trupu výrazně zvýší hmotnost draku. Pro zachování konkurenceschopnosti VUT-100 musíme brát toto hledisko v potaz.

Každý výběr v případě neexaktního vymezení je do jisté míry individuální, založený na subjektivní volbě vytvořené na základě interpretace objektivních faktů.

Autor této diplomové práce po uvážení volí následující parametry finální verze modifikace VOP.

Předem definované parametry:

Kořenový a koncový profil	NACA 0009
Mohutnost VOP	0,6434
Štíhlost VOP	4,613
Zúžení VOP	0,5799
Vzepětí	0°



Rozměry a uspořádání VOP:

Plocha VOP	Rameno VOP	Posun VOP	Délka trupu	Rozpětí VOP	Kořenová hloubka profilu	Koncová hloubka profilu
2,1 m ²	5,35 m	1,2 m	8,31 m	3,11 m	0,864 m	0,495 m

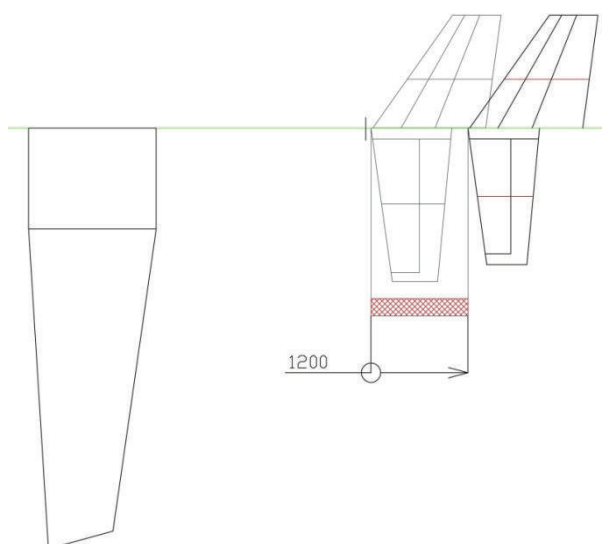
Δ Hmotnost VOP	Δ Hmotnost trupu
-2,34 kg	+23,62 kg

Charakteristiky modifikace:

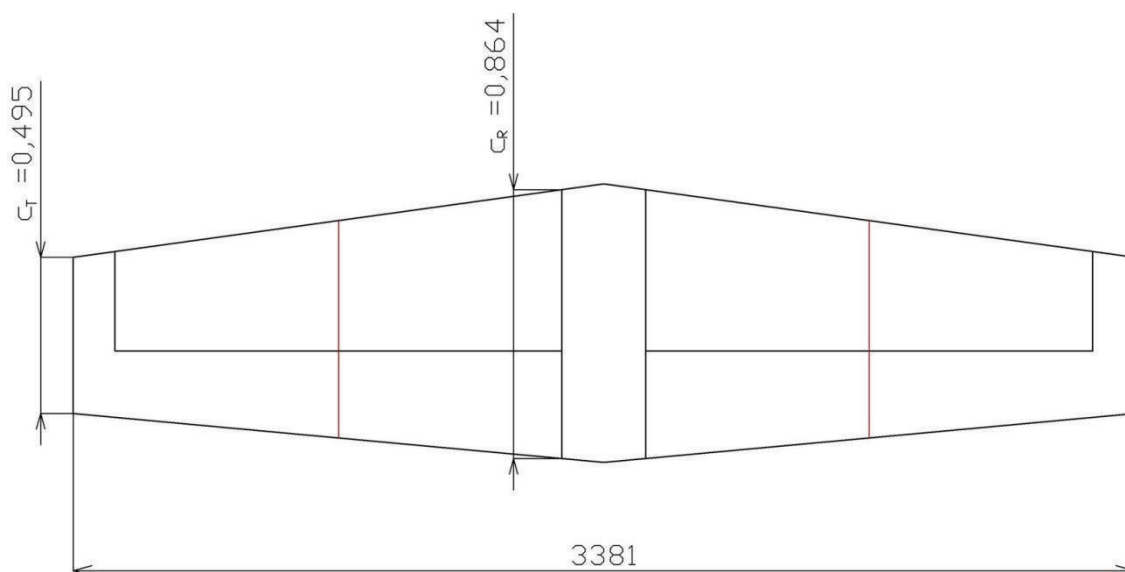
c_D	Průměrná Δc_D	Max Δc_D	Min Δc_D	Δ Dolet	Průměrné Δw	Průměrné ΔY
0,0016	-3,41 %	-4,29 %	0,79 %	-3,5%	4,7 %	4,5 %

v_{hmax}	Δv_{hmax}
289,01 km/h	4,87 km/h

Tab. 2.8



Obr. 2.8 Modifikované uspořádání VOP



Obr. 2.9 Geometrie modifikované ocasní plochy

3. Důsledky modifikace na letové vlastnosti

Z teoretické části jasně vyplývá, že velikost, pozice a konstrukce vodorovných ploch ovlivňuje letové vlastnosti letounu. V této kapitole jsou tyto důsledky kvalifikovány a kvantifikovány v některých případech v komparaci s výchozí koncepcí VOP. Výpočetní postup převzat především ze zdroje [2], okrajově potom zdroje [3], [4]

3.1. Podélná stabilita

3.1.1. Aerodynamická data letounu.

1. Sklon vztlakové čáry

$$c_{L\alpha, kř} = a_{kř} = 5,015 \text{ rad}^{-1}$$

2. Derivace úhlu zešikmení podle úhlu náběhu v místě VOP

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right) = 0,19433$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)_0 = 0,21684$$



3. Sklon vztlakové čáry VOP

Tab. 1.3.1 [2]

$$c_{L\alpha, vop} = a_{vop} = \frac{2\pi}{1 + \frac{3}{\lambda_{vop} + \cos(4,613^\circ)}}$$

$$c_{L\alpha, vop} = 3,802$$

$$c_{L\alpha, vop_0} = 3,878$$

4. Sklon vztlakové čáry letounu

$$a = a_{KT} + a_{vop} \cdot k_{vop} \cdot \frac{S_{vop}}{S_{kř}} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)$$

$$a = 6,0809$$

$$a_0 = 6,0829$$

3.1.2. Aerodynamický střed letounu

A. PEVNÉ ŘÍZENÍ

1. Příspěvek křídla

$$\bar{x}_{Akř} = 0,25$$

2. Příspěvek trupu

Přesný výpočet vlivu modifikace na příspěvek trupu by byl velice nepřesný. Proto je použita méně přesný postup a zjednodušený postup podle zdroje [1].

$$\Delta \bar{x}_{ATR} = -K_A \cdot \frac{b_{tr} \cdot c_0^2}{S \cdot c_{sat}} \cdot 1,05$$

$$\Delta \bar{x}_{A,TR} = -0,071$$

$$\Delta \bar{x}_{A,TR0} = -0,082$$

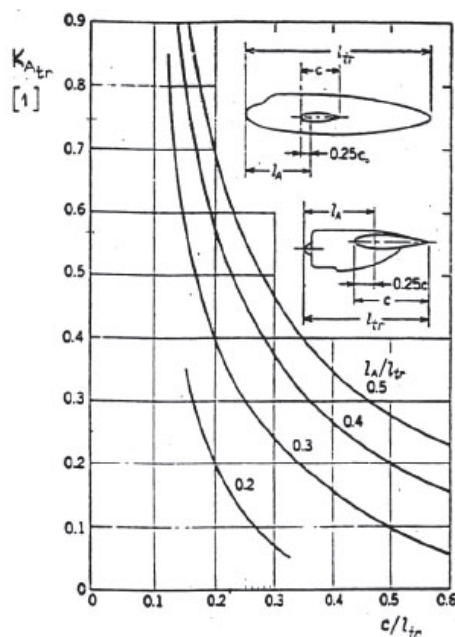


Kde:

K_A je koeficient určený z grafu na obrázku

b_{tr} je šířka trupu

c_0 je kořenová hloubka profilu



Obr. 3.1 Vliv trupu [1]

Lze konstatovat, že prodloužením trupu za křídlem o 4,9 % původní velikosti se zvýší příspěvek trupu o 14%, tedy posune aerodynamický střed příznivě dopředu.

3. Příspěvek VOP

$$\Delta \bar{x}_{A, vop} = k_{vop} \cdot \bar{V}_{VOP} \cdot \frac{a_{vop}}{a} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)$$

$$\Delta \bar{x}_{A, vop} = 0,319$$

$$\Delta \bar{x}_{A, vop} = 0,252$$

4. Poloha aerodynamického středu

$$\bar{x}_A = \bar{x}_{A, kř} + \Delta \bar{x}_{A, TR} + \Delta \bar{x}_{A, vop}$$

$$\bar{x}_A = 0,487$$

$$\bar{x}_{A_0} = 0,432$$



5. Statická zásoba s pevným řízením

$$\sigma_A = \bar{x}_A - \bar{x}_T = 13,662\%$$

$$\sigma_{A0} = \bar{x}_{A0} - \bar{x}_T = 7,515 \%$$

B. VOLNÉ ŘÍZENÍ

1. Účinnost výškového kormidla

Tab. 3.1.1., Tab. 3.1.2. [2]

$$\frac{\partial \alpha_{vop}}{\partial \delta} = n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 0,66$$

$$\left(\frac{\partial \alpha_{vop}}{\partial \delta} \right)_0 = n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{3,0} = 0,67$$

Kde:

$n = 0,82$	$k_1 = 1$
$k_2 = 0,9$	
$k_3 = 0,9$	$k_{3,0} = 0,9$

Tab. 3.1

2. Derivace součinitele vztlaku VOP dle výchylky VK

$$C_{Lvop\delta} = a_{vop} \cdot \left(\frac{\partial \alpha_{vop}}{\partial \delta} \right)$$

$$C_{Lvop\delta} = 2,525 rad^{-1}$$

$$C_{Lvop\delta} = 2,607 rad^{-1}$$

3. Derivace součinitele vztlaku letounu podle výchylky VK

$$C_{L\delta} = C_{Lvop\delta} \cdot k_{vop} \cdot \frac{S_{vop}}{S_{kř}}$$

$$C_{L\delta} = 0,381 rad^{-1}$$

$$C_{L\delta,0} = 0,538 rad^{-1}$$



4. Derivace součinitele vztlaku závěsového momentu VK dle výchylky VK

Tab. 3.5.1[2]

$$C_{H_\delta} = -0,14 \cdot F_2 \cdot a_{vop}$$

$$C_{H_\delta} = -0,346 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{H_{\delta,0}} = -0,326 \text{ rad}^{-1}$$

Kde:

$$F_1 = 0,5 \quad F_2 = 0,65$$

$$F_{1,0} = 0,46 \quad F_2 = 0,6$$

5. Derivace součinitele vztlaku závěsového momentu CCK podle úhlu náběhu letounu v místě VOP

Tab. 3.5.1[2]

$$C_{H_{\alpha vop}} = -0,12 \cdot F_1 \cdot a_{vop} \cdot \frac{S_{oo}}{S_{vop}}$$

$$C_{H_{\alpha vop}} = -0,039 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{H_{\alpha vop,0}} = -0,038 \text{ rad}^{-1}$$

6. Derivace součinitele vztlaku závěsového momentu VK podle úhlu náběhu VOP

$$C_{H_\alpha} = C_{H_{\alpha vop}} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)$$

$$C_{H_\alpha} = -0,032 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{H_{\alpha,0}} = -0,022 \text{ rad}^{-1}$$

7. Sklon vztlakové čáry s volným řízením

$$C'_{L_\alpha} = C_{L_\alpha} - C_{L_\delta} \cdot \frac{C_{H_\alpha}}{C_{H_\delta}}$$



$$C'_{L_\alpha} = 3,767 \text{ rad}^{-1}$$

$$C'_{L_{\alpha,0}} = 3,852 \text{ rad}^{-1}$$

8. Faktor uvolnění VK

$$f = 1 - \frac{C_{L_\delta}}{C_{L_\alpha}} \cdot \frac{C_{H_\alpha}}{C_{H_\delta}}$$

$$f = 0,991$$

$$f_0 = 0,991$$

9. Poloha aerodynamického středu s volným řízením

$$\bar{x}'_A = \bar{x}_A + \frac{f-1}{f} \cdot \frac{l_{*vop}}{c_{sat}}$$

$$\bar{x}'_A = 0,436$$

$$\bar{x}'_{A,0} = 0,403$$

10. Podélná statická zásoba letounu s volným řízením (zadní poloha těžiště)

$$\sigma'_A = \bar{x}'_A - \bar{x}_T$$

$$\sigma'_A = 9,563\%$$

$$\sigma'_{A,0} = 6,288\%$$

3.2. Podélná říditelnost

3.2.1. Dynamický bod letounu

A. PEVNÉ ŘÍZENÍ

1. Derivace vztřahu letounu dle bezrozměrné úhlové rychlosti klopení

$$C_{L_q} = 2 \cdot C_{L_{\alpha,vop}} \cdot A_{vop} \sqrt{k_{vop}}$$

$$C_{L_q} = (5,041 - 1,522 \bar{x}_T) \cdot \text{rad}^{-1}$$



$$C_{L_{q,0}} = (5,39 - 1,600\bar{x}_T) \cdot rad^{-1}$$

Kde:

$$l_{Tvop} = \tilde{l}_{vop} - (\bar{x}_T - \bar{x}_{AS,kř})c_{sat,kř} = 5,683 - 1,333\bar{x}_T$$

$$\tilde{V}_{vop} = \frac{S_{vop} \cdot l_{Tvop}}{S_{kř} \cdot c_{sat,kř}} = 0,684 - 0,16\bar{x}_T$$

$$l_{Tvop,0} = \tilde{l}_{vop,0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_{AS,kř})c_{sat,kř} = 4,49 - 1,333\bar{x}_T$$

$$\tilde{V}_{vop,0} = \frac{S_{vop,0} \cdot l_{Tvop,0}}{S_{kř} \cdot c_{sat,kř}} = 0,695 - 0,206\bar{x}_T$$

2. Derivace tlumení klopení

$$C_{m_q} = -C_{L_q} \cdot \frac{l_{Tvop}}{c_{sat}}$$

$$C_{m_q} = -(5,041 - 1,522\bar{x}_T) \cdot \frac{5,683 - 1,333\bar{x}_T}{c_{sat}} \cdot rad^{-1}$$

$$C_{m_{q,0}} = -(5,39 - 1,600\bar{x}_T) \cdot \frac{4,49 - 1,333\bar{x}_T}{c_{sat}} \cdot rad^{-1}$$

3. Dynamický bod s pevným řízením

$$\mu = \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot S \cdot c_{sat}} = 0,094m$$

$$\bar{x}_D = \bar{x}_A - \frac{C_{m_q}}{2 \cdot \mu - C_{L_q}}$$

$$\sigma_D = \bar{x}_D - \bar{x}_T$$

Přehled dynamická zásoby s pevným řízením pro různé polohy těžiště.

Modifikace	$\bar{x}_T$	$\bar{x}_D$	σ_D [%]
Přední poloha těžiště	0,136	0,40	26,95
Zadní poloha těžiště	0,34	0,41	7,46
Výchozí			
Přední poloha těžiště	0,136	0,36	22,73
Zadní poloha těžiště	0,34	0,38	3,17

Tab. 3.2 Dynamická zásoba s pevným řízením

Pozn. Hodnoty x v tabulkách jsou vztaženy ke střední aerodynamické těživě křídla.



B. VOLNÉ ŘÍZENÍ

1. Derivace součinitele závěsového momentu VK dle bezrozměrové úhlové rychlosti klopení

$$C_{Hq} = 2C_{H\alpha} \cdot \frac{l_{T\text{vop}}}{c_{sat}}$$

$$C_{Hq} = (-0,365 + 0,086\bar{x}_T) \cdot rad^{-1}$$

$$C_{Hq,0} = (-0,2883 + 0,086\bar{x}_T) \cdot rad^{-1}$$

2. Dynamický bod s volným řízením

$$D = -C_{L\delta} \cdot \frac{\tilde{l}_{vop}}{c_{sat}} \cdot C_{L\alpha}$$

$$D = -5,483$$

$$D_0 = -6,161$$

$$\bar{x}'_D = \bar{x}_D + \frac{D}{C_{H\delta} \cdot C'_{L\alpha}} \left(\frac{C_{H\alpha}}{C_{L\alpha}} + \frac{C_{Hq}}{2\mu - C_{Lq}} \right)$$

Výsledné hodnoty pro jednotlivé centráže jsou uvedeny v tabulce *Tab. 4.3*.

3. Dynamická zásoba s volným řízením

$$\sigma'_D = \bar{x}'_D - \bar{x}_T$$

Modifikace	x_T	x'_D	σ_D [%]
Přední poloha těžiště	0,136	0,36	22,37
Zadní poloha těžiště	0,34	0,37	2,95
Výchozí			
Přední poloha těžiště	0,136	0,32	18,3
Zadní poloha těžiště	0,34	0,35	0,89

Tab. 3.3 Dynamická zásoba s volným řízením

Pozn. Hodnoty x v tabulkách jsou vztaženy ke střední aerodynamické třetivě křídla.

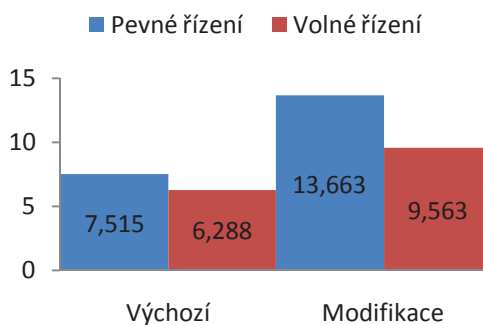


3.3. Zhodnocení důsledků modifikace na letové vlastnosti

Cílem práce je navrhnout modifikaci tak, aby co nejmenším možným způsobem negativně ovlivňovala letové vlastnosti letounu. V této kapitole byly dopady modifikace kvantifikovány s následujícími závěry.

Statická zásoba

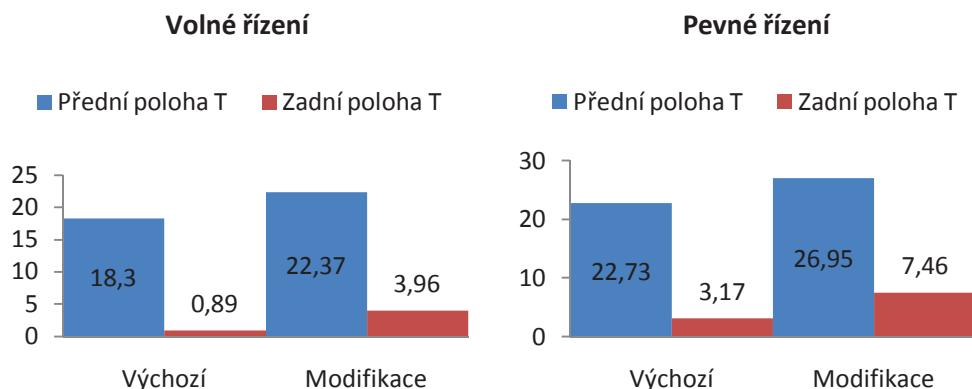
Statická zásoba vytváří představu o manévrovatelnosti letounu. Schopností velké manévrovatelnosti disponují letouny s menší statickou zásobou. Z tohoto hlediska modifikace má negativní vliv, jelikož poloha aerodynamického středu se jejím důsledkem posouvá směrem dopředu. Statická zásoba pro pevné i volné řízení je spočtena pro nejhorší možný případ tedy zadní centráž letounu.



Obr. 3.2 Statická zásoba

Dynamická zásoba

Důležitým poznatkem je že, hodnoty dynamické zásoby jsou stále kladné a dostačující. Čímž lze říci, že důsledkem modifikace výrazně se zvyšuje podélná stabilita letounu.



Obr. 3.3 Dynamická zásoba

4. Zatížení vodorovných ocasních ploch

V této kapitole bude proveden výpočet zatížení VOP podle požadavků předpisu CS-23. Výpočet je rozdělen do několika navazujících částí. V první části je vypočtena a znázorněna obálka zatížení VUT-100, po níž následuje výpočet vyvažovacího, nesymetrického a poryvového zatížení. Výpočet proveden pro kategorii NORMAL.

4.1. Obálka zatížení dle CS-23

1. Obratová obálka

$$W = \frac{1330}{0,4536} = 2932,148 \text{ lb} \quad S = \frac{13,101}{0,3048^2} = 141,104 \text{ sqft}$$

Návrhová cestovní rychlost

$$\frac{W}{S} = \frac{2932,148}{141,104} = 20,78 \quad \rightarrow \text{je třeba zjistit koeficient } K, \text{ který se pro interval poměru } W/S \text{ od 20 do 100 lineárně mění z hodnoty 33 na 28,6}$$

$$K = 32,9$$

$$V_{Cmin} \geq K \cdot \sqrt{\frac{W}{S}} = 20,78 \cdot \sqrt{\frac{2932,148}{141,104}} = 150,43 \text{ kt} = 278,6 \text{ km/h}$$



$$\rightarrow V_C = 280 \text{ km/h}$$

Návrhová rychlost střemhlavého letu

$$V_D \geq 1,4 \cdot V_{C_{\min}} = 1,4 \cdot 280 = 388,86 \text{ km/h}$$

$$\rightarrow V_D = 389 \text{ km/h}$$

Pádová rychlost

$$c_{L_{\max}} = 1,625 \text{ převzato [3]}$$

$$V_{S1} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot S \cdot c_{L_{\max}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1330 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 13,109 \cdot 1,625}} = 31,62 \text{ m/s} = 113,82 \text{ km/h}$$

Pádová rychlost na zádech

$$c_{L_{\min}} = 0,911 \text{ hodnota určená pomocí programu Glauert III}$$

$$V_{S2} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot S \cdot c_{L_{\min}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1330 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 13,109 \cdot 0,911}} = 42,23 \text{ m/s} = 152,02 \text{ km/h}$$

Návrhová obratová rychlost

$$\text{- podle CS-23 nesmí být provozní násobek menší než } n_1 = 3,8$$

$$V_A = V_{S1} \cdot \sqrt{n_1} = 31,62 \cdot \sqrt{3,8} = 61,63 \text{ m/s} = 221,88 \text{ km/h}$$

Návrhová obratová rychlost při letu na zádech

$$\text{- provozní násobek při letu na zádech } n_2 = -0,4 \cdot n_1 = -0,4 \cdot 3,8 = -1,52$$

$$V_G = V_{S2} \cdot \sqrt{n_2} = 41,2 \cdot \sqrt{1,52} = 52,06 \text{ m/s} = 187,42 \text{ km/h}$$

Letadlo je vybaveno odštěpnou vztlakovou klapkou sahající od kořene lichoběžníkové části křídla po křídélko. Součinitel vztlaku křídla s plně vysunutou klapkou je 2,235 *převzato* [3].

Pádová rychlost

$$V_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot c_{L_{\max f}} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1330 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 2,235 \cdot 13,109}} = 26,96 \text{ m/s} = 97,07 \text{ km/h}$$

Návrhová obratová rychlost

$$\text{- provozní násobek zatížení s plně vysunutou vztlakovou mechanizací je podle předpisu CS 23 } n_f = 2$$

$$V_{AF} = V_{SF} \cdot \sqrt{n_f} = 26,88 \cdot \sqrt{2} = 38,13 \text{ m/s} = 137,28 \text{ km/h}$$



Maximální rychlost

$$V_{\max F} \geq 1,4 \cdot V_S = 1,4 \cdot 31,62 = 44,27 \text{ m/s} = 159,37 \text{ km/h}$$

$$V_{\max F} \geq 1,8 \cdot V_{SF} = 1,8 \cdot 26,96 = 48,53 \text{ m/s} = 174,7 \text{ km/h}$$

→ maximální rychlost $V_{\max F} = 175 \text{ km/h}$

2. Poryvová obálka

- rychlost poryvu

$$U_C = 50 \text{ ft/s} = 15,24 \text{ m/s}$$

$$U_D = 25 \text{ ft/s} = 7,62 \text{ m/s}$$

- střední geometrická třetina křídla

$$\bar{c} = 1,33 \text{ m}$$

- sklon vztlakové čáry křídla

$$a_k = 5,015 \text{ rad}^{-1}$$

- hmotnostní poměr letounu

$$\mu_g = \frac{2 \cdot \left(\frac{W}{S}\right)}{\rho \cdot \bar{c} \cdot a \cdot g} = \frac{2 \cdot \left(\frac{1330 \cdot 9,81}{13,109}\right)}{1,225 \cdot 1,33 \cdot 5,015 \cdot 9,81}$$

$$\mu_g = 24,782$$

- zmírňující součinitel poryvu

$$k_g = \frac{0,88 \cdot \mu_g}{5,3 + \mu_g} = \frac{0,88 \cdot 24,834}{5,3 + 24,834} = 0,725$$

Násobek od poryvu při rychlosti V_C

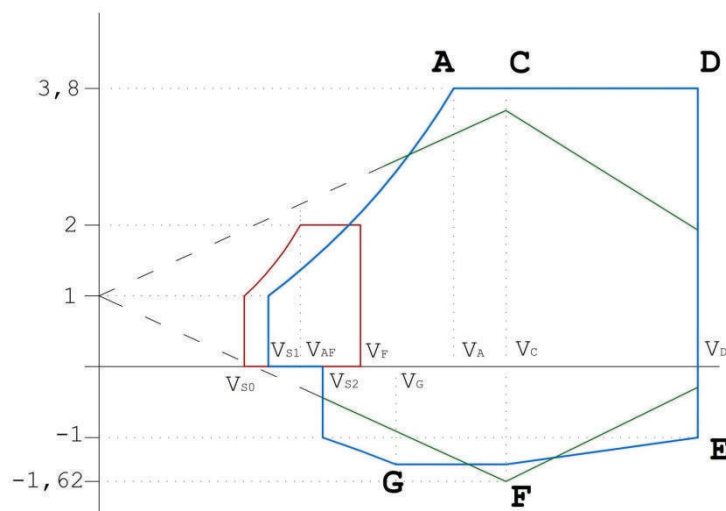
$$n_C = 1 \pm \frac{k_g \cdot \rho \cdot U_C \cdot V_C \cdot a_k}{2 \cdot (W/S)} = 1 \pm \frac{0,725 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot 77,79 \cdot 5,015}{2 \cdot (1330 \cdot 9,81 / 13,109)}$$

$$n_{C+} = 3,652 \quad n_{C-} = -1,652$$

Násobek od poryvu při rychlosti V_D

$$n_D = 1 \pm \frac{k_g \cdot \rho \cdot U_D \cdot V_D \cdot a_k}{2 \cdot (W/S)} = 1 \pm \frac{0,725 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot 108,06 \cdot 5,015}{2 \cdot (1330 \cdot 9,81 / 13,109)}$$

$$n_{D+} = 2,842 \quad n_{D-} = -0,326$$

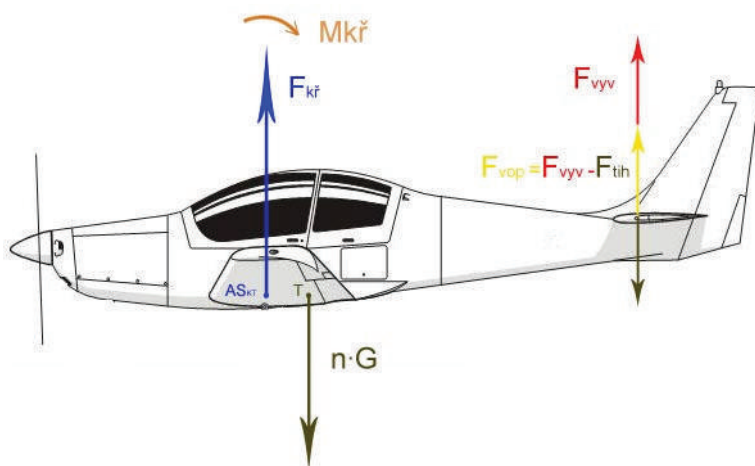


Obr. 4.1. Obálka zatížení VUT-100 v kategorii NORMAL



4.2. Vyvažovací zatížení

Vyvažovací zatížení definované předpisem CS 23.421 je zatížení nezbytné pro zajištění rovnováhy letounu ve všech letových případech s nulovým klopivým zrychlením. VOP musí být konstruovány pro všechny body provozní podmínky obrátů a pro podmínky s klapkami viz CS 23.345.



Obr. 4.2 Vyvažovací zatížení letounu

1. Vyvažovací síla

$$F_{vop} = \frac{M_y}{l_{vop}}$$

Kde:

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot c_{sat} \cdot c_{mKT} + n \cdot m \cdot g \cdot c_{sat} \cdot (\bar{x}_T - \bar{x}_{ASb,vop})$$

c_{mKT} je součinitel klopivého momentu konfigurace křídlo-trup (bez VOP)

$\bar{x}_T$ je poloha těžiště vztažená ke střední aerodynamické těživě

$\bar{x}_{ASb,vop}$ je aerodynamický střed konfigurace křídlo-trup (KT), který vztažený ku délce střední aerodynamické tělivy

$$l_{vop} = \tilde{l}_{vop} + (0,25 - \bar{x}_{ASb,vop}) \cdot c_{sat}$$

2. Tíhová síla od hmotnosti VOP

$$F_{vop,setr} = n \cdot m_{VOP} \cdot g$$



Kde:

n je násobek

m_{VOP} je hmotnost VOP

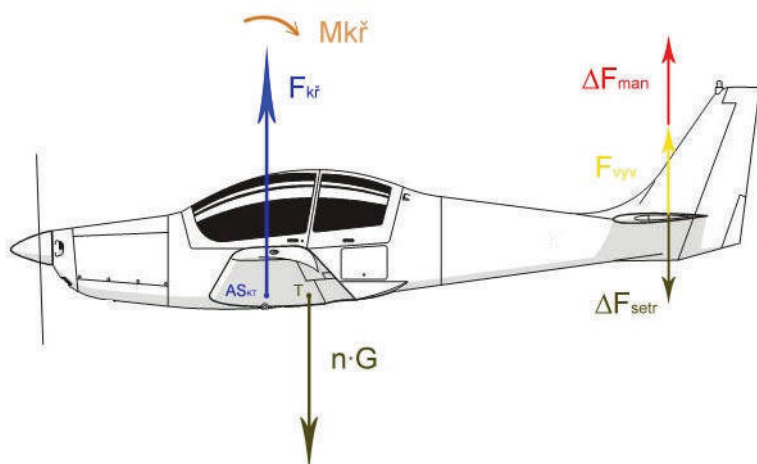
3. Celková vyvažovací síla na VOP

Celková vyvažovací síla vzniká rozdílem setrvačné a vyvažovací síly.

$$F_{vop,vyv} = F_{vop} - F_{vop,setr}$$

Výsledky výpočtu pro jednotlivé body obálky zatížení jsou uvedeny v tab. 4.2.

Vyvažovací zatížení na VOP								
	Bod	v [km/h]	n	m [kg]	x_T [%]	F_{vop} [N]	$F_{vop} \text{ tih}$ [N]	$F_{vop} \text{ vyv}$ [N]
Obratová obálka	S1	113,82	1	1330	0,136	-707,465	222,9	-929,76
					0,34	-247,337		-496,631
	A	221,88	3,8	1330	0,136	-	844,72	-
					0,34	2688,402		3533,122
						-939,913		-
								1784,633
	C	280	3,8	1330	0,136	-	844,72	-
					0,34	3245,302		4090,021
						-		-
						1496,813		2341,533
	D	389	3,8	1330	0,136	-	844,72	-
					0,34	4637,510		5482,230
						-		-
						2889,021		3733,741
	E	389	-1	1330	0,136	-	-222,29	-
					0,34	2428,893		2206,598
						-		-
						2889,021		2666,727
	F	280	-1,62	1330	0,136	-751,405	-360,12	-391,288
					0,34	-		-
						1496,813		1136,696
	G	187,42	-1,52	1330	0,136	28,765	-337,89	366,653
					0,34	-670,631		-332,743
	S2	152,02	-1	1330	0,136	18,911	-222,29	241,205
					0,34	-441,218		-218,923
	SF	97,07	1	1330	0,136	-640,025	222,29	-862,319
					0,34	-179,896		-402,191



Obr. 4.3 Obrátové zatížení letounu

Pro časovou náročnost je výpočet obrátového zatížení proveden zjednodušenou formou, která je pro předběžný návrh dostačující.

Při manévru v bodě A nebo D dojde ke změně násobku o hodnotu Δn , což má za následek přírůstek zatížení.

$$\Delta F_{man} = \Delta n \cdot m \cdot g \cdot \left[\frac{x_{CG}}{l_{vopT}} - \frac{S_{vop}}{S_{kř}} \cdot \frac{a_{vop}}{a_{kř}} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \right) - \frac{\rho_0}{2} \cdot \left(\frac{a_{vop} \cdot S_{vop} \cdot l_{vopT}}{m} \right) \right]$$

Kde:

$\left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \right)$ je srázový součinitel

Výpočet úhlového zrychlení pro rychlost V_A . (pro rychlost V_D je použita hodnota stanovená předpisem)

$$\varepsilon = \frac{l_{vopT}}{J_y} \cdot \Delta F_{man}$$

Kde:

$$J_y = m \cdot i_y^2 = m \cdot (0,18 \cdot L_{tr})^2$$

$l_{T_{vop}}$ je vzdálenost mezi těžištěm křídla a těžištěm VOP, v tomto předběžném

výpočtu je rozdíl mezi $l_{T_{vop}}$ a $\tilde{l}_{vop}$ zanedbán

L_{tr} je délka trupu



Setrvačná síla způsobená rotačním zrychlením.

$$\Delta F_{set} = \varepsilon \cdot m_{vop} \cdot l_{vopT}$$

Celkové zatížení se vypočte z následujícího vzorce.

$$F_{cman} = \Delta F_{man} + \Delta F_{set} + F_{vyv}$$

Kde:

F_{vyv} je vyvažovací zatížení VOP před manévrem

Výsledky jsou uvedeny v tab. 4.4, přičemž maximální výchylka nahoru je 30° a dolů 20°.

	Δn	δ_{vop}	X_T [%]	L_{vopT} [m]	X_{cg} [m]	ε [rad/s ²]	F_{vyv} [N]	F_{set} [N]	ΔF_{man} [N]	F_{man} [N]
V _A	2,8	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	-8,689	-2688,40	1083,32	-4699,63	-8471,35
			34	5,230	0,214	-4,893	-939,91	-579,85	-2783,84	-4303,61
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	-8,689	-2688,40	1083,32	-4699,63	-8471,35
			34	5,230	0,214	-4,893	-939,91	-579,85	-2783,84	-4303,61
	-2,8	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	8,689	-2688,40	1083,32	4699,63	3094,55
			34	5,230	0,214	4,893	-939,91	579,85	2783,84	2423,78
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	8,689	-2688,40	1083,32	4699,63	3094,55
			34	5,230	0,214	4,893	-939,91	579,85	2783,84	2423,78
	2,52	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	-7,820	-2688,40	-974,99	-4229,67	-6144,57
			34	5,230	0,214	-4,403	-939,91	-521,87	-2505,46	-3967,24
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	-7,820	-2688,40	-974,99	-4229,67	-7893,06
			34	5,230	0,214	-4,403	-939,91	-521,87	-2505,46	-3967,24
	-2,52	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	7,820	-2688,40	974,99	4229,67	2516,25
			34	5,230	0,214	4,403	-939,91	521,87	2505,46	2087,41
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	7,820	-2688,40	974,99	4229,67	2516,25
			34	5,230	0,214	4,403	-939,91	521,87	2505,46	2087,41
V _D	2,8	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	0,676	-4637,51	84,26	-4699,63	-9252,88
			34	5,230	0,214	0,676	-2889,02	80,09	-2783,84	-5592,77
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	-0,676	-4637,51	-84,26	-4699,63	-9421,39
			34	5,230	0,214	-0,676	-2889,02	-80,09	-2783,84	-



										5752,96
	-2,8	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	2,235	-4637,51	278,69	4699,63	340,81
			34	5,230	0,214	2,235	-2889,02	264,92	2783,84	159,74
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	-2,235	-4637,51	-278,69	4699,63	-216,57
			34	5,230	0,214	-2,235	-2889,02	-264,92	2783,84	-370,10
	2	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	0,186	-4637,51	23,15	-3356,88	-
			34	5,230	0,214	0,186	-2889,02	22,00	-1988,46	7971,24
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	-0,186	-4637,51	-23,15	-3356,88	-
			34	5,230	0,214	-0,186	-2889,02	-22,00	-1988,46	8017,53
										-
										4855,48
										-
										1118,60
	-2	Nahoru	13,6	5,502	-0,058	1,300	-4637,51	162,03	3356,88	-
			34	5,230	0,214	1,300	-2889,02	154,02	1988,46	-746,54
		Dolů	13,6	5,502	-0,058	-1,300	-4637,51	-162,03	3356,88	-
			34	5,230	0,214	-1,300	-2889,02	-154,02	1988,46	1442,66
										-
										1054,58

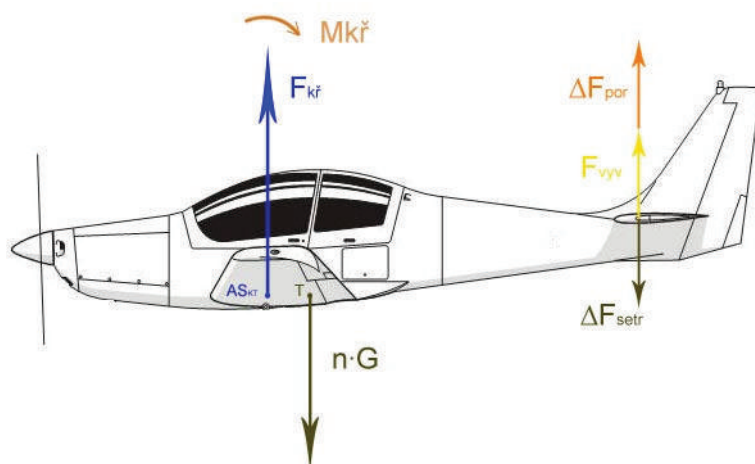
tab. 4.4 Obrátové zatížení letounu

4.4. Zatížení při poryvu

Podle předpisu CS 23.425 musí být VOP navrženy na zatížení vyvolané následujícími podmínkami:

- Pro všechny poryvové rychlosti (CS 23.333) se zasunutými vztlakovými klapkami.
- Kladné a záporné poryvy o jmenovité rychlosti 7,62 m/s při v_F odpovídající letovým případům z CS 23.345

Celkového zatížení VOP stanovíme pro výše stanovené podmínky. Prvním krokem je určení vyvažujícího zatížení pro ustálený nezrychlený let při v_F , v_C a v_D (uvedeno v tab. 4.6). Výsledné zatížení je dáno součtem přírůstku zatížení od poryvu, setrvačného a vyvažovacího zatížení.



Obr. 4.4 Poryvové zatížení letounu

Hodnoty vyvažovacího zatížení byly spočteny v kapitole 4.2 a jsou uvedeny v tab. 4.6.

Vyvažovací zatížení n=1						
	v [km/h]	m [kg]	x _T [%]	F _{vop} [N]	F _{vop} tih [N]	F _{vop} vyv [N]
VC	280	1330	0,136	- 1956,94	222,29	- 2179,236
			0,34	- 1772,75		- 1995,049
VD	389	1330	0,136	- 3349,15	222,29	- 3571,445
			0,34	- 3164,96		- 3387,257
VF	280	1330	0,136	- 1956,94	222,29	- 2179,236
			0,34	- 1772,75		- 1995,049

Tab. 4.6 Vyvažovací zatížená při n=1

Přírůstek zatížení od poryvu se určí podle následujícího vzorce, který je dán předpisem CS 23.

$$\Delta L_{vop} = \frac{\rho_0 \cdot K_g \cdot U_{de} \cdot v \cdot a_{vop} \cdot S_{vop}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right)$$



Kde:

ΔL_{vop} je přírůstek zatížení vodorovné ocasní plochy [N]

K_g je zmírňující součinitel poryvu (CS23.341/vypočteno výše)

U_{de} je odvozená rychlost poryvu [m/s]

v je ekvivalentní rychlost EAS [m/s]

4.4.1. Výpočet poryvového zatížení

Úhlové zrychlení vypočteme následujícího vzorce.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{vop} \cdot l_{vopT}}{J_y}$$

Setrvačné zrychlení získáme pomocí vzorce.

$$a_{s,vop} = \frac{\Delta L_{vop}}{m}$$

Setrvačná síla od poryvu.

$$F_{por,se tr} = m_{vop} \cdot (a_{s,vop} \cdot l_{vopT})$$

Celkové zatížení VOP v důsledku poryvu vypočteme jednoduchým součtem.

$$F_{por} = F_{vyv} + \Delta L_{vop} \pm F_{por,se tr}$$

Výsledné hodnoty pro potřebné rychlosti jsou uvedeny v tab. 4.7.



Poryvové zatížení											
	V [km/h]	x_T [%]	l_{vopT} [m]	U [m/s]	ΔL_{vop}	ε [rad/s ²]	$a_{s,vop}$	$F_{por,set}$ [N]	F_{vyv} [N]	F_{por+} [N]	F_{por-} [N]
VC	280	0,136	5,50	15,24	3387,8	6,26	2,55	317,6	-2179,2	1526,2	891,0
		0,34	5,23			5,95		301,9	-1995,0	1694,6	1090,9
VD	389	0,136	5,50	7,62	2353,3	4,35	1,77	220,6	-3571,4	-997,5	-1438,7
		0,34	5,23			4,14		209,7	-3387,3	-824,2	-1243,6
VF	280	0,136	5,50	7,62	1693,9	3,13	1,27	158,8	-2179,2	-326,5	-644,1
		0,34	5,23			2,98		150,9	-1995,0	-150,2	-452,1

Tab. 4.7 Poryvové zatížení

4.5. Nesymetrické zatížení

Podle předpisu CS 23.427 vodorovné ocasní plochy musí být navrženy nesymetrická zatížení vzniklá účinku vrtulového proudu vzniklého zatáčení osy letounu v kombinaci s dalšími letovými zatíženími, které jsou definované výše.

Konzervativní předpoklady určené normou:

- Na jedné straně roviny symetrie působí 100% maximálního zatížení, viz podmínky symetrického letu.
- Zatímco na opačné straně působí: $(100 - 10(n - 1))\%$ tohoto zatížení. Kde n je kladná násobek při obratech, hodnota nesmí překročit 80%.

Výchozím bodem výpočtu nesymetrického zatížení je určení maximálního zatížení, které působí na VOP.

$$F_{max,VOP} = 9421,4 \text{ N}$$

Podle předchozího vyplývá, že toto zatížení působí na jednu stranu. Přičemž zatížení opačné strany je určené.

$$nsym = (100 - 10(n_1 - 1))$$

$$nsym = (100 - 10(3,8 - 1)) = 62\%$$

Výsledná nesymetrická síla působící na opačnou stranu je rovna.

$$F_{max,VOP} = F_{max,VOP} \cdot 0,62 = 58421,27 \text{ N}$$



4.6. Definice rozhodujících případů zatížení

Před návrhem konstrukce VOP se stanoví přehled rozhodujících případů zatížení. Jednotlivé rozhodující případy jsou znázorněny v tab. 4.8.

Případ	Komentář	Hodnota
Manévr při V_D	Zadní centráž, výchylka dolů	$F_{\text{man}} = -9421,4 \text{ N}$
Poryv při V_C	Zadní centráž	$F_{\text{por}} = +1694,6 \text{ N}$
Poryv při V_D	Přední centráž	$F_{\text{por}} = -1438,7 \text{ N}$

Tab. 4.8 Rozhodující případy zatížení

4.7. Průběh zatížení po rozpětí VOP

Z předchozích výpočtů je patrné, že maximální síla působící na vodorovné ocasní plochy vzniká během manévru při rychlosti V_D . V této kapitole bude vypočteno rozložení zatížení po rozpětí a hloubce.

Zatížení po rozpětí

- Průměrné zatížení

$$w_{p,vop} = \frac{F_{VOP,max}}{S_{vop}}$$

$$w_{pVOP} = 4486,38 \text{ Nm}^{-1}$$

- Kořenový řez

$$q_{r,vop} = w_{p,vop} \cdot c_r$$

$$q_{r,vop} = 3876,23 \text{ Nm}^{-1}$$

c_r je kořenová hloubka profilu

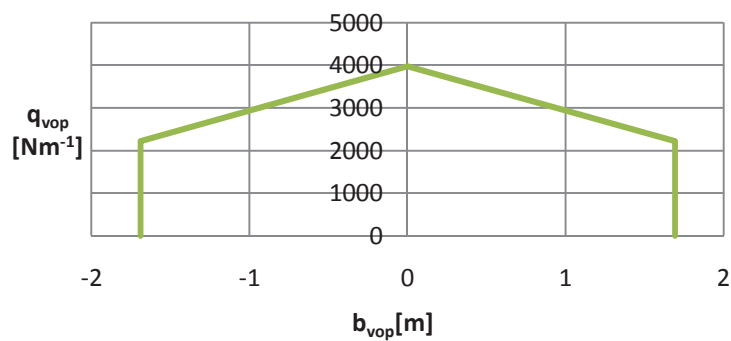
- Koncový řez



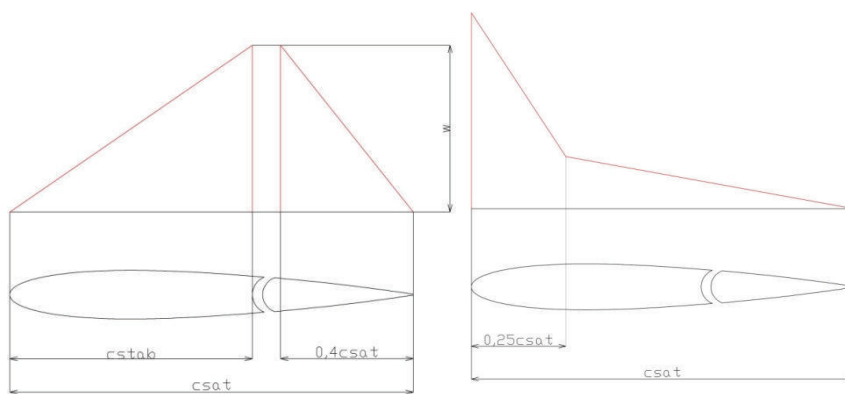
$$q_{t,vop} = w_{p,vop} \cdot c_t$$

$$q_{r,vop} = 2220,76 \text{ Nm}^{-1}$$

c_t je kořenová hloubka profilu



Obr. 4.5 Průměrné zatížení VOP po rozpětí



a) Manévrovací zatížení

b) Poryvové zatížení

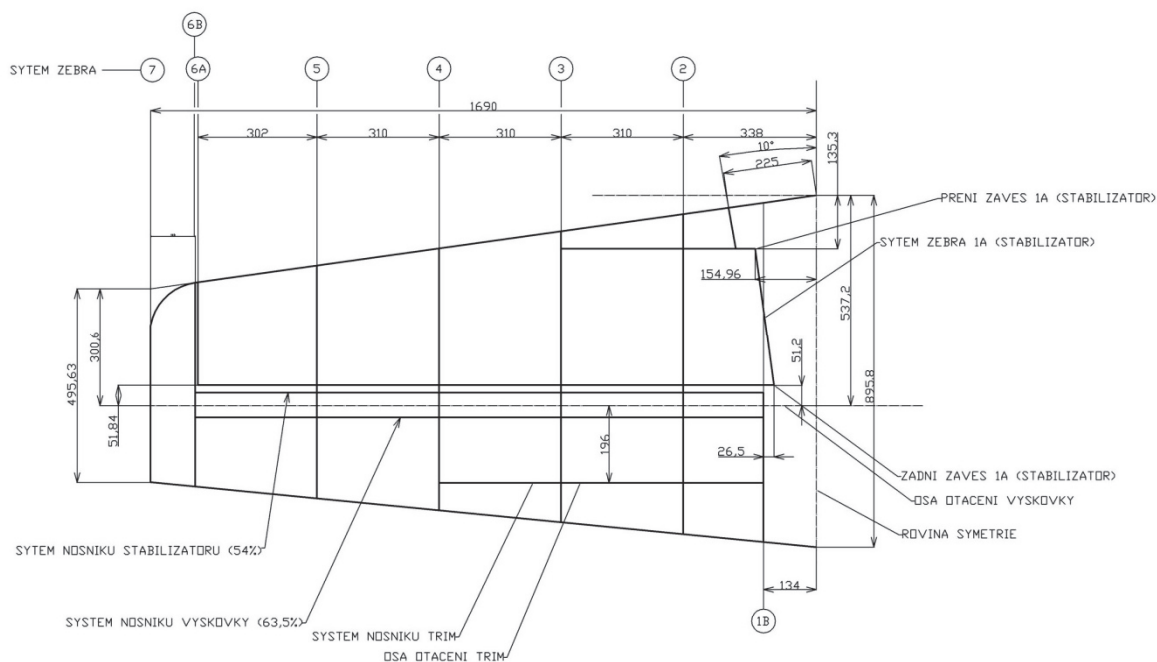
Obr. 4.6. Rozložení po hloubce VOP



5. Konstrukce VOP

5.1. Konstrukční návrh

Konstrukce modifikované VOP vychází z původní koncepce. Ve snaze o zachování dědičnosti konstrukce ocasu letounu jsou ponechány původní parametry uchycení k trupu. V této části diplomové práce je navržena konstrukce stabilizátoru a výškovky. Vyvažovací plocha TRIM není pro náročnost blíže rozebírána.



Obr. 5.1 Systémový výkres VOP

Systém zadního nosníku stabilizátoru je umístěn v 54% hloubky profilu po celém rozpětí VOP, přední nosník v 11,8 % do třetího žebra.

Osa otáčení výškovky je v 40% a systém nosníku v 63,5 % hloubky profilu.



5.2. Výpočet zatížení pro pevnostní kontrolu

5.2.1. Liniové zatížení VOP

1. Velikost zatížení pro jednotlivé řezy stabilizátor

$$q_s = w \cdot \frac{s}{2}$$

Kde:

s je hloubka stabilizátoru

2. Velikost zatížení střední části

$$q_a = w \cdot a$$

Kde:

a je hloubka mezi stabilizátorem a výškovkou

3. Velikost zatížení výškového kormidla

$$q_v = w \cdot v$$

Kde:

v je hloubka výškového kormidla

4. Celkové zatížení

Výškové kormidlo

$$q_{VK} = q_v + q_a$$

Vodorovná ocasní plocha jako celek

$$q_{vop} = q_v + q_a + q_s$$

Výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.1.

	y [m]	q_s [Nm ⁻¹]	q_a [Nm ⁻¹]	q_v [Nm ⁻¹]	q_{VK} [Nm ⁻¹]	q_{vop} [Nm ⁻¹]
kořen	0	1047,861	232,84	776,14	1008,99	2056,85
konec	1,556	599,6047	133,25	444,15	577,40	1177,00

Tab. 5.1 Zatížení kořenového a koncového řezu



5.2.2. Posouvající síla, ohybový a krouticí moment

Posouvající síla po rozpětí VOP

$$T = \int_0^{\frac{l_{vop}}{2}} q(y) \cdot dy$$

Ohybový moment po rozpětí VOP

$$M_o = \int_0^{\frac{l_{vop}}{2}} T(y) \cdot dy$$

Krouticí moment VOP

$$M_k = \int_0^{\frac{l_{vop}}{2}} q(y) \cdot r(y) dy$$

Pro určení početního zatížení jsou vypočtené hodnoty provozního zatížení vynásobeny součinitelem bezpečnosti 1,5. Grafické znázornění průběhu posouvající síly, ohybového a kroutivého momentu jsou uvedeny v příloze E.

POČETNÍ ZATÍŽENÍ VOP				
	y [m]	T [N]	M _o [Nm]	M _k [Nm]
Konec	1,56	0,00	0,00	0,00
9	1,40	147,62	22,97	19,60
8	1,24	453,12	118,04	62,92
7	1,09	779,17	270,24	112,07
6	0,93	1125,74	485,95	167,43
5	0,78	1492,85	771,56	229,36
4	0,62	1880,50	1133,47	298,24
3	0,47	2288,68	1578,06	374,44
2	0,31	2717,40	2111,73	458,31
1	0,16	3166,66	2740,87	550,24
Kořen	0	3636,45	3471,86	650,58

Tab. 5.2 Početní ztížení VOP po rozpětí



		POČETNÍ ZATÍŽENÍ VK			
		y	T	Mo	Mk
Konec		1,56	0,00	0,00	0,00
9		1,40	72,42	11,27	4,34
8		1,24	222,30	57,91	13,89
7		1,09	382,25	132,58	24,71
6		0,93	552,27	238,40	36,85
5		0,78	732,37	378,52	50,41
4		0,62	922,54	556,06	65,46
3		0,47	1122,79	774,16	82,07
2		0,31	1333,10	1035,97	100,33
1		0,16	1553,50	1344,60	120,31
Kořen		0,00	1783,96	1703,20	142,09

Tab. 5.3 Početní zatížení výškovky po rozpětí

5.3. Stabilizátor VOP

Vzhledem k faktu že maximální zatížení působí v kořenovém řezu a po rozpětí se snižuje. Za kritický případ označíme kořenový řez a provedeme pevnostní kontrolu. Přední i zadní nosníky jsou navrženy jako frézované a zužující se po rozpětí. Tento přístup je výhodný z hlediska technologické náročnosti a velké variability konstrukčních prvků.

5.3.1. Vstupní hodnoty

Dutiny

Dutina 1 (PD)		Dutina 2 (ZD)	
Plocha U_1 [m ²]	0,005	Plocha U_2 [m ²]	0,026
Obvod s_1 [mm]	243,66	Obvod s_1 [mm]	707
Tloušťka potahu t_{p1} [mm]	0,4	Tloušťka potahu t_{p1} [mm]	0,4
Vzdálenost nosníků b [mm]			353,45
Vzdálenost žebér l [mm]			331

Tab. 5.4 Parametry dutiny 1 a 2



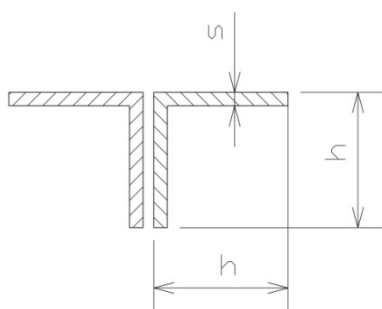
Nosníky

Přední nosník (PN)		Zadní nosník (ZN)	
h [mm]	66,7	h [mm]	65,3
h_{e1} [mm]	59,6	h_{e2} [mm]	55,3
t_1 [mm]	1	t_2 [mm]	0,8

Tab. 5.5 Parametry PN a ZN

Pásnice

- Přední nosník (11,8 % hloubky profilu)

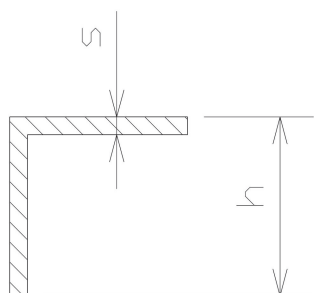


s_1 [mm]	1,5
h [mm]	15
Ap_1 [mm ²]	43,5

Pozn. Velikost plochy horní a dolní pásnice je totožná.

Přední nosník je označen indexem 1

- Zadní nosník (54% hloubky profilu)



s_2 [mm]	2
h [mm]	20
Ap_2 [mm ²]	2x76,4

Pozn. Zadní nosník je označen indexem 2



Materiál

Potah 6156-T4	Pásnice PN 2024-T3	Pásnice ZN 6020 - T8
$R_m = 265MPa$	$R_m = 400Mpa$	$R_m = 310MPa$
$R_{p0,2} = 135MPa$	$R_{p0,2} = 269Mpa$	$R_{p0,2} = 279MPa$
$E = 72000 MPa$		

Tab. 5.6 Materiál

Pozn. Stojiny jsou vyrobeny z 2024-T3

5.3.2. Pevnostní výpočet

- Kvadratický moment

$$J = \frac{A_h \cdot A_d}{A_h + A_d} \cdot h_e^2$$

$$J_1 = 271530,8 \text{ mm}^4 \quad J_2 = 66226,8 \text{ mm}^4$$

- Ohybově elastická osa

$$a = b \cdot \frac{J_{x2}}{J_{x1} + J_{x2}}$$

$$a = 69,3 \text{ mm}$$

- Poloha ohybově elastické osy

$$x_{oel} = 0,135 \cdot c + a$$

$$x_{oel} = 185,9 \text{ mm}$$

- Krouticí moment k ohybově elastické ose

$$M_k = M_{k.max} - T_L \cdot (x_{oel} - 0,25 \cdot c) - T_s \cdot (0,4 \cdot c - x_{oel})$$

$$M_k = -217,9 \text{ Nm}$$

- Základní smykové toky

$$q_{z1} = \frac{T_{maxp}}{h_1} \cdot \frac{b-a}{b} = 43,82 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$



$$q_{z2} = \frac{T_{maxp}}{h_2} \cdot \frac{a}{b} = 10,93N \cdot mm^{-1}$$

- Smykové toky potahu

$$M_k = 2 \cdot A_1 \cdot q_1 + 2 \cdot A_2 \cdot q_2$$

$$\frac{1}{2 \cdot A_1} \left(\int \frac{q_1}{G \cdot t_1} ds \right) = \frac{1}{2 \cdot A_2} \left(\int \frac{q_2}{G \cdot t_2} ds \right)$$

Složitými matematickými úpravami za pomoci Brettova vztahu a přetvárné podmínky získáme následující smykové toky potahu.

$$q_1 = -6,65N \cdot mm^{-1}$$

$$q_2 = -2,91N \cdot mm^{-1}$$

- Smykové toky ve stojinách nosníků

$$q_{v1} = q_{z1} + q_1 - q_2 = 40,08N \cdot mm^{-1}$$

$$q_{v2} = q_{z2} + q_2 = 8,08N \cdot mm^{-1}$$

Součinitel rezervy stojiny proti zvlnění

Přední a zadní nosník

- Z grafu 3.2 [10] se určí $k_{\tau 1} = 8,4$ $k_{\tau 1} = 8,3$
- Kritické napětí

$$\tau_{kr} = k_{\tau} \cdot E \cdot \left(\frac{t_s}{h_e} \right)^2$$

$$\tau_{kr1} = 40,08MPa \quad \tau_{kr2} = 10,02MPa$$

- Bezpečnost vůči zvlnění

$$\eta = \frac{\tau_{kr}}{\tau}$$

$$\eta_1 = 4,25$$

$$\eta_2 = 12,48$$



Kontrolní výpočet potahu

$R_{h1} = 568,04\text{mm}$	$R_{d1} = 568,04\text{mm}$
$R_{h2} = 217,71\text{mm}$	$R_{d2} = 217,71\text{mm}$
$R_{NH} = 18,88 \text{ mm}$	

Tab. 5.7 Zakřivení potahu

Náběžná hrana

- Výpočet převzat z tab. 3.2 [10]

$$k_{\tau_{RNH}} = 0,72$$

Kritické smykové napětí

$$\tau_{krNH} = k_{\tau_{RNH}} \cdot E \cdot \frac{t_p}{R_{NH}} \cdot \sqrt{\frac{R_{NH} \cdot t_p}{l}}$$

$$\tau_{krNH} = 119,9\text{MPa}$$

Smykové napětí potahu náběžné hrany

$$\tau_1 = \frac{|q_1|}{t_p} = 16.62\text{MPa}$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{NH} = \frac{\tau_{krNH}}{\tau_1}$$

$$\eta_{NH} = 7,2$$

Přední dutina

- Výpočet převzat z tab. 3.2 [10]

$$k_{\tau_{1h}} = 9,8$$

Kritické napětí ekvivalentní rovinné desky

$$\tau_{kr1h} = k_{\tau_{1h}} \cdot E \cdot \left(\frac{t_p}{l}\right)^2 = 2,11\text{MPa}$$



Kritické napětí s vlivem zakřivení

$$\tau_{kr1z} = \tau_{kr1h} + 0,1 \cdot E \cdot \frac{t_p}{R_{d1}} = 7,18 MPa$$

Smykové napětí v potahu přední dutiny

$$\tau_{1h} = \frac{|q_1|}{t_p} = 16,62 MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{1h} = \frac{\tau_{kr1z}}{\tau_{1h}}$$

$$\eta_{1h} = 0,44$$

Dojde ke zvlnění potahu, ale vzhledem k faktu, že potah nepřenáší ohybový moment, dutina vyhovuje.

Zadní dutina

- Výpočet převzat z tab. 3.2 [10]

$$k_{\tau 2h} = 7,9$$

Kritické napětí ekvivalentní rovinné desky

$$\tau_{kr2h} = k_{\tau 2h} \cdot E \cdot \left(\frac{t_p}{l}\right)^2 = 1,7 MPa$$

Kritické napětí s vlivem zakřivení

$$\tau_{kr2z} = \tau_{kr2h} + 0,1 \cdot E \cdot \frac{t_p}{R_{d2}} = 14,93 MPa$$

Smykové napětí v potahu přední dutiny

$$\tau_{2h} = \frac{|q_2|}{t_p} = 7,28 MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{1h} = \frac{\tau_{kr1z}}{\tau_{1h}}$$

$$\eta_{1h} = 2,05$$



Kontrola na pevnost (únosnost)

$$\eta_{p2h} = \frac{0,5 \cdot R_m}{\tau_{2h}}$$

$$\eta_{p2h} = 18,2$$

Nýťová spojení

V této části jsou prezentovány výsledky pevnostního výpočtu nýťových spojení, konkrétní výpočet je v příloze F.

Přehled součinitelů rezervy:

Nýťové spojení potahu a pásnice PD	$\eta_{nU1} = 2,61$
Stabilita potahu mezi nýty PD	$\eta_{U1} = 1,18$
Spojení potahu ZD a pásnice ZN	$\eta_{nU2} = 2,47$
Stabilita potahu mezi nýty ZD	$\eta_{U2} = 1,55$

Tab. 5.8 Součinitele rezervy nýťových spojení

Kontrola pásnic

- Rozdělení ohybových momentů

$$M_{oPN} = M_o \cdot \frac{J_1}{J_1 + J_2} \quad M_{oZN} = M_o \cdot \frac{J_2}{J_1 + J_2}$$

$$M_{oPN} = 2795.12 Nm \quad M_{oZN} = 681.74 Nm$$

- Síly do pásnic

$$N_{PN} = \frac{M_{oPN}}{h_{1e}} \quad N_{ZN} = \frac{M_{oZN}}{h_{2e}}$$

$$N_{PN} = 46885.47 N \quad N_{ZN} = 12326.16 N$$

- Napětí v pásnicích

Přední nosník (Tlak/Tah)

$$\sigma_{1H} = \frac{N_{PN}}{A_{p1}} \quad \sigma_{1D} = \frac{N_{PN}}{A_{p1}}$$

$$\sigma_{1H} = 306.84 MPa \quad \sigma_{1D} = 306.84 MPa$$



Zadní nosník

$$\sigma_{2H} = \frac{N_{PN}}{A_{p2}} \quad \sigma_{2D} = \frac{N_{PN}}{A_{p2}}$$

$$\sigma_{2H} = 284,67 \text{ MPa} \quad \sigma_{1D} = 284,67 \text{ MPa}$$

- Kontrola pevnosti v tahu dolní pásnice (únosnost)
(Pevnost je rozhodujícím namáháním pro dolní pásnice.)

Přední nosník

$$\eta_{1D} = \frac{R_{mPN}}{\sigma_{1D}} = 1,3$$

Zadní nosník

$$\eta_{1D} = \frac{R_{mZN}}{\sigma_{2D}} = 1,09$$

- Kontrola místní tvarové ztráty stability
(Horní pásnice jsou namáhány tlakem, stabilita je tedy rozhodující.)

Přední nosník

Výpočet proveden podle tab. 2.6 [10]

Tloušťka strany profilu $t_{prof1} = 1,2 \text{ mm}$

Tloušťka strany profilu $h_{prof1} = 12 \text{ mm}$

Součinitel uchycení $t_{prof1} = 1,2$

Kritické napětí

$$\sigma_{kr,HPN} = k_{prof} \cdot E \cdot \left(\frac{t_{prof1}}{h_{prof1}} \right)^2 = 802,52 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{kr,HPN,celk} = \frac{\sigma_{kr,HPN} \cdot A_{pH1} + \sigma_{krU1} \cdot t_p}{A_{pH1} + u \cdot t_p} = 802,52 \text{ MPa}$$



Součinitel rezervy

$$\eta_{1H} = \frac{\sigma_{kr,HPN,celk}}{\sigma_{1H}}$$

$$\eta_{1H} = 2,62$$

Zadní nosník

Výpočet proveden podle tab. 2.6 [10]

Tloušťka strany profilu $t_{prof2} = 2mm$

Tloušťka strany profilu $h_{prof2} = 20mm$

Součinitel uchycení $t_{prof2} = 1,2$

Kritické napětí

$$\sigma_{kr,HZN} = k_{prof} \cdot E \cdot \left(\frac{t_{prof2}}{h_{prof2}} \right)^2 = 802,52 MPa$$

$$\sigma_{kr,HZN} = 222,89$$

$$\sigma_{kr,HZN,celk} = \frac{\sigma_{kr,HZN} \cdot A_{pH2} + \sigma_{krU2} \cdot t_p}{A_{pH2} + u \cdot t_p} = 678,97 MPa$$

$$\sigma_{2Hp} = \frac{N_{PN}}{A_{pH2} + u \cdot t} = 222,89$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{2H} = \frac{\sigma_{kr,HZN,celk}}{\sigma_{1H}}$$

$$\eta_{2H} = 3,06$$



5.4. Výpočet závěsů

Pro zavěšení vodorovné ocasní plochy je v souladu s výchozí koncepcí použito dvoudobého závěsu. VOP je koncipována jako průběžná a oba závěsy jsou umístěny na horní straně potahu.

5.4.1. Zatížení závěsů

- Přední závěs

Ohybový moment

$$F_{y,PZ} = \frac{M_o}{h_{1e}} = 58320,9 \text{ N}$$

Posouvající síla

$$F_{z,PZ} = T = 3636,45 \text{ N}$$

- Zadní závěs

Ohybový moment

$$F_{y,ZZ} = \frac{M_o}{h_{2e}} = 62863,6 \text{ N}$$

Posouvající síla

$$F_{z,ZZ} = T = 3636,45 \text{ N}$$

- Materiál

Ocel L-ROL

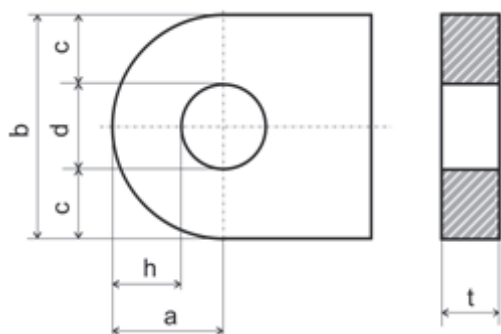
$R_{p0,2} = 1100 \text{ MPa}$	$E_L = 210000 \text{ MPa}$
$R_m = 1300 \text{ MPa}$	$G_L = 80000 \text{ MPa}$

Tab. 5.9 Materiál



5.4.2. Přední závěs

- Rozměry oka



$a = 15\text{mm}$	$c = 7\text{mm}$	$t = 6\text{mm}$
$b = 30\text{mm}$	$h = 7\text{mm}$	$d = 16\text{mm}$

Tab. 5.10 Parametry PZ

- Součinitele vlivů

(Výpočet je proveden podle tab. 4.4 [10])

$f_1 = 0,6$	$f_3 = 1$
$f_2 = 1,2$	$f_4 = 0,6$
$k_1 = 1$	$k_2 = 1$

Tab. 5.11 Součinitele vlivu PZ

- Výslednice působících sil

$$F_{v,PZ} = \sqrt{F_{y,PZ}^2 + F_{z,PZ}^2}$$

$$F_{v,HZ} = 58434,8\text{N}$$

- Kontrola na utržení oka

$$\sigma_{ut,PZ} = 1,15 \cdot \frac{|F_{y,PZ}|}{2 \cdot c \cdot t} = 799,99\text{MPa}$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{u,PZ} = \frac{R_m}{\sigma_{ut,PZ}} = 1,63$$

- Kontrola vysmeknutí čepu a roztržení oka



$$\sigma_{ro,PZ} = \frac{|F_{y,PZ}|}{d \cdot t} = 608,68 MPa$$

Z tabulky 4.2[10] $k_{Rm} = 0,65$

$$\sigma_{pro,PZ} = R_m \cdot k_{Rm} = 845 MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_v = \frac{\sigma_{pro,PZ}}{\sigma_{ut,PZ}} = 1,39$$

- Kontrola na utržení s ohledem na deformaci

$$\sigma_{ud,PZ} = \frac{|F_{y,PZ}|}{2 \cdot c \cdot t} = 695,65 MPa$$

$$\sigma_{ot,PZ} = 0,735 \cdot R_{p0,2} \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{0,75} = 1013,86 MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{ud,PZ} = \frac{\sigma_{ot,PZ}}{\sigma_{ud,PZ}} = 1,46$$

- Kontrola vysmeknutí čepu a roztržení oka s ohledem na deformaci

$$\sigma_{oo,PZ} = \frac{|F_{y,PZ}|}{d \cdot t} = 608,68 MPa$$

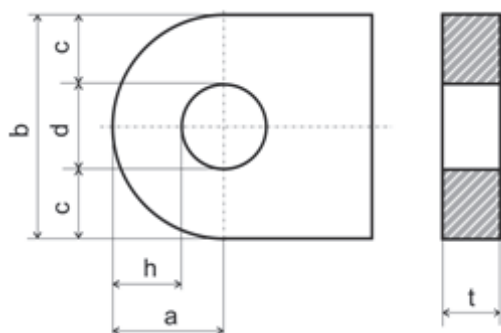
$$\sigma_{pk,PZ} = R_{p0,2} \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{0,75} = 620,73 MPa$$

$$\eta_{ud,PZ} = \frac{\sigma_{pk,PZ}}{\sigma_{oo,PZ}} = 1,02$$



5.4.3. Zadní závěs

- Rozměry oka



$a = 14mm$	$c = 7mm$	$t = 6mm$
$b = 30mm$	$h = 7mm$	$d = 16mm$

Tab. 5.12 Parametry ZZ

- Součinitele vlivů

(Výpočet je proveden podle tab. 4.4 [10])

$f_1 = 0,6$	$f_3 = 1$
$f_2 = 1,2$	$f_4 = 0,6$
$k_1 = 1$	$k_2 = 1$

Tab. 5.13 Součinitele vlivů ZZ

- Výslednice působících sil

$$F_{v,ZZ} = \sqrt{F_{y,ZZ}^2 + F_{z,ZZ}^2}$$

$$F_{v,ZZ} = 62968,69N$$

- Kontrola na utržení oka

$$\sigma_{ut,ZZ} = 1,15 \cdot \frac{|F_{y,ZZ}|}{2 \cdot c \cdot t} = 862,07MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{u,ZZ} = \frac{R_m}{\sigma_{ut,ZZ}} = 1,51$$

- Kontrola vysmeknutí čepu a roztržení oka

$$\sigma_{ro,ZZ} = \frac{|F_{y,ZZ}|}{d \cdot t} = 655,93MPa$$

Z tabulky 4.2[10] $k_{Rm} = 0,65$

$$\sigma_{pro,ZZ} = R_m \cdot k_{Rm} = 845MPa$$



Součinitel rezervy

$$\eta_v = \frac{\sigma_{pro,ZZ}}{\sigma_{ut,ZZ}} = 1,29$$

- Kontrola na utržení s ohledem na deformaci

$$\sigma_{ud,ZZ} = \frac{|F_{y,ZZ}|}{2 \cdot c \cdot t} = 749,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ot,ZZ} = 0,735 \cdot R_{p0,2} \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{0,75} = 1013,86 \text{ MPa}$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{ud,ZZ} = \frac{\sigma_{ot,ZZ}}{\sigma_{ud,ZZ}} = 1.35$$

- Kontrola vysmeknutí čepu a roztržení oka s ohledem na deformaci

$$\sigma_{oo,ZZ} = \frac{|F_{y,ZZ}|}{d \cdot t} = 655,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pk,ZZ} = R_{p0,2} \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{0,75} = 620,73 \text{ MPa}$$

$$\eta_{ud,PZ} = \frac{\sigma_{pk,PZ}}{\sigma_{oo,PZ}} = 1,02$$



5.5. Výškové kormidlo

Maximální zatížení působí v kořenovém řezu a po rozpětí se snižuje je pevnostní kontrola provedena pro kořenový řez. Předpokladem je opět frézovaný nosník zužující se po rozpětí výškovky.

5.5.1. Vstupní hodnoty

Dutiny

Dutina 1		Dutina 1	
Plocha U_1 [m ²]	0,003	Plocha U_2 [m ²]	0,007
Obvod s_1 [mm]	159,38	Obvod s_1 [mm]	201,9
Tloušťka potahu t_{p1} [mm]	0,5	Tloušťka potahu t_{p1} [mm]	0,5
Vzdálenost nosníků b [mm]		166,4	
Vzdálenost žeber l [mm]		204	

Tab. 5.14 Parametry dutiny 1 a 2

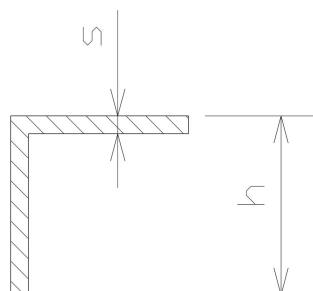
Nosníky

Přední nosník		Zadní nosník	
h [mm]	55,5	h [mm]	30,2
h_{e1} [mm]	43,64	h_{e2} [mm]	18,4
t_1 [mm]	0,8	t_2 [mm]	0,6

Tab. 5.15 Parametry PN a ZN

Pásnice

Pro oba nosníky je zvolená stejná pásnice.



s_1 [mm]	2,5
h [mm]	20
Ap_1 [mm ²]	94



Pozn. Velikost plochy horní a dolní pásnice je totožná.

Přední dutina je označena indexem 1 a zadní 2

Materiál

Potah 6156-T4	Pásnice PN 2024-T3	Pásnice ZN 6020 – T8
$R_m = 265MPa$	$R_m = 400Mpa$	$R_m = 310MPa$
$R_{p0,2} = 135MPa$	$R_{p0,2} = 269Mpa$	$R_{p0,2} = 279MPa$
$E = 7200MPa$		

Tab. 5.16 Materiál

Pozn. Stojiny jsou vyrobeny z 2024-T3

5.5.2. Pevnostní výpočet

- Kvadratický moment

$$J = \frac{A_h \cdot A_d}{A_h + A_d} \cdot h_e^2$$
$$J_1 = 89509,1 \text{ mm}^4 \quad J_2 = 15858,8 \text{ mm}^4$$

- Ohybově elastická osa

$$a = b \cdot \frac{J_{x2}}{J_{x1} + J_{x2}}$$

$$a = 25,1 \text{ mm}$$

- Poloha ohybově elastické osy

$$x_{Oel} = 0,166 \cdot c + a$$

$$x_{Oel} = 25,11 \text{ mm}$$

- Krouticí moment k ohybově elastické ose

$$M_k = M_{k,max} - T_L \cdot (x_{Oel} - 0,25 \cdot c) - T_s \cdot (0,4 \cdot c - x_{Oel})$$

$$M_k = -142,5 \text{ Nm}$$



- Základní smykové tok

$$q_{z1} = \frac{T_{maxp}}{h_1} \cdot \frac{b-a}{b} = 27,32 N \cdot mm^{-1}$$

$$q_{z2} = \frac{T_{maxp}}{h_2} \cdot \frac{a}{b} = 8,89 N \cdot mm^{-1}$$

- Smykové toky potahu

$$M_k = 2 \cdot A_1 \cdot q_1 + 2 \cdot A_2 \cdot q_2$$

$$\frac{1}{2 \cdot A_1} \left(\int \frac{q_1}{G \cdot t_1} ds \right) = \frac{1}{2 \cdot A_2} \left(\int \frac{q_2}{G \cdot t_2} ds \right)$$

Složitými matematickými úpravami za pomoci Brettova vztahu a přetvářné podmínky získáme následující smykové toky potahu.

$$q_1 = -11,86 \cdot Nmm^{-1}$$

$$q_2 = -5,09 Nmm^{-1}$$

- Smykové toky ve stojinách nosníků

$$q_{v1} = q_{z1} + q_1 - q_2 = 20,56 N \cdot mm^{-1}$$

$$q_{v2} = q_{z2} + q_2 = 3,79 N \cdot mm^{-1}$$

Součinitel rezervy stojiny proti zvlnění

Přední a zadní nosník

- Z grafu 3.2 [10] se určí $k_{\tau 1} = 8,4$ $k_{\tau 1} = 8,1$
- Kritické napětí

$$\tau_{kr} = k_{\tau} \cdot E \cdot \left(\frac{t_s}{h_e} \right)^2$$

$$\tau_{kr1} = 203,25 MPa \quad \tau_{kr2} = 622,23 MPa$$

- Smykové napětí ve stojině

$$\tau_h = \frac{q_v}{t}$$

$$\tau_{h1} = 25,7 MPa \quad \tau_{h2} = 98,48$$



- Bezpečnost vůči zvlnění

$$\eta = \frac{\tau_{kr}}{\tau}$$

$$\eta_1 = 7,91 \qquad \eta_2 = 98,4$$

Únosnost

Z grafu 3.7 [10] se určí mezní smykový tok $q_{p1t} = 140N \cdot mm^{-1}$

$$q_{p2t} = 85N \cdot mm^{-1}$$

Odlehčovací otvory $D_1 = 18mm$ $D_2 = 15mm$

Kritický smykový tok

$$q_p = q_{pt} \cdot \left(1 - \frac{D}{h}\right) \cdot c$$

$$q_{p1} = 82,26N \cdot mm^{-1} \quad q_{p2} = 15,6N \cdot mm^{-1}$$

Bezpečnost

$$\eta_{1u} = \frac{q_p}{q_v}$$

$$\eta_{1u} = 4$$

$$\eta_{2u} = 4,11$$

Kontrolní výpočet potahu

$R_{h1} = 7088mm$	$R_{d1} = 7089mm$
$R_{h2} = 8262,mm$	$R_{d2} = 8262mm$
$R_{NH} = 29,7mm$	

Tab. 5.17 Zakřivení potahu

Náběžná hrana

- Výpočet převzat z tab. 3.2 [10]

$$k_{\tau RNH} = 0,68$$



Kritické smykové napětí

$$\tau_{krNH} = k_{\tau RNH} \cdot E \cdot \frac{t_p}{R_{NH}} \cdot \sqrt{\frac{R_{NH} \cdot t_p}{l}}$$
$$\tau_{krNH} = 113,3 MPa$$

Smykové napětí potahu náběžné hrany

$$\tau_1 = \frac{|q_1|}{t_p} = 23,71 MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{NH} = \frac{\tau_{krNH}}{\tau_1}$$

$$\eta_{NH} = 4,78$$

Přední dutina

- Výpočet převzat z tab. 3.2 [10]

$$k_{\tau 1h} = 10,2$$

Kritické napětí ekvivalentní rovinné desky

$$\tau_{kr1h} = k_{\tau 1h} \cdot E \cdot \left(\frac{t_p}{l}\right)^2 = 4,41 MPa$$

Kritické napětí s vlivem zakřivení

$$\tau_{kr1z} = \tau_{kr1h} + 0,1 \cdot E \cdot \frac{t_p}{R_{d1}} = 4,92 MPa$$

Smykové napětí v potahu přední dutiny

$$\tau_{1h} = \frac{|q_1|}{t_p} = 23,71 MPa$$



Součinitel rezervy

$$\eta_{1h} = \frac{\tau_{kr1z}}{\tau_{1h}}$$

$$\eta_{1h} = 0,21$$

I v případě přední dutiny výškovky dojde ke zvlnění potahu přední dutiny. Přesto vyhovuje, protože napětí v potahu smí překročit mez stability ale ne mez kluzu.

Zadní dutina

- Výpočet převzat z tab. 3.2 [10]

$$k_{\tau 2h} = 7,8$$

Kritické napětí ekvivalentní rovinné desky

$$\tau_{kr2h} = k_{\tau 2h} \cdot E \cdot \left(\frac{t_p}{l}\right)^2 = 3,37 MPa$$

Kritické napětí s vlivem zakřivení

$$\tau_{kr2z} = \tau_{kr2h} + 0,1 \cdot E \cdot \frac{t_p}{R_{d2}} = 3,81 MPa$$

Smykové napětí v potahu přední dutiny

$$\tau_{2h} = \frac{|q_2|}{t_p} = 10,2 MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{1h} = \frac{\tau_{kr1z}}{\tau_{1h}}$$

$$\eta_{1h} = 0,37$$

Kontrola na pevnost

$$\eta_{p2h} = \frac{0,5 \cdot R_m}{\tau_{2h}}$$

$$\eta_{p2h} = 12,9$$



Nýtová spojení

V této části jsou prezentovány výsledky pevnostního výpočtu nýtových spojení výpočtu výškového kormidla. (viz. Příloha F)

Přehled součinitelů rezervy:

Nýtové spojení potahu a pásnice PD	$\eta_{nU1} = 4,1$
Stabilita potahu mezi nýty PD	$\eta_{U1} = 1,3$
Spojení potahu ZD a pásnice ZN	$\eta_{nU2} = 3,03$
Stabilita potahu mezi nýty ZD	$\eta_{U2} = 1,73$

Tab. 5.20 Součinitele rezervy nýtových spojení

Kontrola pásnic

- Rozdělení ohybových momentů

$$M_{oPN} = M_o \cdot \frac{J_1}{J_1 + J_2} \quad M_{oZN} = M_o \cdot \frac{J_2}{J_1 + J_2}$$

$$M_{oPN} = 1446,85 Nm \quad M_{oZN} = 256,35 Nm$$

- Síly do pásnic

$$N_{PN} = \frac{M_{oPN}}{h_{1e}} \quad N_{ZN} = \frac{M_{oZN}}{h_{2e}}$$

$$N_{PN} = 33154,31 N \quad N_{ZN} = 13955,35 N$$

- Napětí v pásnicích

Přední nosník (Tlak/Tah)

$$\sigma_{1H} = \frac{N_{PN}}{A_{p1}} \quad \sigma_{1D} = \frac{N_{PN}}{A_{p1}}$$

$$\sigma_{1H} = 352,71 MPa \quad \sigma_{1D} = 352,71 MPa$$

Zadní nosník

$$\sigma_{2H} = \frac{N_{PN}}{A_{p2}} \quad \sigma_{2D} = \frac{N_{PN}}{A_{p2}}$$

$$\sigma_{2H} = 148,46 MPa \quad \sigma_{1D} = 148,46 MPa$$



- Kontrola pevnosti v tahu dolní pásnice (únosnost)

(Pevnost je rozhodujícím namáháním pro dolní pásnice.)

Přední nosník

$$\eta_{1D} = \frac{R_{mPN}}{\sigma_{1D}} = 1,13$$

Zadní nosník

$$\eta_{1D} = \frac{R_{mZN}}{\sigma_{2D}} = 2,09$$

- Kontrola místní tvarové ztráty stability

(Horní pásnice jsou namáhány tlakem, stabilita je tedy rozhodující)

Přední nosník

Výpočet proveden podle tab. 2.6 [10]

Tloušťka strany profilu $t_{prof1} = 2,5mm$

Tloušťka strany profilu $h_{prof1} = 20mm$

Součinitel uchycení $k_{prof1} = 1,2$

Kritické napětí

$$\sigma_{kr,HPN} = k_{prof} \cdot E \cdot \left(\frac{t_{prof1}}{h_{prof1}} \right)^2 = 1350MPa$$

$$\sigma_{kr,HZN,celk} = \frac{\sigma_{kr,HZN} \cdot A_{pH1} + \sigma_{krU1} \cdot t_p}{A_{pH1} + u \cdot t_p} = 1200,67MPa$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{1H} = \frac{\sigma_{kr,HPN}}{\sigma_{1H}}$$

$$\eta_{1H} = 3,4$$



Zadní nosník

Výpočet proveden podle tab. 2.6 [10]

Tloušťka strany profilu $t_{prof2} = 2,5mm$

Tloušťka strany profilu $h_{prof2} = 20mm$

Součinitel uchycení $t_{prof2} = 1,2$

Kritické napětí

$$\sigma_{kr,HZN} = k_{prof} \cdot E \cdot \left(\frac{t_{prof2}}{h_{prof2}} \right)^2 = 802,52MPa$$

$$\sigma_{kr,HZN} = 222,89$$

$$\sigma_{kr,HZN,celk} = \frac{\sigma_{kr,HZN} \cdot A_{pH2} + \sigma_{krU2} \cdot t_p}{A_{pH2} + u \cdot t_p} = 1199,2MPa$$

Napětí v pásnici

$$\sigma_{2Hp} = \frac{N_{PN}}{A_{pH2} + u \cdot t} = 131,65$$

Součinitel rezervy

$$\eta_{2H} = \frac{\sigma_{kr,HZN}}{\sigma_{2Hp}}$$

$$\eta_{2H} = 9,11$$



ZÁVĚR

Cílem předložené diplomové práce je v první řadě prozkoumání modifikace vodorovné ocasní plochy. Modifikací rozumíme zvětšení ramene vodorovných ocasních ploch a zmenšení plochy, při co nejmenším ovlivnění letových vlastností.

Neoddiskutovatelným přínosem modifikace je snížení koeficientu odporu VOP, respektive letounu. Čehož přímým důsledkem je nárůst maximální rychlosti horizontálního letu a zlepšení charakteristik ustáleného stoupavého letu.

Naopak negativem úpravy je nárůst hmotnosti trupu a s ním spojené vyvážení letounu na příslušnou centráž.

Dalším negativem jsou pak konstrukční úpravy ostatních částí letounu, tedy svislých ocasních ploch, trupu a systémů řízení. Přidaná hmotnost se pak především projeví buď na snížení doletu, nebo případně na navýšení vzletové hmotnosti letounu.

Pro vybranou verzi modifikace jsou v druhé části specifikovány a kvalifikovány důsledky na letové vlastnosti. Vybraná verze je následně konstrukčně navržena a je pro ni spočítáno zatížení.

Objektivně je nutné na tomto místě konstatovat, že přínosy modifikace jsou značně nejisté v konfrontaci s náročností její realizace. Každý zásah do stávající konstrukce letounu je zásadním rozhodnutím, které přináší řadu nákladů a komplikací.

Diplomová práce je koncipována ve snaze o koncepční přístup zhodnocení a vyřešení zadaného problému. A v tomto bodě svůj smysl splnila.



LITERATURA

- [1] ROSKAM, J., *Airplane design: Part IV: Preliminary calculation of aerodynamic thrust and power characteristic*. Kansas: Aerospace engineering of the University of Kansas, 1989
- [2] DANĚK, M., *Letové vlastnosti*, tabulky skript VTA Brno, 1956
- [3] ZGAP VUT-100, *Základní aerodynamické podklady pro pevnostní výpočet letounu VUT-100*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2004
- [4] FREISLEBEN, J. *Výpočet stability a říditelnosti motorového kluzáku L-13 SE Vivat*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010
- [5] LOUTOCKÝ, Jiří. *Návrh letounu pro vlečení a základní akrobacii*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010
- [6] ROSKAM, J., *Airplane Aerodynamic and Performance*, Design, Analysis and Research Corporation, Kansas, 1993
- [7] *Certifikační specifikace pro letouny kategorie normál, cvičná, akrobatická a pro sběrnou dopravu CS-23*. EASA. Rozhodnutí č. 2003/14/RM výkonného ředitele agentury.
- [8] DANĚK, V.: *Projektování letadel*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 1991
- [9] PIŠTĚK, A., GRÉGR, O., KAHÁNEK, V., BÖHM, R.: *Pevnost a životnost letadel I*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 1988
- [10] ČTVERÁK, J., MERTL, V., PIŠTĚK, A.: *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 1997
- [11] DANĚK, V., *Mechanika letu I*, Akademické nakladatelství CERM, 2009
- [12] ROSKAM, J., *Airplane design: Part V: Component weight estimation*, Kansas: Aerospace engineering of the University of Kansas, 1985



Seznam použitých symbolů

A_{vop}	[-]	Štíhlost VOP
a	[°]	Skon vztlakové čáry
b_{tr}	[m]	Šířka trupu
c_{Di}	[-]	Součinitel indukovaného odporu
c_{D0}	[-]	Profilový odpor
c_{D0vop}	[-]	Součinitel vztlaku při nulovém úhlu náběhu
c_L	[-]	Součinitel vztlaku
c_r	[m]	Kořenová hloubka profilu
c_{sat}	[m]	Střední aerodynamická těživa
c_t	[m]	Koncová hloubka profilu
F_p	[N]	Potřebný tah
F_v	[N]	Využitelný tah
G	[m]	Tíhová síla
h_{vop}	[m]	Vzdálenost nulového vztlaku profilu křídla a AS VOP
k_{vop}	[-]	Koeficient snížení tlaku v místě VOP
L	[m]	Vztlaková síla
$\tilde{l}_{vop}$	[m]	Vzdálenost AS křídla a VOP
l_{Tvop}	[m]	Vzdálenost těžiště letounu a AS VOP
P_{mot}	[kW]	Výkon motoru
P_p	[kW]	Potřebný výkon
P_v	[kW]	Využitelný výkon



S	$[m^2]$	Plocha
$\tilde{V}_{VOP}$	$[-]$	Mohutnost VOP
w	$[ms^{-1}]$	Rychlost stoupání
α	$[^\circ]$	Úhel náběhu
γ	$[^\circ]$	Úhel stoupání
γ_{vop}	$[^\circ]$	Úhel vzepětí
η_{vrt}	$[-]$	Účinnost vrtule
λ_{vop}	$[-]$	zúžení VOP
φ_{vop}	$[^\circ]$	Úhel nastavení VOP

Letové vlastnosti

D	$[-]$	Dynamické bod s volným řízením
$C'_{L\alpha}$	$[rad^{-1}]$	Sklon vztlakové čáry s volným řízením
C_{Lq}	$[rad^{-1}]$	Derivace momentu letounu podle bezrozměrné úhlové rychlosti
$C_{Lvop\delta}$	$[rad^{-1}]$	Derivace součinitele vztlaku VOP podle výchylky VK
C_{Lq}	$[rad^{-1}]$	Derivace součinitele vztlaku podle VK
$C_{H\alpha}$	$[rad^{-1}]$	Derivace součinitele vztlaku
$C_{H\alpha,vop}$	$[rad^{-1}]$	Derivace součinitele vztlaku podle závěsového momentu CCK podle úhlu náběhu v místě VOP



$C_{H\delta}$	$[\text{rad}^{-1}]$	Derivace součinitele vztlaku závěsového momentu VK závěsového momentu podle úhlu náběhu v místě VOP
C_{Hq}	$[\text{rad}^{-1}]$	Derivace součinitele závěsového momentu podle VK podle bezrozměrné rychlosti
C_{m_q}	$[\text{rad}^{-1}]$	Derivace tlumení klopení
f	$[-]$	Faktor uvolnění VK
$\bar{x}_A$	$[\%C_{\text{sat}}]$	Poloha aerodynamického středu s pevným řízením
$\bar{x}'_A$	$[\%C_{\text{sat}}]$	Poloha aerodynamického středu s volným řízením
$\bar{x}_D$	$[\%C_{\text{sat}}]$	Poloha dynamického bodu s pevným řízením
$\bar{x}'_D$	$[\%C_{\text{sat}}]$	Poloha dynamického bodu s volným řízením
μ	$[-]$	Bezrozměrná hmotnost
σ_A	$[\%]$	Statická zásoba s pevné řízení
σ'_A	$[\%]$	Statická zásoba s pevným řízením
σ_D	$[\%]$	Dynamická zásoba s pevným řízením
σ'_D	$[\%]$	Dynamická zásoba s volným řízením



Pevnostní výpočty

A_p	[mm ²]	Plocha pásnice
a	[mm]	Ohybově-elastické osy
b	[mm]	Vzdálenost nosníků
E	[MPa]	Modul pružnosti
F	[MPa]	Síla
h	[mm]	Výška stojiny
h_e	[mm]	Efektivní výška stojiny
J	[mm ⁴]	Kvadratický moment
l	[mm]	Vzdálenost žeber
M_o	[Nm]	Ohybový moment
M_k	[Nm]	Krouticí moment
m	[kg]	Hmotnost
q	[Nmm ⁻¹]	Smykový tok potahu
q_z	[Nmm ⁻¹]	Základní smykový tok
q_v	[Nmm ⁻¹]	Výsledný smykový tok
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
s	[mm]	Tloušťka pásnice
T	[N]	Posouvající síla
t	[mm]	Tloušťka
U	[m ²]	Plocha dutiny
W	[libra]	Hmotnost
w	[N/m ⁻¹]	Průměrné zatížení



x_{Oel}	[mm]	Poloha ohybově-elastické osy
η	[-]	Součinitel rezervy
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ	[MPa]	Napětí

Indexy a zkratky

VOP	Vodorovná ocasní plocha
KT	Křídlo-Trup
SOP	Svislá ocasní plocha
VK	Výškové kormidlo
KŘ	Křídlo
PD	Přední dutina
ZD	Zadní dutina
PN	Přední nosník
ZN	Zadní nosník
PZ	Přední závěs
ZZ	Zadní závěs



Seznam příloh

- A. Konstrukční parametry letounu VUT 100 Cobra
- B. Hmotnostní obálka VUT 100 Cobra
- C. Výkony letounu
- D. Charakteristiky stoupavého letu
- E. Průběhy posouvající síly, ohybového a krouticího momentu po rozpětí VOP
- F. Výpočet nýtů
- G. Výkresová dokumentace



Příloha A

Zdroj [3]

Křídlo

1. l_P	=	10,516	[m]	Rozpětí křídla – průmět do roviny xz skutečné geometrické rozpětí křídla,
2. l	=	10,42	[m]	Rozpětí křídla – pro aerodynamické analýzy
3. S	=	13,109	[m ²]	Plocha křídla
4. S_P	=	13,059	[m ²]	Plocha křídla – v půdoryse
5. b_{SAT}	=	1,3328	[m]	Délka střední aerodynamické tětiny
6. b_G	=	1,2581	[m]	Délka střední geometrické tětiny
7. $x_{SAT\ NH}$	=	0,01222	[m]	X-ová vzdálenost SAT od náběžné hrany křídla
8. x_{SAT}	=	2,53654	[m]	X-ová vzdálenost SAT od počátku GSS
9. x_{AS}	=	2,86974	[m]	X-ová vzdálenost AS od počátku GSS
10. z_{SAT}	=	2,261	[m]	Z-ová vzdálenost SAT od roviny symetrie (GSS)- ve sklopené rovině
11. z_{SAT}	=	2,2555	[m]	Z-ová vzdálenost SAT od roviny symetrie (GSS)- v průmětu do roviny XZ
12. y_{AS}	=	-0,43932	[m]	Y-ová vzdálenost AS od ZRT (GSS)- v rovině XY (AS pod ZRT)
13. A	=	8,282	[1]	Štíhlost křídla
14. b_r	=	1,579	[m]	Kořenová tětina
15. b_m	=	1,579	[m]	Mezilehlá tětina (1,250 mm od osy symetrie)
16. b_t	=	0,82228	[m]	Koncová tětina pro výpočet zúžení
17. b_t	=	0,800	[m]	Koncová tětina náhradní plochy (pro definici profiláže)
18. λ	=	0,521	[1]	Zúžení křídla
19. λ_t	=	1,0	[1]	Zúžení vnitřní části křídla
20. λ_t	=	0,521	[1]	Zúžení vnější části křídla
21. λ_a	=	0	[°]	Aerodynamické zkroucení centroplánu
22. λ_a	=	0	[°]	Aerodynamické zkroucení vnější části křídla
23. λ_g	=	0	[°]	Geometrické zkroucení centroplánu
24. λ_g	=	-4	[°]	Geometrické zkroucení vnější části křídla
25. $(\Lambda_{c/4})_i$	=	0	[°]	Úhel šípu čtvrtinových bodů centroplánu
26. $(\Lambda_{c/4})_i$	=	0,6958	[°]	Úhel šípu čtvrtinových bodů vnější části křídla
27. γ_i	=	0	[°]	Vzepětí centroplánu
28. γ_o	=	6	[°]	Vzepětí vnější části křídla
29. $\varphi_{rK\check{r}}$	=	2	[°]	Úhel nastavení kořenové tětiny
30. $\varphi_{rSAT\tau}$	=	1,317	[°]	Úhel nastavení SAT

Profil LS – 417

kořenový

Profil LS – 413

koncový



Výchozí VOP

1.	$S_{VOP\ ZRT}$	=	2,9678	[m ²]	Plocha VOP - se započtením plochy v trupu
2.	S_{VOP}	=	2,7039	[m ²]	Plocha VOP – vztažná plocha pro výpočet aerodynamických charakteristik
3.	l_{VOP}	=	3,80	[m]	Rozpětí VOP – vztažné rozpětí pro výpočet aerodynamických charakteristik
4.	$l_{VOP\ ZR}$	=	3,532	[m]	Rozpětí VOP – pro výpočet základního rozložení
5.	$b_{SAT\ VOP}$	=	0,78359	[m]	Délka střední aerodynamické tělivy VOP
6.	$b_{G\ VOP}$	=	0,76555	[m]	Délka střední geometrické tělivy VOP
7.	x_{AS}	=	0,19590	[m]	X-ová vzdálenost AS_{VOP} od NH VOP
8.	y_{AS}	=	0,25620	[m]	Vertikální vzdálenost SAT_{VOP} od ZRT
9.	A_{VOP}	=	4,613	[1]	Štíhlost VOP
10.	b_{VOP}	=	0,9691	[m]	Kořenová tětíva VOP
11.	$b_{k\ VOP}$	=	0,562	[m]	Koncová tětíva VOP
12.	λ_{VOP}	=	0,5799	[1]	Zúžení VOP
13.	L_{VOP}	=	4,1560	[m]	Rameno VOP
14.	γ_{VOP}	=	0	[°]	Vzepětí VOP
15.	φ_{VOP}	=	-2	[°]	Úhel nastavení kořenové tětívy VOP
16.	$\Lambda_{c_{VOP}}$	=	4,613	[°]	Úhel šípů čtvrtinových bodů VOP
17.	$'A_{VOP}$	=	0,6433	[1]	Mohutnost VOP
Profil	NACA 0010				kořenový, koncový řez

Trup

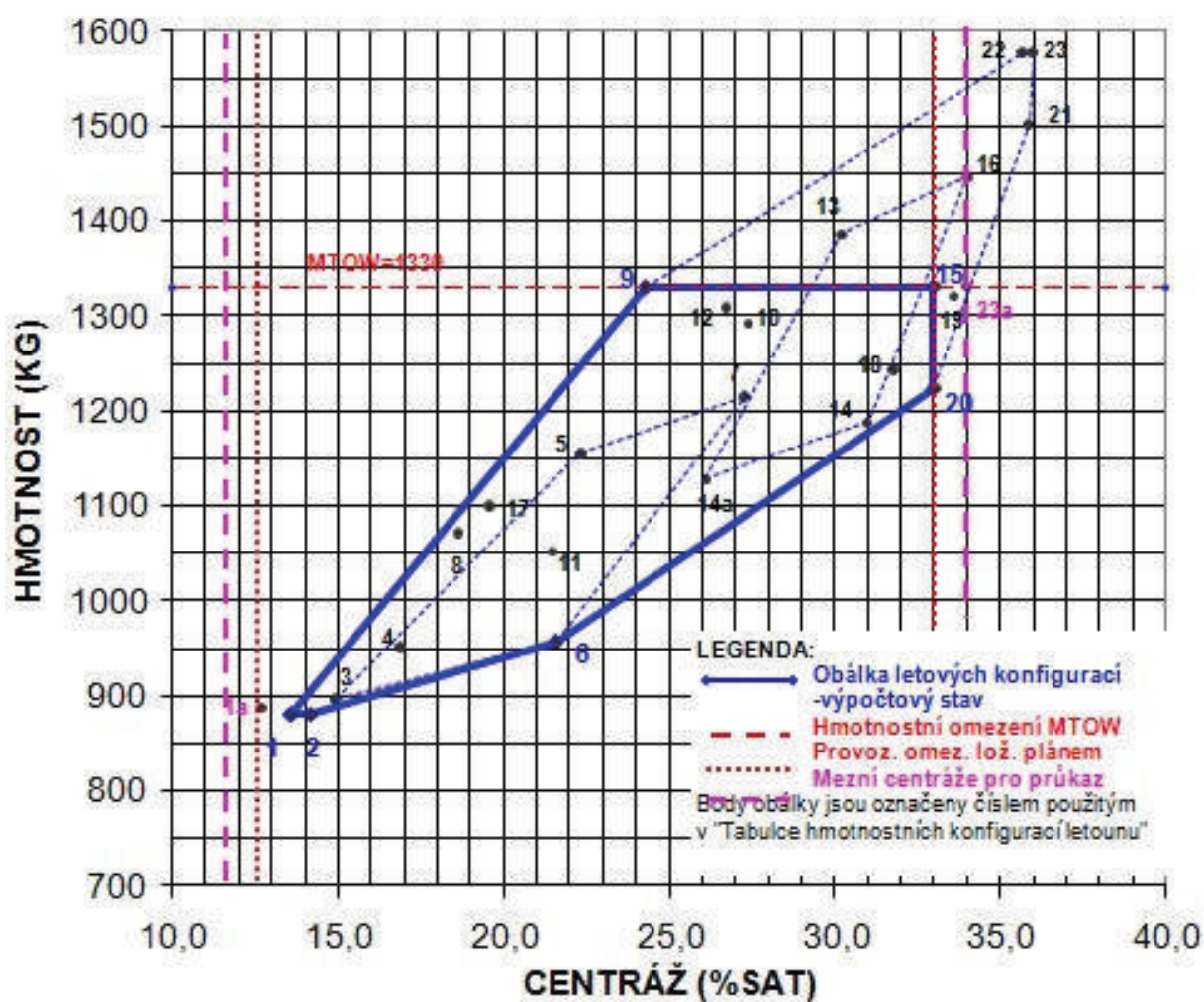
[1.]	l_{TR}	=	7,12	[m]	Celková délka trupu
[2.]	h_{TR}	=	1,396	[m]	Max, výška trupu
[3.]	b_{TR}	=	1,311	[m]	Max, šířka trupu



Příloha B

Zdroj [3]

OBÁLKA HMOTNOSTÍ A CENTRÁŽÍ LETOUNU VUT100-120i





Příloha C

Potřebný výkon

Modifikace VUT 100		
V [km/h]	c_L/c_D [-]	Pp [kW]
115	13,423	31050,884
125	14,812	30585,133
135	15,940	30694,992
145	16,768	31339,771
155	17,288	32494,923
165	17,512	34147,153
175	17,477	36291,201
185	17,224	38927,669
195	16,802	42061,525
205	16,257	45701,028
215	15,629	49856,972
225	14,951	54542,117
235	14,249	59770,772
245	13,544	65558,479
255	12,850	71921,774
265	12,176	78877,993
275	11,529	86445,133
285	10,914	94641,733
295	10,331	103486,782
305	9,782	112999,647
315	9,267	123200,010
325	8,783	134107,823
335	8,331	145743,266
345	7,907	158126,713
355	7,512	171278,706
365	7,142	185219,932
375	6,796	199971,204
385	6,473	215553,442
395	6,171	231987,664
405	5,888	249294,969



Využitelný tah pohonné jednotky

Zdroj [3]

	Výška [m]	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	Výkon [HP] / [kW]	200 / 147,1	179 / 131,6	159 / 116,9	140 / 103	124 / 91,2	108 / 79,4	94 / 69,1
TAS [km/h]	TAS [m/s]	Využitelný tah [N]						
0	0	3900	3518	3134	2774	2472	2188	1937
18	5	3718	3305	2944	2606	2321	2051	1812
36	10	3500	3101	2763	2446	2177	1920	1692
72	20	3065	2722	2426	2147	1909	1677	1473
108	30	2685	2383	2123	1878	1668	1460	1278
144	40	2348	2081	1854	1638	1454	1270	1108
180	50	2055	1819	1619	1429	1267	1105	963
216	60	1806	1598	1421	1254	1111	967	842
252	70	1599	1413	1255	1105	979	852	741
288	80	1422	1256	1116	983	870	757	658
324	90	1276	1126	1000	880	778	677	588
360	100	1150	1015	900	792	701	609	529
396	110	1042	919	815	716	633,4	550	478
432	120	949	836	741	651	575	499	433
468	130	866	762	675	593	524	454	393



Účinnost vrtule

Zdroj [3]

		Výška [m]	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000
		Výkon [HP] / [kW]	200 / 147,1	179 / 131,6	159 / 116,9	140 / 103	124 / 91,2	108 / 79,4	94 / 69,1
TAS [km/h]	TAS [m/s]	Účinnost vrtule [%]							
0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
18	5	14,1	14,1	14,1	14,2	14,3	14,5	14,7	
36	10	26,4	26,5	26,6	26,7	26,8	27,2	27,5	
72	20	46,4	46,5	46,6	46,8	47,0	47,5	47,9	
108	30	60,9	61,0	61,2	61,4	61,6	62,0	62,3	
144	40	70,9	71,1	71,3	71,5	71,6	71,9	72,1	
180	50	77,6	77,7	77,8	77,9	78,0	78,2	78,3	
216	60	81,8	81,8	81,9	82,0	82,1	82,1	82,2	
252	70	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	
288	80	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,7	85,5	
324	90	86,6	86,5	86,5	86,4	86,3	86,2	86,1	
360	100	86,7	86,6	86,5	86,4	86,3	86,2	86,0	
396	110	86,4	86,3	86,1	86,0	85,8	85,6	85,4	
432	120	85,8	85,7	85,5	85,3	85,1	84,7	84,4	
468	130	84,8	84,6	84,4	84,1	83,9	83,5	83,2	



Příloha D

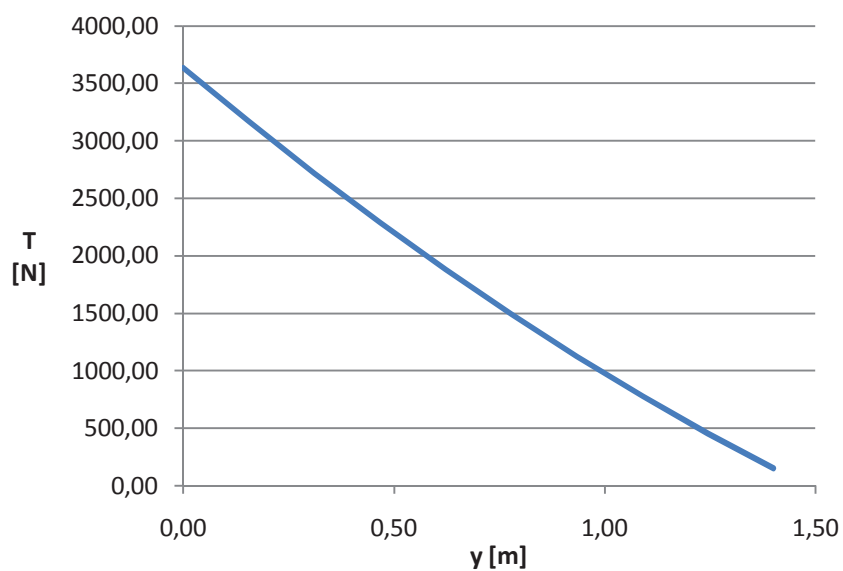
Charakteristiky ustáleného stoupavého letu,

Modifikace VUT 100			
v [km/h]	w [m/s]	γ [°]	$\hat{\gamma}$
115	3,917	7,043	12,261
125	4,272	7,067	12,302
135	4,555	6,976	12,146
145	4,770	6,802	11,844
155	4,922	6,564	11,431
165	5,011	6,277	10,933
175	5,040	5,951	10,368
185	5,009	5,594	9,747
195	4,919	5,211	9,082
205	4,772	4,807	8,380
215	4,566	4,385	7,646
225	4,303	3,948	6,884
235	3,982	3,497	6,100
245	3,603	3,035	5,294
255	3,167	2,562	4,470
265	2,672	2,080	3,630
275	2,119	1,590	2,774
285	1,508	1,091	1,905
295	0,838	0,586	1,023
305	0,109	0,074	0,128
315	-	-	-
325	-	-	-
335	-	-	-
345	-	-	-
355	-	-	-
365	-	-	-
375	-	-	-
385	-	-	-
395	-	-	-
405	-	-	-

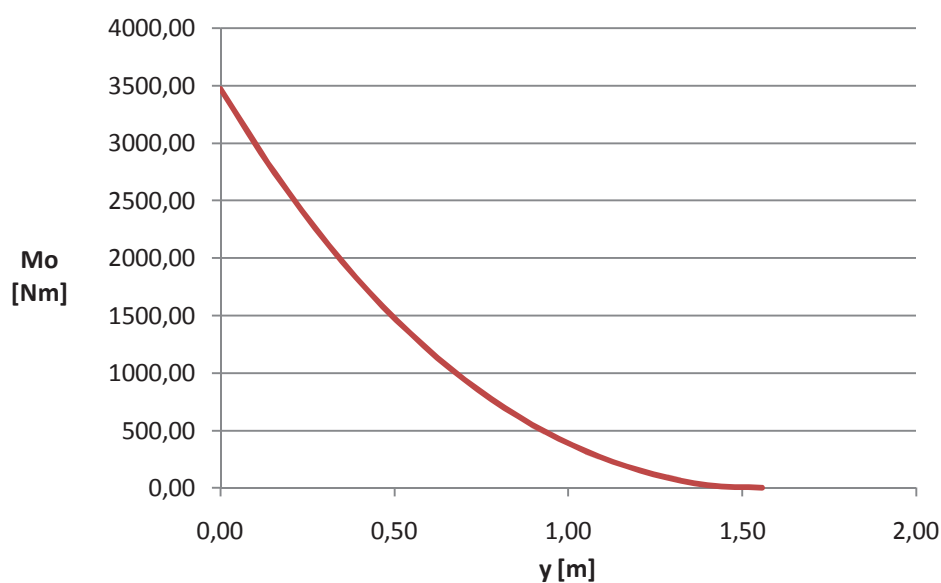


Příloha E

Posouvající síla

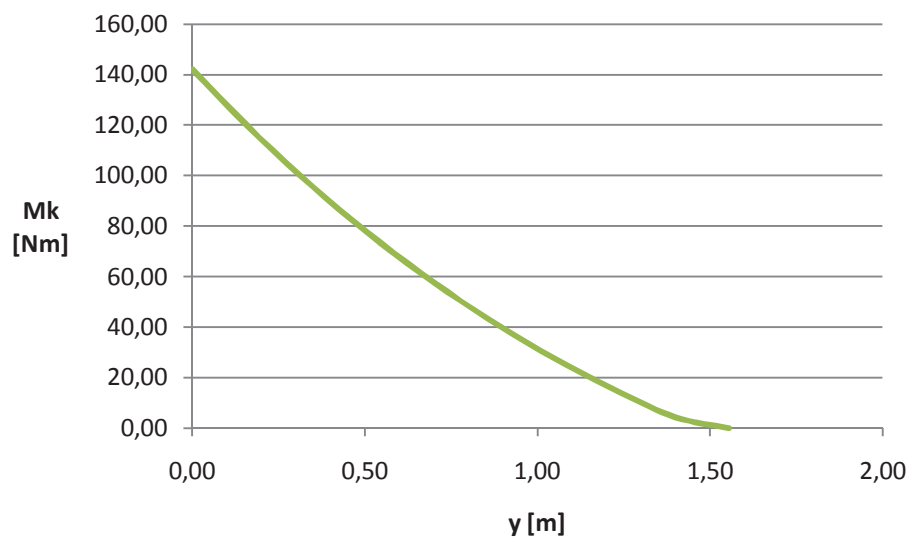


Ohybový moment





Krouticí moment





Příloha F

Nýtové spojení potahu (první i druhé dutiny) a pásnice první dutiny

jedná se o dvou-střížný nýťový spoj a dvouřadé nýťování

průměr nýtů: $d_{nU1} := 2.6\text{mm}$

rozteč nýtů: $r_{nU1} := 24.5\text{mm}$

Kontrola na únosnost

smykový tok ve stojně: $q_{h1} = 43.819 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$

síla na 1 nýt: $F_{nU1} := 0.5(q_{h1} \cdot r_{nU1}) = 536.782\text{N}$

únosnost nýtu dle tab, 4,1 [10] $F_{tabU1} := 1402\text{N}$

součinitel rezervy: $\eta_{nU1} := \frac{F_{tabU1}}{F_{nU1}} = 2.612$

Kontrola na stabilitu potahu mezi nýty

dle lit,[10] tab, 3,8

napětí v potahu $\sigma_{U1} := \frac{q_1}{t_{p1}} = -16.618\text{MPa}$

délka potahu mezi nýty $l_{pU1} := r_{nU1} - d_{nU1} = 21.9\text{mm}$

$$\sigma_{krU1} := \frac{0.82 E}{\left(\frac{l_{pU1}}{t_{p1}}\right)^2} = 19.696\text{MPa}$$

součinitel rezervy $\eta_{U1} := \frac{\sigma_{krU1}}{|\sigma_{U1}|} = 1.185$



Nýtové spojení potahu (druhé dutiny) a pásnice pomocného nosníku

jedná se o dvou-střížný nýťový spoj a dvouřadé nýťování

průměr nýtů: $d_{nU2} := 2.6\text{mm}$

rozteč nýtů: $r_{nU2} := 31.5\text{mm}$

Kontrola na únosnost

smykový tok ve stojině: $q_{h2} = 10.925 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$

síla na 1 nýt: $F_{nU2} := 0.5(q_{h2} \cdot r_{nU2}) = 172.063\text{N}$

únosnost nýtu dle tab,4,1 [10] $F_{tabU2} := 850\text{N}$

součinitel rezervy: $\eta_{nU2} := \frac{F_{tabU2}}{F_{nU2}} = 4.94$

Kontrola na stabilitu potahu mezi nýty

dle lit, [10] tab, 3,8

napětí v potahu $\sigma_{U2} := \frac{q_2}{t_{p2h}} = -7.278\text{MPa}$

délka potahu mezi nýty $l_{pU2} := r_{nU2} - d_{nU2} = 28.9\text{mm}$

$$\sigma_{krU2} := \frac{0.82E}{\left(\frac{l_{pU2}}{t_{p2h}}\right)^2} = 11.31\text{MPa}$$

součinitel rezervy $\eta_{U2} := \frac{\sigma_{krU2}}{|\sigma_{U2}|} = 1.554$