

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE FAKULTA STROJNÍ**

12112 – Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ŘÍDICÍ JEDNOTKA PADÁKOVÉHO
KLUZÁKU**



Vedoucí:

Ing. Jan Čížek, Ph.D.

Vypracoval:

František Brož

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brož** Jméno: **František** Osobní číslo: **437244**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Řídící jednotka padákového kluzáku

Název bakalářské práce anglicky:

Control unit of a paraglider wing

Pokyny pro vypracování:

1. Zprovozníte existující model padákového kluzáku v měřítku přibližně 1:2,5.
2. Navrhnete a zrealizujete funkční systém řízení modelu padákového kluzáku pomocí náklonu pilota.
3. Navrhnete a zrealizujete bezpečný systém pohonu modelu padákového kluzáku.
4. Ověříte funkčnost obou navržených systémů pomocí několika letových zkoušek.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

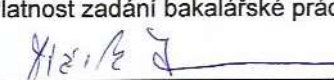
Ing. Jan Čížek Ph.D., 12112


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

Datum zadání bakalářské práce: **27.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **26.10.2018**


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.4.2017
Datum převzetí zadání

BROŠ
Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	František Brož
Název BP:	Řídicí jednotka padákového kluzáku
Anglický název:	Control unit of a paraglider wing
Akademický rok:	2016/2017
Obor studia:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	12112 – Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí:	Ing. Jan Čížek, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 35 Počet obrázků: 32 Počet tabulek: 1 Počet příloh: 16
Klíčová slova:	Padákový kluzák, Flexibilní křídla, Návrh pohonu, Systémy řízení padákových kluzáků.
Keywords:	Paraglider wing, Flexible wings, Propulsion design, Systems of controlling paraglider wing.
Anotace:	Práce se zabývá úpravou existující řídicí jednotky modelu padákového kluzáku v měřítku přibližně 1:2,5. V rámci předkládané bakalářské práce byla jednotka opravena a následně doplněna o nově navržený systém řízení směru letu pomocí náklonu pilota. Aby bylo možné provádět testovací lety nejen za velmi specifických povětrnostních podmínek a na odpovídajících letových terénech, byla řídicí jednotka doplněna o systém pohonu pomocí motorové gondoly. Kromě návrhových prací byl celý systém zrealizován, uveden do provozu a otestován v rámci několika letových zkoušek.
Abstract:	Thesis is concerned with modification of existing control unit of a model of a paraglider wing in a scale approximately 1:2,5. Under the terms of presented bachelor's thesis the control unit was repaired and subsequently improved by a newly designed system of controlling flight direction by shifting the weight of the pilot. In order to make flights possible not only in very specific weather conditions and at appropriate flight sites, the control unit was fitted by a system of propulsion using a powered gondola. Apart from design activities whole system was implemented, put into operation and tested under the terms of several flight tests

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracoval samostatně s výjimkou pomoci vedoucího práce a použití uvedených zdrojů.

V Praze 7.8.2017

František Brož

Poděkování

Děkuji tímto zejména vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Čížkovi Ph.D. za usměrnění mé práce, důležité rady, připomínky a nápady. Dále děkuji zaměstnancům Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky za pomoc s realizací řídicí jednotky.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	6
1. Úvod.....	8
2. Teoretická část	9
2.1. Padákový kluzák obecně	9
2.2. Řízení padákového kluzáku.....	11
2.2.1. Řízení padákového kluzáku řídičkami	11
2.2.2. Řízení padákového kluzáku náklonem.....	12
2.3. Pohony používané v paraglidingu	13
3. Návrhová část	14
3.1. Současný stav modelu	14
3.2. Součásti pro obnovení funkčnosti modelu	15
3.2.1. Volba vysílací soupravy.....	15
3.2.2. Volba napájení pro nízkonapěťová serva.....	15
3.3. Řízení náklonem.....	16
3.3.1. konstrukční možnosti	16
3.3.2. Koncepce.....	17
3.3.3. Uložení servomotoru.....	18
3.3.4. Minimalizace vlivu ohybového momentu na servomotor.....	19
3.3.5. Realizace	19
3.3.6. Úprava systému řízení náklonem.....	21
3.3.7. Pohon	22
3.3.8. Dimenzování pohonné jednotky	22
3.3.9. Volba typu motoru	23
3.3.10. Ochrana proti poranění osob	26
3.3.11. Realizace pohonu.....	29
3.4. Start.....	31
4. Měření letových veličin	33
5. Experimentální část.....	34
5.1. Ověření funkčnosti koncepce řízení náklonem	34

5.2.	Zkouška pohonné jednotky.....	34
5.3.	Zkouška č. 1.....	35
5.4.	Zkouška č. 2.....	37
5.5.	Zkouška č. 3.....	40
5.6.	Ostatní zkoušky	41
6.	Závěr	43
7.	Použitá literatura	44
8.	Seznam příloh	45

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Veličina	Název
d	mm	Průměr kladky náklonu
M_k	Nm	Kroutící moment
w_k	mm ⁴	Modul průřezu v krutu
P	kW	Výkon
m	kg	Vzletová hmotnost
v_s	m/s	Rychlost stoupání
q	-	Měřítka modelu
A	m ²	Čelní plocha
F_x	N	Čelní odpor modelu
D_v	mm	Průměr vrtule
S	mm/ot	Stoupání vrtule
t	s	Čas
C	Ah	Kapacita akumulátoru
I	A	Proud
A_m	%	Tažnost materiálu
l	mm	Délka křivky
φ	rad	Úhel oblouku profilu
r_s	mm	Poloměr střední křivky
D	mm	Vnější průměr profilu
x'	m	Souřadnice x po odečtení větru
x	m	Souřadnice
y'	m	Souřadnice y po odečtení větru
y	m	Souřadnice
V_v	m/s	Rychlost větru
c	m	Korekce větru
U	V	Napětí
n	-	Počet článků akumulátoru
U_i	V	Napětí jednoho článku akumulátoru
g	-	Klouzavost
s	m	Délka dráhy letu
v_a	km/h	Vzdušná rychlost

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá úpravou a zdokonalením již existující řídicí jednotky (modelu) padákového kluzáku.

Při převzetí byl model schopen létat klouzavým letem a byl schopen provádět běžné letové manévry. Neumožňoval však řízení padákového kluzáku náklonem, což je důležitá součást ovládání kluzáku. V minulosti byly snahy vyvinout funkční systém řízení náklonem, systém ale nebyl funkční. Jedním z úkolů této práce je tedy navržení, sestrojení a odzkoušení funkčního systému, aby bylo možné řídit kluzák co nejuvěrnějším napodobením řízení padákového kluzáku.

Dalším problémem, jenž řeší tato práce, je pohon modelu. Model byl při převzetí bez pohonu, takže byl schopen klouzavého letu. K setrvalému letu vyžadoval stoupavé termické proudy, nebo svahové proudění. Termické proudy bylo velmi obtížné využít, protože k pilotáži výrazně přispívají hmatové vjemy, které pilot dostává skrze řidičky a postroj. Ty samozřejmě nejsou vysílačem přenášeny. Navíc není model vybaven variometrem, který by poskytl alespoň základní informace o stoupavém proudu a umožnil jeho využití. Prostředí termických proudů, ale i svahového proudění není navíc vhodné pro měření, protože způsobuje těžko předvídatelné odchylky měření, které je prakticky nemožné odstranit. Možností by bylo měření provádět například brzy zrána za bezvětří, kdy by k poruchám nemělo docházet. Takové počasí je bohužel jen zřídka a umožňuje pouze klouzavý let bez možnosti stoupání. Měření je tak omezeno obvykle nedostatečným převýšením terénu

Druhým úkolem této práce je tedy navržení, sestrojení a odzkoušení systému pohonu modelu, který by umožnil let v klidném prostředí za slabého větru a bezvětří. Musí také umožňovat získání dostatečné výšky, aby mohla být provedena měření při klouzavém letu s dostatečným trváním.

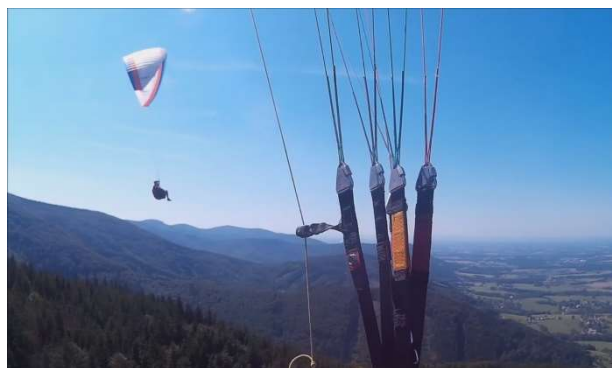
Součástí předkládané práce bylo testování všech vyvinutých systémů společně se zjišťováním základních letových veličin, jako je klouzavost a rychlost letu. Veličiny byly vyhodnocovány pomocí výpočetní techniky ze záznamu pozice a výšky.

2. Teoretická část

2.1. Padákový kluzák obecně

Padákový kluzák je letadlo těžší vzduchu. Jedná se o sportovní létající zařízení s maximálně dvoumístnou posádkou. Celé létající zařízení je složeno z padákového kluzáku, postroje a pro bezmotorové létání ve výškách přes 50 m AGL (nad zemským povrchem) záchranným padákem.

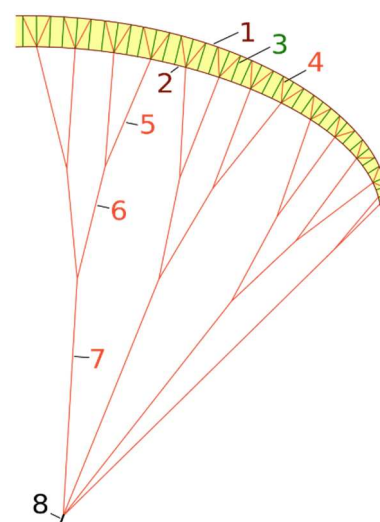
Samotný kluzák je složen z vrchlíku (látková část), nosných šňůr, karabin a popruhů. Pro výrobu vrchlíku se obvykle používá tkanina tvořená z vláken polyamidu 6-6. Pro omezení průchodu vzduchu je tkanina opatřena chemickým zátěrem. Nepropustnost zátěru je důležitým faktorem sledovaným zejména při technických prohlídkách a používáním kluzáku se výrazně



Obrázek 2.1.1. Padákový kluzák (vlevo), popruhy s nosnými šňůrami (vpravo).

snižuje. Udává se v [s] (čas, za který projde definované množství vzduchu pod definovaným tlakem plochou 1 dm²). Pro nový kluzák je tzv. porozita přes 300 s. Při zjištění porozity pod 20 s (hodnoty se liší podle výrobce kluzáku) je kluzák vyřazen z provozu. Porozita má vliv zejména na regeneraci vrchlíku z nestandardních letových režimů, průběh startu a letové výkony.

Vrchlík je složen z žeber (3), která definují tvar profilu a oddělují jednotlivé komory, horního (1) a spodního (2) potahu. Na odtokové hraně jsou potahy sešity. Na náběžné hraně je mezi potahy mezera, kterou tvoří plnicí otvory pro zajištění přetlaku uvnitř vrchlíku. V žebrech jsou zároveň poměrně velké otvory, zajišťující distribuci přetlaku do celého vrchlíku. Dále jsou mezi žebry diagonální výztuhy (4) zajišťující rozložení tahu nosných šňůr i na žebra, která nejsou ke šňůrám přímo připevněna. Na části žeber v náběžné hraně jsou výztuhy, které pomáhají udržet otevřené plnicí otvory. Tyto výztuhy jsou zhotoveny z látky s tužším zátěrem. Moderním trendem je všívání plastových strun do náběžné hrany pro zvýšení odolnosti proti jejímu zaklopení.



Obr. 2.1.2. Schéma vrchlíku s nosnými šňůrami převzato z [3].

Další částí jsou nosné šňůry (5,6,7). Ty jsou zhotoveny obvykle z para-aramidových vláken opatřených ochranným polyesterovým opletem. U výkonnějších kluzáků bývají šňůry bez ochranného opletu pro snížení čelního odporu. Vzhledem k tomu, že šňůry způsobují až 1/3 celkového čelního odporu létajícího zařízení, jsou velké snahy o redukcii jejich celkové délky i průměru. To je však obvykle doprovázeno snížením letové stability (množství šňůr) a snížením mechanické odolnosti kvůli absenci ochranného opletu. Při snížení počtu a průměru šňůr se zvyšují požadavky na jejich stav kvůli zvýšení měrného zatížení. Dále je kluzák vybaven řídicími šňůrami (řidičkami), které jsou vyvázány na odtokovou hranu kluzáku.

Nosné šňůry jsou svedeny do ocelových karabinek, které jsou připojeny k polyesterovým popruhům (8). Ty rozdělují šňůry do jednotlivých řad. Na popruzích jsou upevněny kladky speed systému zkracující postupně jednotlivé řady (přední řada je zkrácena nejvíce, poslední vůbec). Tím dojde ke snížení úhlu náběhu a zvýšení rychlosti letu. Zároveň se zvyšuje riziko čelního zaklopení a nestandardní letové režimy vzniklé při použití speed systému mají obvykle důsledkem vyšší rychlosti dramatičtější průběh. Řidičky jsou připevněny k řídicím poutkům. Popruhy jsou připojeny pomocí nosných karabin kstroji pilota.

Postroj, neboli sedačka, je vyroben z různých syntetických materiálů. Zajišťuje pohodlí



Obrázek 2.1.3.. Kapotovaná sedačka, převzato z [4].

pilota, částečně umožňuje řízení a podílí se na pasivní bezpečnosti. Postroje se vyrábí ve dvou hlavních variantách. První jsou sedačky otevřené. Obvykle zajišťují vzpřímenější pozici pilota. Dolní končetiny pilota jsou volné. Tento typ postroje bývá obvykle využíván méně pokročilými piloty. Dalším druhem jsou sedačky kapotované. V těch pilot spíše leží. Zajišťují vysokou míru pohodlí i během dlouhých letů. Tyto postroje mají však často sníženou pasivní bezpečnost. Kvůli přidané hmotnosti kapotáží bývá snaha tuto hmotnost ušetřit například na chráničích páteře. Dalším výrazným negativem je poloha pilota. Při té má horší rozhled a zejména je tím zvýšen moment setrvačnosti pilota vůči svislé



Obrázek 2.1.4. Otevřená základní sedačka, převzato z [4].

ose. V důsledku vyššího momentu setrvačnosti může dojít snáze k překroucení (tzv. zatwistování) šňůr během nestandardních letových režimů. Jedná se o velmi nebezpečný jev, kdy dojde k rotaci pilota vůči kluzáku kolem svislé osy. Pokud dojde k vychýlení o 180°, šňůry se vzájemně překříží a téměř ztratí tendenci k navrácení do původní polohy. Při ještě větší odchylce dojde vlivem tření k zablokování řidiček a ztrátě kontroly nad kluzákem. Obvyklým řešením v této situaci je použití záchranného padáku. Kvůli nižšímu momentu setrvačnosti bývají využívány při akrobacii nekapotované sedačky.

2.2. Řízení padákového kluzáku

2.2.1. **Řízení padákového kluzáku řidičkami**

Řízení řidičkami je základní způsob ovládní kluzáku. Řidičky jsou šňůry přivázané k odtokové hraně křídla. Při jejich stažení dojde k deformaci odtokové hrany. Důsledkem toho je zvýšení úhlu náběhu, navýšení vztlaku a odporu. Například u dopravních letounů je dominantní navýšení vztlaku a s tím způsobený náklon a zatačení. U padákového kluzáku díky extrémně nízko položenému těžišti nemá navýšení vztlaku řidičkami z hlediska zatačení prakticky pozorovatelný důsledek. Oproti tomu nárůstem čelního odporu křídla dojde ke snížení letové rychlosti. Pokud jsou řidičky staženy asymetricky (obvykle je stažena jen řidička na straně, na kterou hodlá pilot zatočit), má strana s více staženou řidičkou větší odpor a tím sníženou rychlost letu. K zatočení dojde vlivem rozdílné rychlosti.

Protože stažení řidiček významně navýší odpor, lze s jejich pomocí regulovat rychlost letu. Toho se využívá zejména pro eliminaci kyvů vrchlíku směrem vpřed. Ty jsou nežádoucí, protože snižují efektivitu letu. Jsou důsledkem vírů vzduchu například na okrajích stoupavých proudů. Pokud by byl kyv výraznější, mohlo by dojít k takovému snížení úhlu náběhu, kdy dochází ke kolapsu náběžné hrany křídla. Zásah řidičkami je také obvykle nevyhnutelný při startu, kdy dojde k vyběhnutí vrchlíku vzhůru s větší rychlostí, než je rychlost rozbíhajícího se pilota. Pokud by nebyl vrchlík přibrzděn, předběhl by pilota a došlo by ke kolapsu jeho náběžné hrany.

2.2.2. Řízení padákového kluzáku náklonem



Obrázek 2.2.2. Zatačení náklonem s viditelnou deformací vrchlíku, převzato z [8].

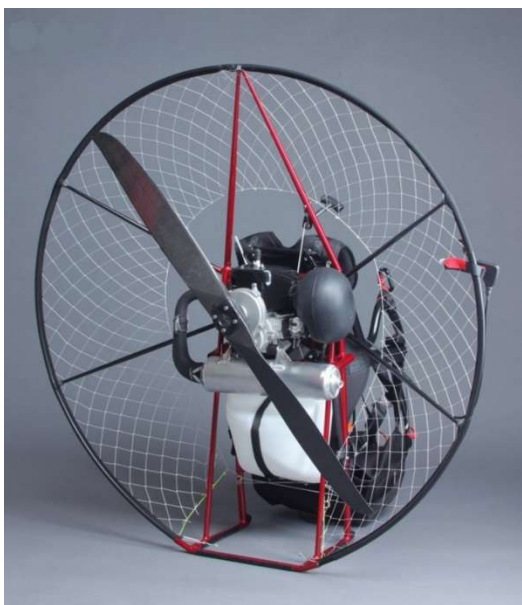
Jedná se o velmi důležitou součást řízení kluzáku. V klidných podmínkách je možné řídit pouze řidičkami. Nezkušení piloti často ani nemají techniku naklánění zvládnutou. V silnějších termických podmínkách, které bývají doprovázeny zvýšenou turbulencí, je naklánění prakticky nepostradatelné a jeho absence nebezpečná.

Nakloněním dojde ke změně výšky popruhů, tím pádem i nosných šňůr. To způsobí výškový rozdíl mezi oběma polovinami křídla. Ten je vyrovnán několika komorami, které jsou mezi oběma polovinami kluzáku. Tyto komory jsou nakloněny a vztlak na ně působí směrem do zatáčky.

Řízení náklonem se využívá téměř ve všech situacích (kromě rovného letu). Při zatažení řidičkami dochází ke zvýšení opadání. Pokud je použito menšího stažení řidiček a přidání náklonu, opadání se sníží při zachování stejného poloměru zatáčky. To je důležité zejména při kroužení ve slabších termických stoupavých proudech. Naklánění zároveň umožňuje zmenšení poloměru zatáčení, aniž by se zvýšilo stažení řidiček a tím pádem i riziko negativní zatáčky (odtržení proudnic na vnitřní polovině křídla). Nakláněním je dokonce v klidných podmínkách možné kluzák plně řídit a bezpečně s ním přistát na určeném místě.

Zřejmě nejdůležitější použití je v případě asymetrického zaklopení. V tomto případě je třeba se vyklonit v postroji na nezaklopenou stranu, aby nedošlo k nekontrolovatelnému zatažení např. směrem ke svahu. Kluzák se opět rychle regeneruje a je možné dále pokračovat v letu.

2.3. Pohony používané v paraglidingu



Obrázek 2.3.1. Motorová padáková krosna Miniplane Top 80, převzato z [5].

Pro pohon padákového kluzáku se používají motory opatřené obvykle pevnou vrtulí. Pro jednomístný padákový kluzák se v drtivé většině případů používají dvoutaktní zážehové jednoválcové motory. Čtyřtaktní se používají jen výjimečně. Pro stejný maximální výkon musejí mít větší zdvihový objem, s čímž souvisí jejich vyšší hmotnost. Navíc musí mít ventily, rozvodový mechanismus a olejovou náplň. To vše zvyšuje hmotnost a snižuje spolehlivost. Hmotnost je rozhodujícím parametrem zejména v případech, kdy nese pilot celou pohonnou jednotku na zádech. V některých případech dvoumístných motorových padákových kluzáku, kdy je pohonná jednotka opatřena podvozkem, bývá použit čtyřtaktní zážehový motor pro svoji vyšší efektivitu a nižší vibrace. Vibrace jsou velkou nevýhodou dvoutaktních motorů. Negativně ovlivňují životnost pohonné jednotky, ale i vrchlíku (zejména jeho šňůr). V neposlední řadě snižují pilotovo pohodlí a v krajním případě mohou dočasně zhoršit zrak.

V dnešní době se na trhu objevují také elektrické pohonné jednotky. Akumulátory jsou jejich velkou nevýhodou. Krosny se spalovacími motory jsou běžně schopny nepřetržitě letět 2,5-4 hodiny. Krosny s akumulátory typu li-pol jsou obvykle schopny letů v trvání 20-50 minut. Pokud by měly mít stejný dolet, jako odpovídající krosny se spalovacími motory, měla by akumulátorová sada příliš vysokou hmotnost na to, aby se s ní dalo bezpečně odstartovat. Velkou výhodou jednotek s elektrickým motorem je jejich jednoduchá konstrukce s velkou životností motoru. Obvykle také vykazují výrazně nižší vibrace, které lze teoreticky dokonalým vyvážením pohyblivých částí (zejména vrtule) zcela eliminovat.

3. Návrhová část

3.1. Současný stav modelu

Model byl vytvořen v rámci bakalářské práce Ing. Jana Punčocháře [10]. K modelu byl k dispozici i na míru ušitý kluzák v měřítku přibližně 1:2,5. Model byl v minulosti zkoušen při několika letových zkouškách. Systém náklonu, který byl v prvotním návrhu a spočíval ve zkracování závěsů, nebyl funkční. Později byly provedeny další koncepce, bohužel však neúspěšné.

Model byl převzat ve stavu, který umožňoval řízení pomocí řídicích šňůr. Dále bylo k dispozici funkční ovládání nestandardních letových režimů a speed systému (jehož použití neumožňuje použitý padákový kluzák). V modelu byly přítomny pozůstatky řízení napodobující řízení náklonem pilota. Pro další činnost bylo použito servo, které sloužilo k řízení náklonu již od počátečního návrhu. Vnější povrch modelu nesl známky předchozích testování, ale nic z toho neovlivňovalo další použití.

K modelu nebyl k dispozici vysílač s přijímačem a baterie pro napájení nízkonapěťových serv (servo náklonu a speed systému) a přijímače. Pro dosažení letové hmotnosti z původního návrhu (16 kg) nebyla k dispozici závaží, ani systém jejich uchycení.



Obrázek 3.1.1 Model ve stavu, v jakém byl převzat.

3.2. Součásti pro obnovení funkčnosti modelu

Protože model ve stavu, ve kterém byl převzat nebyl schopný letu, bylo potřeba doplnit komponenty, které to umožní. Bylo nutné zvolit vysílač s přijímačem, aby bylo možné model ovládat. Dále bylo třeba vyřešit napájení pro nízkonapěťový okruh (přijímač a nízkonapěťová serva).

3.2.1. Volba vysílací soupravy

Pro ovládání modelu byl vybrán vysílač Aurora 9. Ten umožňuje ovládání 9 nezávislých kanálů, nabízí široké možnosti programování a mixování (zejména důležité pro řízení náklonem). Navíc je, oproti jiným v této třídě, poměrně finančně výhodný.

K tomuto vysílači je standardně dodáván přijímač Optima 9, který je zcela dostatečný pro dané použití a proto nebylo třeba volit jiný.

3.2.2. Volba napájení pro nízkonapěťová serva

Pro napájení nízkonapěťového okruhu byl v minulosti použit akumulátor typu Ni-cd. Jeho nevýhodou je omezená životnost, relativně vysoká hmotnost i cena (oproti akumulátorům typu Li-pol). Li-pol akumulátor nemohl být použit, protože tyto akumulátory mají jmenovité napětí pro jeden článek 3,7V. Napětí 6 V proto není možné pomocí tohoto typu akumulátoru obvyklým používáním dosáhnout.

Druhá možnost byla osadit model DC-DC měničem napětí. Jedná se o dnes již běžně dostupnou a jednoduchou součástku, která navíc vychází výrazně levněji, než ni-cd akumulátor. Navíc odpadá nutnost dobíjení druhého akumulátoru. Další výhodou měniče je stabilizace výstupního napětí. Nevýhodou je vyšší zatížení stávajícího akumulátoru (Li-pol). Odběr serv, která jsou pro tento okruh použita je v součtu ve špičce (situace, která nastane jen zřídka) cca 5 A. Vzhledem k tomu, že tento akumulátor umožňuje odběr až 103 A pod napětím 7,4 V, neměla by být tato zátěž problémem. Nevýhodou použití měniče je jeho menší mechanická odolnost, což by mohlo být vyřešeno krytem.



Obrázek 3.2.2.1. Uložení a zapojení DC-DC měniče v modelu.

nemělo by ani přes absenci aktivního chlazení, dojít k přehřátí tranzistorů.

Byl vybrán DC-DC snižující měnič umožňující maximální proudový odběr 14 A, trvalý 12 A, plynulou regulaci výstupního napětí a je osazen dvěma chladiči z hliníkových slitin. Není vybaven ochranou proti tepelnému přetížení. Díky tomu, že je měnič dimenzován na výrazně vyšší proud,

3.3. Řízení náklonem

Řízení náklonem pilota je jeden ze způsobů ovládání padákového kluzáku. Nejedná se sice o způsob nezbytný pro let, jeho zahrnutí do pilotových schopností však přináší výrazné zefektivnění ovládání kluzáku, samotného letu a zvýšení bezpečnosti.

3.3.1. konstrukční možnosti

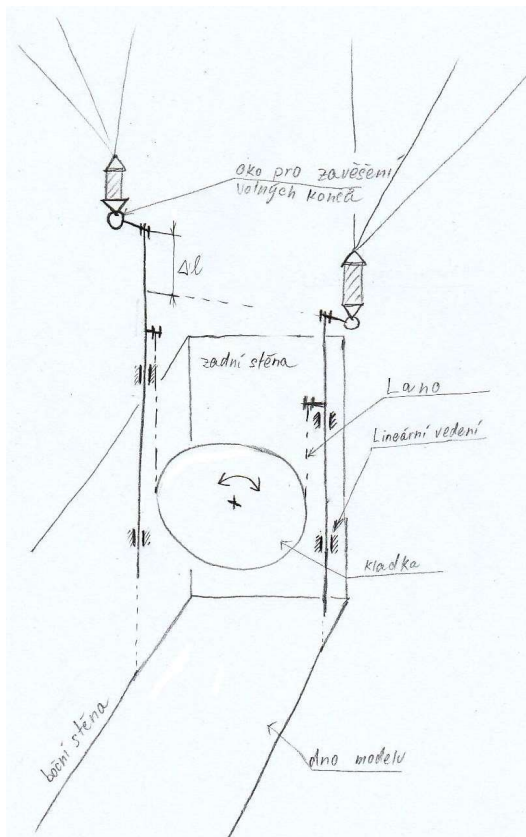
Pro řízení náklonem je možné použít dvou principů, tedy změnu polohy těžiště a rozdílnou výšku závesů, přičemž oba principy se vzájemně ovlivňují. Rozdílná výška závesů je způsobena deformací postroje. Zároveň dochází k vychýlení pilotova těžiště.

Pro změnu polohy těžiště by bylo možné použít pevné závaží pohybující se pomocí serva. Druhou možností by bylo umístění nádrží v bocích modelu a přečerpávání vhodné tekutiny mezi nimi. Při tomto řešení by v závislosti na zvolené tekutině musely být nádrže poměrně objemné, což by vzhledem k omezenému prostoru mohl být problém. Rychlost změny náklonu by navíc zřejmě nebylo možné provést dostatečně rychle. V případě, že by v nádržích byla použita voda, hrozilo by při jejím úniku zkratování elektrických obvodů. Varianta s pevným závažím by pravděpodobně umožňovala rychlejší reakce na ovládání a také by byla při použití olovených závaží méně prostorově náročná. Neumožňovala by ovšem tak široký rozsah změny polohy těžiště, protože vnitřní prostor modelu je poměrně úzký. Oba systémy změny polohy těžiště by zároveň vzájemně měnily výšku závesu a tím zvyšovaly účinnost systému. Přesto vzhledem k nízko položenému těžišti modelu by obě řešení zřejmě neměla dostatečný efekt.

Třetím systémem spočívá v možnosti změny výšky závěsů. Tato možnost je zřejmě prostorově nejúspornější a umožňuje rychlé reakce. Zároveň má dobré možnosti rozsahu řízení, které jsou prakticky omezeny rozsahem natočení ovládajícího serva a průměrem použité kladky, která by závěsy hýbala. Nevýhodou tohoto systému je značné namáhání ložisek serva v důsledku zatížení jeho výstupního hřídele navíc celou hmotností modelu. Další nevýhodou je, že při stažení závěsu na jedné straně bude mít model pravděpodobně tendenci se na tuto stranu mírně vychýlit. Díky nízkému těžišti by toto vychýlení nemělo výrazně zmenšit rozsah řízení. Z aerodynamického hlediska by mělo mít zanedbatelný vliv.

Z uvedených možností řízení náklonem byla zvolena třetí možnost pro svoji pravděpodobně nejvyšší efektivitu.

3.3.2. Koncepce



Obrázek 3.3.2.1. Schéma koncepce řízení náklonem.

Při řízení náklonem dochází k výraznému rozdílu výšky nosných karabin. Zvolená koncepce mechanismu je znázorněná na obr. 3.3.1. Celý mechanismus je umístěn v hlavním vnitřním prostoru modelu. Osa servomotoru je umístěna v ose letu modelu. Nevýhodou tohoto řešení je, že konce lineárního vedení musí přecházet obrysy modelu. Tím se stávají výrazně exponovanými a hrozí jejich poškození při kontaktu s terémem. Dalším problémem je nutnost změny neutrální polohy řídiček v závislosti na aktuálním náklonu. Tato skutečnost snižuje použitelnou dráhu řídiček zejména na straně, kde je závěs snížen, tedy na straně, na kterou model zatáčí. Díky použití digitálních serv je možné je přeprogramovat tak, aby dosahovala větších výchylek a tím ztracený rozsah nahradit. Neutrální polohu řídiček v závislosti na

náklonu bude třeba naprogramovat pomocí mixu ve vysílači.

Pro systém bylo třeba zvolit dostatečný rozsah. Ze zkušeností byl odhadnut rozdíl výšek závěsů při maximálním vyklonění pilota na 250 mm. Při uvažování měřítko modelu to odpovídá 100 mm.

Rozsah byl nejprve otestován pevným nastavením rozdílu výšky závěsů (kap. 5.1.). Při testu byl rozdíl výšky závěsů 102 mm, který byl shledán jako dostatečný pro řízení. Nebylo však zkoušeno, jak by se systém choval při nestandardních letových režimech.

Zvolený rozdíl výšky by měl zajistit dostatečně intenzivní řízení náklonem. Z umístění kladky vyplývá maximální možný roztečný průměr $d = 97$ mm. Maximální možný rozdíl výšky závěsu odpovídá dráze o opsané šňůrou na kolečku. Servo bude použito Hitec HS 805-BB, které bylo k modelu k dispozici z předchozí koncepce. Toto servo umožňuje standardní maximální výchylku 120° .

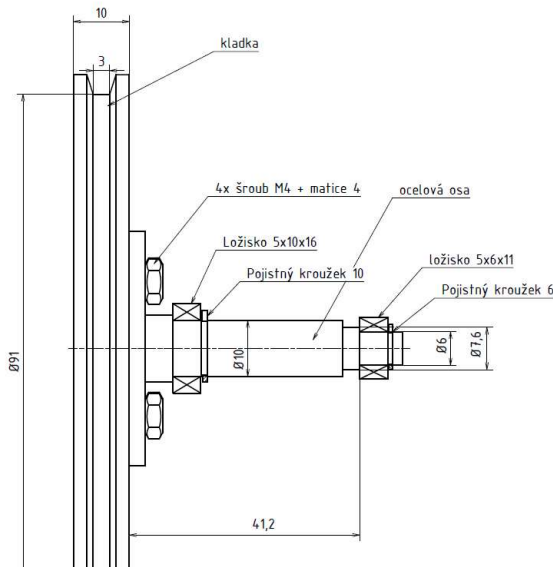
$$o = \frac{\pi \cdot d * \frac{120}{180}}{2} = 102mm \quad (3.3.2.1)$$

Tento rozsah odpovídá experimentu v kap. 5.1 a měl by zajistit dostatečný rozsah řízení. Pokud by se ukázalo, že je rozsah nedostatečný, bylo by možné použít programovatelné servo s větším rozsahem výchylek.

3.3.3. Uložení servomotoru

Uložení servomotoru bylo zvoleno pomocí dvou L profilů z hliníkových slitin. Spodní bude připevněn přímo ke dnu modelu pomocí vrutů. Horní bude pomocí úhelníků a šroubů se samojisticí maticí připevněn k bočnicím modelu. Tento způsob je relativně nenáročný na prostor, kterého je v těchto místech vlivem ostatních servomotorů poměrně málo.

3.3.4. Minimalizace vlivu ohybového momentu na servomotor



Obrázek 3.3.4.1. schéma systému pro minimalizaci vlivu ohybového momentu na servomotor

Jedním z velkých problémů tohoto systému je zatížení, které působí na servo a které neodpovídá jeho konstrukci. Na kladku bude působit celá hmotnost modelu, navíc umocněná přetížením například při provádění spirály (velmi ostrá zatáčka s velkým přetížením a opadáním sloužící pro rychlou ztrátu výšky). Pokud by toto zatížení bylo přenášeno jen přes servomotor, došlo by pravděpodobně k jeho zničení. Jeho plastová hřídel je uložena ve dvou jednořadých kuličkových ložiskách, která nejsou dimenzována na takovéto zatížení. Mají poměrně malou únosnost, jsou umístěna velmi blízko u sebe a jsou uložena v plastové skříni. Celé servo je navíc uloženo pomocí silentbloků. To by způsobovalo velké výchylky osy hřídele serva s možností vysmeknutí šňůry z drážky kladky. Zřejmě ani použití silnějšího serva s titanovou hřídelí by nebylo pro toto zatížení dostatečné.

Proto bylo zvoleno řešení, kdy je pokud možno veškerý ohybový moment, který by působil na hřídel serva, zachycen ocelovou osou, která je uložena ve dvou kuličkových ložiskách, která jsou na toto zatížení dimenzována.

3.3.5. Realizace



Obrázek 3.3.5.1. Lineární vedení s okem pro zavěšení k vrchliku.

Lineární vedení je stěžejní částí celého systému náklonu. Bylo realizováno pomocí běžně dostupných pojezdů pro nábytkové zásuvky. Ty jsou opatřeny kuličkovými ložisky. Rozdíl mezi spodní a horní polohou je 180 mm, zaručuje tedy dostatečnou rezervu pro případ použití serva s větším rozsahem výchylek. Nevýhodou těchto pojezdů je nedostatečná ochrana proti překročení maximální meze vysunutí.

V případě přetržení ovládací šňůry by se obě části vedení zřejmě oddělily. Proto bylo využito původních závěsů jako jisticího prvku. Pojezdy byly uchyceny pomocí šroubů a samojisticích matic do bočnic modelu.

Protože pojezdy nejsou navrženy pro namáhání krutem, je jejich tuhost při plném vysunutí poměrně malá a docházelo by k velkým deformacím, což by ovlivňovalo letové vlastnosti modelu. Proto byly ke kolejnicím přišroubovány ocelové pásy vyrobené z ploché tažené oceli o průřezu 16 x 3 mm. Kolejnice jsou vyrobeny z ocelového plechu o tloušťce 1 mm a délce střední křivky 22 mm. Jedná se tedy o štíhlý obdélník. Za předpokladu stejného modulu pružnosti platí.

$$\frac{M_{k2}}{M_{k1}} = \frac{W_{k1} + W_{k2}}{W_{k1}} = \frac{\frac{1}{3} \cdot b_1 \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot b_2 \cdot t_2^2}{\frac{1}{3} \cdot b_1 \cdot t_1^2} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 22 \cdot 1^2 + \frac{1}{3} \cdot 16 \cdot 3^2}{\frac{1}{3} \cdot 22 \cdot 1^2} \quad (3.3.5.1.)$$

$$= 7,55$$

Z toho vyplývá, že je možné při stejném napětí zatížit profil 7,55násobným kroučícím momentem. To zajistí dostatečnou tuhost. Tento výpočet vychází z předpokladu, že se mezi ocelovým pásem a kolejnicí nepřenáší smykové napětí. V reálné situaci se do určité míry přenáší, takže únosnost bude ještě větší.

Do horní části kolejnic byla umístěna oka se závitem M6 a zajištěna kontramaticemi z obou stran. Toto řešení umožňuje snadné nastavení vzdálenosti závěsů.



Obrázek 3.3.5.2. kladka s namontovanou osou včetně nalisovaných a zajištěných ložisek

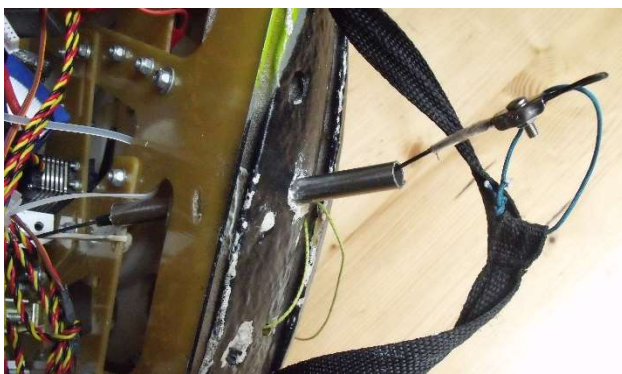
Kladka ovládající náklon měla být vyrobena ze silonové desky tloušťky 10 mm. Nejprve však byla vyrobena zkušební kladka z tvrdého palisandrového dřeva. Ta se nakonec ukázala jako dostatečná pro provoz a nebylo třeba vyrábět další silonovou. Páka serva byla upevněna do vyfrézované drážky na čelní ploše kladky pomocí dvou šroubů. Z druhé strany byla čtyřmi šrouby připevněna osa opatřená ložisky a hřídelovými pojistnými kroužky. Protože je

kladka axiálně zajištěna šroubem páky serva, ložiska na ose byla uložena jako axiálně volná. K tomuto uložení bylo využito L profilů z hliníkových slitin. Toto řešení není ideální, protože nedokáže přenést velké radiální síly (ložisko je uloženo jen v malé ploše). Pro tuto aplikaci je toto uložení dostatečné, protože radiální síly nevyužívají potenciál ložisek.

Uložení osy je velmi robustní, ale problémem byl nedostatek místa. Kvůli montáži bylo třeba vymontovat serva speed systému i řidiček. Poté bylo třeba namontovat na servo kladku s již namontovanou osou i ložisky. Na ta byly nasunuty L profily. Celá montáž byla poměrně obtížná a časově náročná. Pokud by bylo nutné vyměnit servo, znamenalo by to opět odmontovat zmíněná serva, i celé uložení ložisek s osou i kladkou.

3.3.6. Úprava systému řízení náklonem

Při několika zkouškách s neúspěšnými starty a přistáními s následnou rotací modelu se ukázalo, že ližiny systému náklonu nejsou dostatečně pevné. Oka, do kterých jsou zavěšeny pomocí karabin volné konce, musela být vzhledem k rozměrům vrchlíku umístěna poněkud směrem od středu vůči ližinám. To je učinilo velmi exponovanými a při plném vytažení tvořila navíc poměrně velké rameno vůči uložení ližin pomocí kuliček. Drážky pro kuličky nebyly dostatečně hluboké a kvůli tomu došlo při větším namáhání k jejich oddělení od ližin. Tato porucha nastávala přibližně při polovině kontaktů ok s terénem. Po tomto poškození bylo sice možné kuličky naskládat zpět, jednalo se ale o poměrně pracnou činnost. Obvykle však došlo ke ztrátě části kuliček, takže bylo třeba dokoupit nové. Zřejmě by také ližiny nesnesly větší počet těchto oprav.



Obrázek 3.3.6..1 Upravený systém řízení náklonem.

Vzhledem k výše uvedeným potížím byla vytvořena alternativa za použití ocelových lanek umístěných v bowdenech. Do modelu byly umístěny trubky z korozivzdorné oceli, které zajistily přesné umístění bowdenu, tím pádem spolehlivější vedení a správnou rozteč volných konců.

Protože vlivem tření by mohly být kladeny příliš velké silové nároky na servo, bylo použito ocelové lanko s potahem z PTFE, který výrazně snižuje tření bez nutnosti použití maziva. Trubky byly vytvarovány tak, aby byly bowdenu téměř přímé a ztráty třením co nejnižší.

3.3.7. Pohon

Pro létání s modelem bez motoru je nutné pečlivě vybírat letové terény. Je nutné, aby přistání bylo na dohled z místa startu a nepříliš vzdálené, aby bylo možné bezpečně přistát. Dále bylo třeba terény volit s ohledem na vhodné počasí, a to zejména směr větru. Omezením byl také letecký provoz a další lidé na těchto terénech. Bylo tedy obtížné všem těmto požadavkům vyhovět.

Existence pohonu by tyto obtíže odstranila. Bylo by možné létat za klidného počasí a stačila by k tomu dostatečně velká travnatá plocha, což jsou požadavky snadněji splnitelné.

Nabízejí se dvě verianty pohonu. První možností je použití cizího pohonu, tedy například navijáku či odvijáku. Toto řešení se však v minulosti ukázalo jako nevhodné. Druhou možností je použití vlastního motoru s tlačnou vrtulí. Jeho nevýhodou je ovlivnění aerodynamických vlastností a zvýšení momentu setrvačnosti vůči svislé ose.

3.3.8. Dimenzování pohonné jednotky

Pro účely výpočtu byl zvolen jako příklad stroj Miniplane Top 80. Jedná se o pohonnou jednotku s relativně malým výkonem a velmi malým zdvihovým objemem (80 cm³)

$$P_{max0} = 11 \text{ kW (14,8 Hp)}$$

$$m_0 = 101,5 \text{ Kg (pilot 75 Kg, motorová krosna s palivem 21,5 Kg, padákový kluzák 5 Kg)}$$

$$v_s = 2,5 \text{ m/s}$$

$$\text{měřítko modelu: } q = 1:2,5$$

v případě stejné letové rychlosti a požadavku na stejnou rychlost stoupání platí:

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{F_{x0}}{F_{x1}} = \frac{P_{max0}}{P_{max1}} = \frac{1}{q^2} \quad (3.4.1.1.)$$

Po úpravě platí:

$$P_{max1} \geq P_{max0} \cdot q^2 = 11 \cdot \left(\frac{2}{5}\right)^2 = 1,76 \text{ kW} \quad (3.4.1.1.)$$

3.3.9. Volba typu motoru

V kapitole 3.4.1. byl vypočítán minimální potřebný výkon motoru. Je proto potřeba zvolit, jaký typ je pro pohon padákového kluzáku nejvhodnější. Základní dělení je na spalovací a elektrický motor.

3.3.9.1. Spalovací motor

Jednou z možností by bylo použití spalovacího motoru. Jeho nespornou výhodou je možnost dlouhých letů, které by umožnily provedení mnoha testů během jednoho letu. Další výhodou by byl poměrně vysoký měrný výkon a s tím související malé rozměry motoru. Pro použití dle výpočtu v 3.4.1 by vyhovoval motor OS MAX GT-22 o zdvihovém objemu 22 cm³ a výkonu 2 kW. Oproti elektrickému pohonu je toto uspořádání také levnější.

Spalovací motor má však řadu nevýhod. Předně je to možnost propálení vrchlíku, pokud by při přistání došlo ke kontaktu například s výfukem. Dále by mohlo dojít ke kontaminaci vrchlíku olejem, nebo palivem, což by poškodilo tkaninu vrchlíku. Další problém spočívá ve vibracích. Ty by mohly mít za následek povolování šroubů a poškozování lepených spojů.

Zřejmě největším problémem by bylo, vzhledem k umístění v zadní části, chlazení motoru. V tomto případě by bylo nutné vytvořit v modelu větrací otvory, případně umístit motor tak, aby jeho hlava a válec byly mimo model. Všechna tato opatření by měla za následek výrazné nežádoucí změny aerodynamických vlastností.

3.3.9.2. Elektrický motor

Elektrický pohon je proti spalovacímu dražší, ale produkované vibrace jsou nesrovnatelně nižší a nehrozí zde propálení, či znečištění vrchlíku. Velkou nevýhodou je relativně nízká kapacita akumulátorů (vzhledem k jejich ceně, hmotnost zde vzhledem k nutnosti dovažování závažími není problém) a tomu úměrná doba letu. Následně je třeba akumulátory dobít, což vyžaduje minimálně 1 hodinu času a tím pádem velké zdržení při testovacích letech. Možností je pořízení více akumulátorových sad, případně akumulátorů s větší kapacitou za cenu navýšení hmotnosti.

Existují dva typy elektrických motorů. Z hlediska napájení je výrazně jednodušší stejnosměrný komutátorový motor. Jeho regulace je poměrně jednoduchá a málo nákladná. Tyto motory jsou však vyráběny pouze pro malé výkony, které zdaleka nevyhovují požadavku minimálního

výkonu. Druhou možností je použití střídavého elektromotoru. Ty jsou vyráběny pro dostatečné výkony. Jejich nevýhodou je výrazně složitější systém napájení.

Vzhledem k požadavku na minimální výkon byl zvolen motor Foxy G2 5320-220 s maximálním výkonem $P_{\max} = 2,1$ kW.

Tento výkon je však motor schopen dodávat jen po omezenou dobu a za cenu snížení účinnosti.

Vrtule by měla být schopná využít plný výkon motoru. Minimální doporučený průměr vrtule pro tento motor je 405 mm. Pro tento průměr výrobce motoru doporučuje stoupání vrtule 200 mm. Teoretická rychlost vrtulového proudu při maximálních otáčkách by byla 114 km/h. To je výrazně více, než je rychlost letu modelu, což by vedlo k nižší účinnosti. Další možností by bylo použití větších vrtulí, jejichž účinnost by byla vyšší. Větší průměr vrtule by ale znamenal její větší náchylnost k poškození. Zároveň by zbytečně zvyšovala čelní odpor modelu.

Byla vybrána vrtule (dle doporučení výrobce motoru) o rozměrech:

$$D_v = 405 \text{ mm (16'')}$$

$$S = 200 \text{ mm (8'')}$$

Vzhledem k tomu, že model má velké hmotnostní rezervy, je možné jej osadit akumulátory s větší kapacitou a tím kompenzovat sníženou účinnost.

3.3.9.2.1. Napájení motoru

Napájení střídavého motoru je oproti stejnosměrným motorům podstatně složitější. Akumulátorová sada je totiž schopna dodat výhradně stejnosměrný proud. Střídavý motor vyžaduje na svém vstupu proud střídavý, a to ideálně se sinusovým průběhem, navíc o konkrétní frekvenci. Tyto požadavky dokáže pomocí vhodné modulace splnit tzv. regulátor. Ten je vybaven výkonovými tranzistory, které při vysoké frekvenci střídavě spínají silové obvody a v kombinaci s kondenzátory dokáží vytvořit téměř ideální sinusový průběh tak, aby měl motor co nejvyšší účinnost. Nevýhodou tohoto řešení jsou ztráty, které vznikají na tranzistorech i kondenzátorech. V porovnání s účinností motoru jsou však výrazně nižší a proto nepodstatné.

Motor umožňuje použití různého počtu článků. Pro maximální výkon se zvolenou vrtulí je dle výrobce vhodné použít sadu 12 li-pol článků. Ty dodávají jmenovité napětí 44,4V.

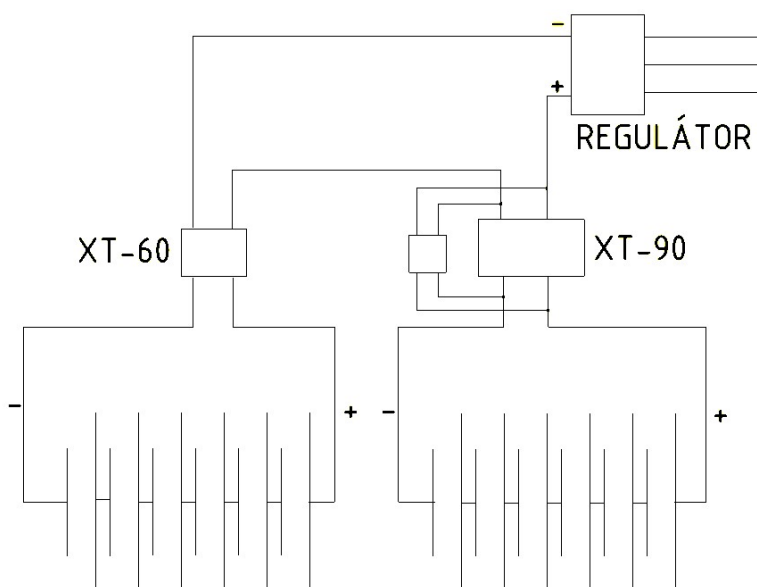
Protože jsou běžně k dostání pouze akumulátory s maximálně 6 články, budou použity 2 sériově zapojené akumulátory.

Tyto akumulátory musejí dodat dostatečný proud a zároveň mít dostatečnou kapacitu. Byly zvoleny akumulátory s kapacitou 3300 mAh a maximálním stálým proudem 115,5 A. Bylo využito předpokladu, že při stoupání nebude motor využívat plný výkon, ale takový, aby byl v oblasti nepřiliš nízké účinnosti. Tomu odpovídá proud přibližně $I = 48 \text{ A}$

$$t = \frac{C \cdot 60}{I} = 4,125 \text{ min} \quad (3.4.2.2.1.1.)$$

$$h = t * 60 * v_s = 618 \text{ m} \quad (3.4.2.2.1.2.)$$

Z uvedeného výpočtu vyplývá, že při nastavení výkonu na 1,7 kW (proud cca 48 A) bude motor podávat výkon 4,125 minut a model v tomto režimu dokáže získat výšku 618 m AGL, která je dostatečná pro provádění jakéhokoliv manévru.



Obrázek 3.4.2.2.1.1. Schéma zapojení akumulátorů k regulátoru pomocí konektorů včetně pomocného konektoru zabraňujícím jiskření na silových konektorech.

Pro vzájemné spojení akumulátorů a jejich připojení k regulátoru bylo potřeba zvolit odpovídající konektory. Nutným parametrem je ochrana proti přepólování, které by zničilo regulátor. Základním parametrem je maximální proud. Ten je pro zvolený motor 57 A. Proto byly zvoleny konektory XT-60 na první akumulátor (připojenou

na záporný pól regulátoru) a XT-90 na druhý akumulátor. Protože součástí regulátoru jsou kondenzátory, které se při připojení akumulátorů nabíjejí, docházelo by při připojování konektorů k jiskření, které by příliš opotřebovávalo kontakty. Proto byl použit paralelní konektor k druhému akumulátoru, který má standardně velký odpor a jeho opotřebení

důsledkem jiskření nebude mít vliv na napájení regulátoru. Použití různých silových konektorů zaručí, že nedojde k jejich záměně a zkratu přes pomocný sériový obvod.

Protože se jedná o střídavý motor, musí být vybaven regulátorem (reguluje proud a vytváří střídavé napětí). Pro tyto účely byl zvolen regulátor s maximálním proudovým zatížením $I = 90 \text{ A}$. Ten je dodáván v sadě společně s motorem a nebyl shledán důvod volit jiný.

3.3.9.2.2. Volba typu vrtule

Vrtule pro letecké modely se vyrábějí ve dvou základních provedeních. To je buď tažné, nebo tlačné. Běžně bývají vrtule umístěny vpředu na letadle, jsou tedy tažné. Pokud je vrtule v tlačném uspořádání, má opačný smysl stoupaní, a tak při montáži na zád' modelu zůstane zachovaný smysl otáčení motoru. Z hlediska profilu, aerodynamických a pevnostních vlastností jsou vrtule v tažném i tlačném uspořádání identické. Smysl otáčení motoru lze velmi snadno změnit (přeprogramováním regulátoru, nebo vzájemnou záměnou dvou vodičů), proto je použití tažné vrtule možné i v tlačném uspořádání a naopak. Výhodou tažné vrtule je, že ve zvoleném rozměru je běžně dostupná, ale tlačná je dostupná pouze v zahraničí, což by znamenalo výrazně vyšší náklady a prodloužení doby dodání. Použití tažné namísto tlačné vrtule má nevýhodu v opačném smyslu otáčení, který má tendenci povolovat matici zajišťující vrtuli. Pokud by se tato matice zcela vyšroubovala, vrtule by se pravděpodobně pouze protáčela. Existuje ale riziko, že by došlo k jejímu oddělení, což by při jejích vysokých otáčkách mohlo být nebezpečné.

Byla zvolena tažná vrtule. Kvůli minimalizaci rizik je nutné matici zajistit proti povolení. Existuje několik způsobů. V úvahu by připadalo použití kontramaticy, nebo matice se závlačkou. Kontramatice je třeba dotahovat velkým momentem, což by mohlo poškodit hřídel motoru, proto byla zvolena korunová matice opatřená závlačkou, pro kterou byl do hřídele motoru vyvrtán otvor.

3.3.10. Ochrana proti poranění osob

Vzhledem k relativně malé vrtuli budou její otáčky velice vysoké (přibližně 10000 ot/min). Při těchto otáčkách je třeba zamezit kontaktu osob s vrtulí, zejména osob obsluhujících model při startu. Kontakt s vrtulí by mohl mít vážné následky. Navíc by tím pravděpodobně

došlo k poškození vrtule. Před vrtulí je také třeba ochránit nosné a řídicí šňůry. Dalším důvodem je možnost nárazu vrtule do země v případě, že by došlo ke kutálení modelu po přistání.

Pro ochranu je zvolen kruhový koš inspirovaný košem z běžných krosen pro motorový paragliding. Aby se zamezilo kontaktu například rukou s vrtulí, musel by být koš vyroben z velkého množství trubek. To by jednak zvýšilo hmotnost, ale zejména čelní odpor. Proto bude z trubek vytvořen pouze rám a ten bude opatřen výpletem z polyamidových vláken. Rám byl navržen jako trubková konstrukce. Pro jednoduchou výrobu byly svarové spoje nahrazeny nýtovanými. Vzhledem k tomu, že tažnost zvolené hliníkové slitiny (EN AW 6060) je $A_m = 12\%$, bylo nutné spočítat minimální poloměr zakřivení r . Vnější průměr trubky byl zvolen $D = 10\text{mm}$

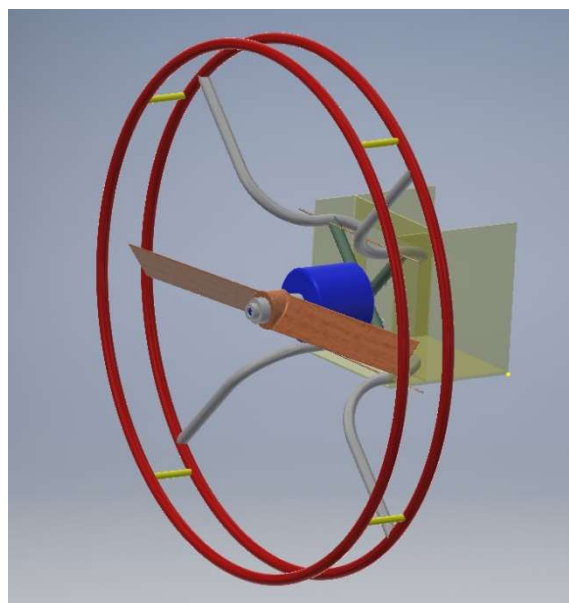
$$A_m = \frac{l_v - l_s}{l_s} = \frac{\varphi \cdot (r_s + \frac{D}{2}) - \varphi \cdot r_s}{\varphi \cdot r_s} = \frac{D}{2r_s} \quad (3.4.3.2.)$$

$$r_s = \frac{\frac{D}{2}}{A} = \frac{5}{0,12} = 41,7\text{mm} \quad (3.4.3.2.)$$

Konstrukce byla navrhnutá s minimálním poloměrem křivosti trubek 55 mm.

Častým řešením motorových padákových krosen je použití pouze jednoho vnějšího kruhu. Paprsky vedoucí od motoru k tomuto kruhu bývají proto vhodně zakřiveny, aby se zvýšila tuhost a vrtule byla více chráněna. Použití ohýbaných paprsků by bylo vzhledem k celkovým rozměrům složité, proto byly navrhnuty paprsky směřující rovnoběžně s rovinou vrtule. Pokud by při tomto uspořádání bylo použito pouze jednoho vnějšího kruhu koše, byla by rovina vrtule za ním. To by nemuselo zaručit dostatečnou ochranu šňůr kluzáku. Proto bylo navrženo uspořádání se dvěma kruhy ve vzájemné vzdálenosti 45 mm. To zaručí, že celá vrtule bude uvnitř koše a dobře chráněna. Bude tím také zvýšena odolnost koše pro případ střetu s terénem.

Vzhledem k tomu, že koš výrazně vyčnívá z modelu, je velmi pravděpodobný jeho kontakt s terénem při startu i přistání. V takovém případě by na něj mohly působit velké síly. Ty by mohly poškodit samotný koš, nebo i kostru modelu. V případě deformace některé části koše by molo dojít k destrukci vrtule. Proto byl zvolen systém, kdy dojde při relativně malé síle k oddělení koše od modelu. V trubkách koše a ve stěnách modelu budou vyvrtány otvory, skrz které budou prostrčeny celkem 2 kruhové dřevěné nosníky o průměru 2,5 mm. Při kontaktu koše s překážkou se výrazně zvýší namáhání nosníků (kombinace stříhu a ohybu), Pokud je vnější síla dostatečná, dojde k lomu nosníku a je umožněn volný pohyb koše směrem vzad, nebo jeho rotace kolem všech os kolmých na osu letu. Možnost rotace je umožněna kruhovým zakřivením částí trubek, které ústí do modelu. Tím se sníží riziko poškození kterékoliv jiné části. Výhodou tohoto systému je snadná a levná nahraditelnost nosníků, k jejichž poškození může dojít téměř při každém přistání. Nosníky však nemají dostatečnou pevnost na přenos sil způsobených samotným motorem a vrtulí. Pro přenos axiální síly byl zvolen jednoduchý systém opření. Konce trubek, které ústí do modelu musí být zabroušeny do jedné roviny a do modelu namontovány L profily z hliníkových slitin, o které se koš opírá. Reakční moment vrtule je přenesen stěnami modelu díky tvaru koše, který těsně vyplňuje zadní prostor modelu. Je nutné, aby byl motor připevněn dostatečně tuhým spojením přímo ke koši, aby nedošlo k vzájemnému pohybu koše a motoru s vrtulí. Toto by hrozilo zejména při maximálních otáčkách motoru. Spojení bylo zvoleno pomocí 4 šroubů M4 opatřených kontramaticemi.



Obrázek 3.4.3.1. Návrh klece motoru s uložením.

3.3.11. Realizace pohonu



Obrázek 3.4.4.1. Spojené kruhy s připravenými spojkami, Obrázek 3.4.4.2. Smontovaná klec s výpletem paprsky před montáží.

Vnější kruhy klece byly vyrobeny z trubek pomocí zakružovačky. Ta vytvořila kruh o potřebném průměru. Konce byly odříznuty tak, aby měla trubka správnou délku. Do trubky byly vlepeny krátké vložky zhotovené z trubky o vnějším průměru 8 mm. Celý spoj byl slepen epoxidovým dvousložkovým lepidlem a snýtován. Protože v případě spojů ve tvaru T by za použití vložek o vnějším průměru 8 mm bylo potřeba vyvrtat adekvátní otvor, došlo by k výraznému oslabení trubek. Proto byly použity vložky o vnějším průměru 6 mm. Spoje byly opět slepeny lepidlem a snýtovány. V těchto spojih hraje lepidlo důležitou roli, protože nebylo možné udělat díru pro vložku s přesahem tak, aby byl spoj dostatečně tuhý. Vúle ve spoji byly proto vyplněny lepidlem.

Protože zakružovačka by nedokázala vytvořit poloměr zakřivení 55 mm a konce zakřivení nejsou plynulé, byly trubky ohýbány pouze pomocí trubky o adekvátním průměru. Touto metodou bylo dosaženo překvapivě dobrých výsledků. Paprsky byly následně připevněny obdobným způsobem, jako předchozí spoje. Aby nedošlo k přílišnému oslabení trubek, byly spoje vnějších kruhů od předchozích spojů posunuty. Konce paprsků byly spojeny pomocí trubek do tvaru X, na který bylo možné připevnit motor. Do paprsků i modelu byly vyvrtány otvory o průměru 3 mm. Ty slouží k vzájemnému spojení modelu a koše tak, aby při



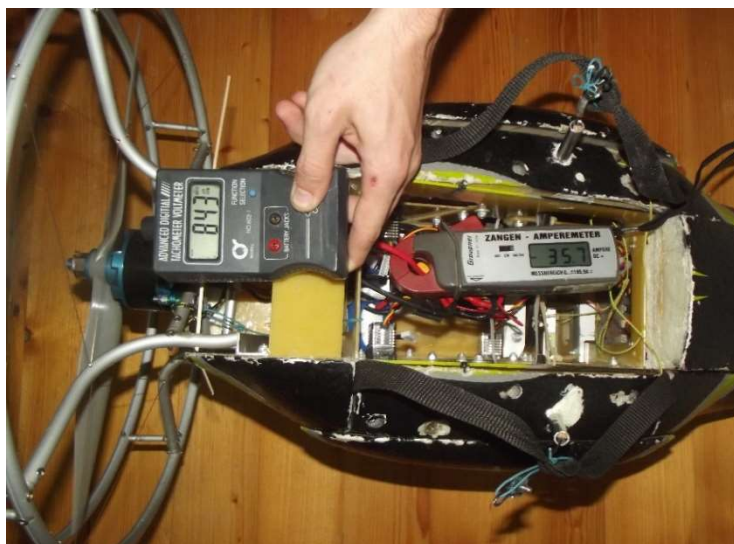
Obrázek 3.4.4.3. Uchycení koše k modelu pomocí 2 kruhových nosníků a opření o L profily.

kontaktu se zemí došlo k přestřižení nosníků a oddělení koše. Z experimentu v kap. 5.2. vyplynulo, že nosníky je třeba seříznout na 0,5 – 0,7násobek původního průřezu.

Z dalších experimentů bylo zjištěno, že postačí použití jednoho seříznutého nosníku v horní části uchycení.

Do paprsků i vnějšího kruhu byly vyvrtány další otvory o průměrech 1,5 a 2 mm. Ty slouží k provlečení polyamidového rybářského vlasce a vytvoření výpletu. Ten chrání vrtuli i okolí a zároveň svým napětím zvyšuje tuhost koše.

Z první měření letové zkoušky (kap. 5.3.) vyplynulo poměrně dobré stoupaní modelu



Obrázek 3.4.4.4. Optický otáčkoměr (vlevo) a klešťový ampérmetr (vpravo) při měření maximálního výkonu pohonu.

(1,5m/s) při plných otáčkách motoru. Naproti tomu se baterie vybíjely relativně pomalu (po letu dlouhém 12 min. a 21s bylo naměřeno napětí baterií 3,68V/článek, což odpovídá zbývající kapacitě na cca 35%) Z toho bylo usouzeno, že vrtule nevyužívá plný výkon motoru. Vrtule také nepodávala dostatečný tah pro start. Byla tedy použita vrtule o shodném průměru 16'' (405

mm) a zvýšeném stoupaní 10'' (254 mm). Ta by měla mít výrazně vyšší tah a využít lépe výkon motoru.

Aby nedošlo k poškození motoru nebo regulátoru, bylo zatížení motoru ověřeno pomocí klešťového ampérmetru. Ten se umísťuje okolo silového vodiče mezi baterií a regulátorem. Měří tak proud tekoucí regulátorem. Měření probíhalo s počátečním napětím baterií 4,18V/článek (plně nabitě akumulátory). Při nastavení plných otáček byl změřen proud 35,7A a pomocí optického otáčkoměru byly změřeny otáčky vrtule 8430 min^{-1} . Změřený proud je výrazně nižší, než maximální výrobcem povolený (57 A). Z uvedeného měření lze také spočítat příkon motoru.

$$P = U \cdot I = U_i \cdot n \cdot I = 4,18 \cdot 12 \cdot 35,7 = 1791 \text{ W} \quad (3.4.4.1.)$$

Při započtení udávané minimální účinnosti $\eta = 0,83$ a zanedbání ztrát na regulátoru lze spočítat činný výkon přenášený na vrtuli

$$P_p = P \cdot \eta = 1791 \cdot 0,83 = 1486 \text{ W} \quad (3.4.4.2.)$$

Při porovnání s maximálním udávaným výkonem 2100 W lze zjistit, že využití motoru je 71 %
Vzhledem k rozměrům koše není možné použít vrtuli o větším průměru. Bylo by však možné použít vrtuli se stoupáním 12'' (305 mm). Ta by však pravděpodobně vykazovala výrazný reakční moment v porovnání se získaným zvýšením tahu. Vrtulový proud by měl pak již velmi neúměrnou rychlost, a to by znamenalo nižší účinnost. Zkoušením bylo zjištěno, že s vrtulí se stoupáním 10'' měl model velmi dobrou stoupavost (1,86 m/s)

3.4. Start

Start je v paraglidingu pravděpodobně nejobtížnější částí letu. Jedná se o stěžejní část výuky pro získání základní pilotní kvalifikace. Při startu se musí skloubit dostatečně rychlý běh s precizními korekcemi řízení pro zachování tohoto směru.

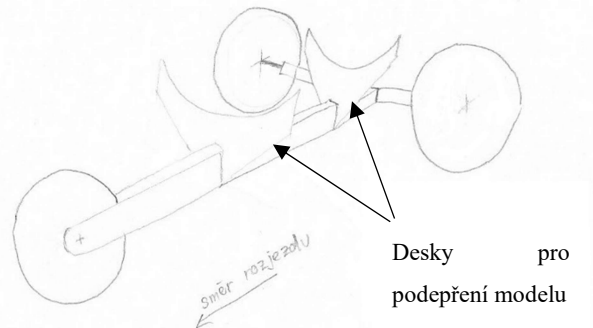
Start začíná rozložením vrchlíku do tvaru podobnému při letu. Posléze pilot po připnutí do postroje zdvihne popruhy skupiny A a rozběhne se ve směru letu. Z různých důvodů (nepřesné rozložení vrchlíku, poryv větru, skloněný terén, nesymetrické zdvihnutí popruhů apod.) obvykle dojde k asymetrickému vyběhnutí. Je tedy potřeba více vyběhlou stranu přibrzdit a běžet směrem k méně vyběhlé straně, aby došlo o obnovení přímého vyběhnutí. Poté následuje akcelerace a odpoutání.

Starty z roviny s modelem se ukázaly jako poměrně náročné a s vrtulí točící se při plných otáčkách potenciálně velice nebezpečné, bylo na ně potřeba alespoň 2 pomocné osoby. Bylo obtížné pomocné osoby zkoordinovat.

Pro zjednodušení startů se nabízí možnost vytvořit jednoduchý podvozek se třemi koly. Přední kolo by mohlo být říditelné a tím podjíždět pod šikmo vybíhající kluzák. Toto řešení by bylo poměrně složité. Bylo by třeba kolečko opatřit servem a celý podvozek opatřit přijímačem a baterií. Alternativou by bylo použít pro ovládání přijímač modelu, který by byl při vzletu odpojen. Obě tato řešení jsou poměrně složitá a nákladná. Navíc by bylo zřejmě velice obtížné řídit při startu model navíc s podvozkem. Druhou možností by bylo vytvořit podvozek, který

bude mít neřiditelná kola a bude co nejvíce zachovávat přímý směr. Při startu přímo proti stabilnímu větru, nebo za bezvětří, by měly být korekce pomocí řídiček dostatečné.

Podvozek byl vytvořen jako neřiditelný, což by mělo vyhovovat pro krátké rozjezdy (při delších by mohl podvozek vlivem nepřesnosti výroby, nerovnosti terénu a dalších vedlejších vlivů změnit směr a znemožnit start). Podvozek byl zkonstruován tak, aby na něm byl model volně položen a podepřen z boku, aby neměl tendenci se naklánět. Zároveň bylo nutné, aby se podvozek při vzletu oddělil od modelu, jinak by výrazně zvyšoval



Obrázek 3.5.1. Skica podvozku.

letovou hmotnost a ovlivňoval letové vlastnosti. Při oddělování bylo nutné zabránit kontaktu rámu motoru a také vypínače obvodu baterie pro serva, přijímač a měnič napětí. Opření bylo realizováno pomocí dvou dřevěných desek, z nichž obě jsou umístěny za vypínačem, takže při odpoutání modelu se bude podvozek vůči modelu pohybovat vzad, a tudíž nemůže přijít do styku s vypínačem. Kontakt s rámem motoru bylo zamezeno tak, že desky byly umístěny v téměř nejnižších částech modelu, takže i kdyby start probíhal jen s minimálním stoupáním, koš by se pohyboval výrazně nad deskami. Zepředu modelu byla umístěna zarážka, aby model nevyjížděl předčasně z podvozku.

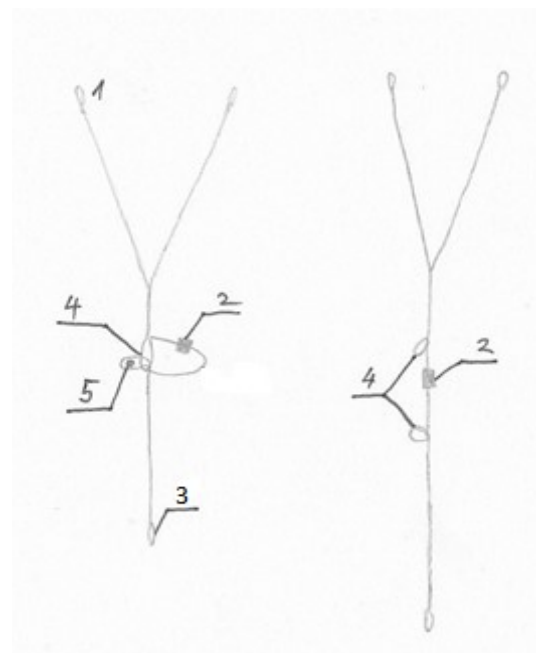


Obrázek 3.5.2. Model těsně před startem z odnímatelného podvozku.

Při několika zkouškách se ukázalo, že bez obsluhy byl kluzák schopen vyběhnout jen do cca 30° nad terén, poté spadl na zem a start nebyl úspěšný. Proto byl vytvořen systém, kdy jsou karabiny předních „A“ popruhů vyvázané pomocí šňůry k přední části modelu. Délka šňůr byla nastavena tak, aby při letu byly mírně

prověšeny a neovlivňovaly geometrii křídla. Pokud však popruhy při startu směřují vzad, jsou šňůry napnuty a „A“ popruhy výrazně staženy. Protože nebylo nalezeno nastavení, kdy byly A

popruhy dostatečně stahovány a zároveň neovlivňovaly geometrii vrchlíku při letu, bylo vytvořeno vylepšení. To spočívá ve zkrácení vyvázání (šňůry vedoucí od A popruhů k přední části modelu) pomocí oka (4) a závlačky(5). Závlačka je připevněna k podvozku, a tak je při startu vytažena a A popruhy nejsou nadále stahovány. Po startu a vytažení závlačky jsou obě části vyvázání pouze povoleny. Pokud by byly zcela odděleny, mohlo by dojít k nasátí vyvázání A popruhů vrtulí, jejímu zničení, stažením vyvázání ke kolapsu vrchlíku a nekontrolovatelnému pádu modelu. Obě části vyvázání jsou po startu spojeny přezkou (2), kterou lze po přistání snadno rozepnout a oddělit tak snadno vrchlík od modelu.



Obrázek 3.5.3. schéma vyvázání A popruhů k přední části modelu (vlevo před a při startu, vpravo po startu) 1 – uchycení k A popruhům, 2 – přezka, 3 – uchycení k přední části modelu, 4 – oka pro provlečení závlačky, 5 – závlačka,

4. Měření letových veličin

Měření letových veličin mělo být původně zaznamenáváno pomocí záznamového zařízení ArduPilot APM 2.8 s poměrně přesným GPS přijímačem, senzorem tlaku, gyroskopickým čidlem a elektronickým kompasem. Toto zařízení umožňuje zejména poměrně přesné mapování polohy s výškou, dále pak záznam kurzu letu a náklonu ve 3 osách.

Než byla naměřena použitelná data, bylo toto zařízení při zkoušce č. 1 (kapitola 5.3) bohužel poškozeno. Proto bylo nahrazeno mobilním telefonem Sony Xperia Z3 compact D 5803. Tento telefon disponuje dostatečně přesným GPS přijímačem a také tlakovým čidlem s dostatečným rozlišením pro relativně přesné určení výšky. Telefon obsahuje i gyroskopické čidlo a digitální kompas. Digitální kompas je však velmi nepřesný. Navíc nebyl nalezen program, který by umožňoval záznam letu včetně dat gyroskopického čidla. Nakonec byla zaznamenávána pouze data GPS a výška určovaná pomocí tlakového čidla.

Data byla zaznamenávána pomocí programu XC Track, který se běžně používá pro navigaci a záznam letu při paraglidingu a závěsném létání. Výstupem tohoto programu byly soubory formátu igc, které byly následně převedeny na tabulku dat ve formátu xlsx.

5. Experimentální část

5.1. Ověření funkčnosti koncepce řízení náklonem



Obrázek 5.1.1 Deformace vrchlíku v důsledku rozdílné výšky závěsů.

Protože celý systém je konstrukčně poměrně složitý a jeho provedení časově náročné, bylo vhodné nejprve vyzkoušet, zda je možné tímto způsobem možné zatačít. Pro tento účel posloužila prostá změna výšky závěsu na jedné straně. Na základě pozorování při paraglidingové praxi byl s přihlédnutím k rozměrům modelu stanoven rozdíl výšek závěsů na 100 mm. Tento rozdíl by měl odpovídat maximálnímu rozsahu řízení náklonem v běžném postroji. Změna výšky byla realizována prodloužením popruhu kluzáku pomocí šňůry na pravé straně. Rozdíl byl kvůli nepřesnému navázání konců šňůry 102 mm.

Test probíhal 27.11.2016 v 8:34 na SZ části letového terénu Raná u Loun při větru o směru cca 290°, síle 2 m/s s nárazy okolo 5 m/s. Toto počasí by pro delší lety ve větší výšce vzhledem k výraznému nárůstu síly větru s výškou nebylo vhodné. Pro tento krátký let v nízké výšce však bylo vyhovující. Let probíhal při kompletní vzletové hmotnosti 10,1 kg.

Při letu měl kluzák tendenci stáčet se poměrně výrazně na levou stranu. Zároveň došlo k žádané deformaci střední části kluzáku (zřejmé z obr. 5.1.1.). Bohužel nebylo vzhledem k blízkému terénu možné provést ani kompletní zatačku o 90°. Z rozdílu stažení řidiček potřebnému k udržení přímého letu byla snaha zatačít zřejmá.

Z experimentu bylo usouzeno, že koncepce řízení náklonem je funkční.

5.2. Zkouška pohonné jednotky

Prvotní zkoušení postrádalo letovou fázi. Bylo třeba ověřit, zda je systém oddělení motoru dostatečně spolehlivý. Nejprve bylo zkoušeno oddělení v důsledku momentu sil podle svislé a příčné osy. A dále osách pod úhlem 45° ke svislé a příčné ose. Ve všech případech došlo k odlomení (bez poškození ochranného rámu nebo modelu), ale při poměrně velkém zatížení.

Další zkouška byla tahem v opačném směru, než působí tah vrtule. V tomto případě došlo k oddělení také při poměrně velké síle.

Vzhledem k velkým silám nutným k oddělení a možnosti zvýšení zatížení jiných částí v důsledku dynamiky pohonné jednotky spolu s rotující vrtulí byl průřez nosníků snížen na cca 0,5 – 0,7 násobek původního průřezu. Po tomto opatření byly zkoušky provedeny znovu a nyní byly síly potřebné pro oddělení dostatečně nízké, aby nedošlo jejich vlivem k poškození jiných částí.

Jediné zjištěné namáhání, při kterém by došlo zřejmě nejprve k poškození koše, je působení síly ve směru tahu vrtule a momentem působícím v ose vrtule. Pro tato namáhání má uložení vysokou únosnost kvůli přenosu sil způsobených pohonnou jednotkou. Tyto způsoby nežádoucího namáhání jsou v reálném provozu velmi nepravděpodobné, a proto nebyly dále brány v potaz.

Další zkouškou byla statická zkouška pohonu. Při ní byl zkoušen jeho tah v celém rozsahu včetně prudkých změn i motorové brzdy. Během této zkoušky nedošlo k žádnému poškození ani oddělení kterékoliv součásti.

V následujících testech byla zjišťována schopnost pohonné jednotky udržet model ve vzduchu bez přítomnosti stoupavých proudů a v těchto podmínkách i nastoupat dostatečnou výšku pro provádění manévru bez působícího tahu vrtule.

5.3. Zkouška č. 1

První zkouška s namontovanou pohonnou jednotkou a systémem řízení náklonem proběhla 1.5.2017 na letovém terénu Jevíněves při stabilním proudění o síle cca 4,5 m/s a směru 130°. Zkouška probíhala při kompletní vzletové hmotnosti 11,1 kg, které bylo dosaženo přidáním dvou olověných závaží o celkové hmotnosti 1,9 kg. Bohužel se na letovém terénu nacházeli i další piloti padákových kluzáků. V zájmu zachování bezpečnosti bylo možné provádět obraty maximálně o 180°



Obrázek 5.3.1 Model 1 s před nárazem do terénu.

V rámci tohoto experimentu byla ověřena dostatečná stoupavost a funkčnost zatáčení náklonem. Vzhledem k omezeným možnostem manévrovatelnosti a létání ve stoupavém proudě nebyly naměřeny žádné použitelné číselné výsledky. Navíc došlo chybou pilotáže a omezeného prostoru po prudké zatáčce s kolapsem levé čtvrtiny vrchlíku k prudkému čelnímu nárazu modelu do země. Náraz byl v plné



Obrázek 5.3.2. viditelná deformace paprsku (vpravo dole) ve srovnání s nedeformovaným (vlevo nahoře), viditelné porušení spoje.



Obrázek 5.3.3..deformace obou vnějších kruhů s částečným porušením materiálu.

rychlosti, a navíc v kyvu. Přesto samotný model nebyl téměř poškozen. Došlo pouze k vytržení jednoho žebra, ke kterému bylo připevněno závaží o hmotnosti 1,9 kg. Zřejmě toto žebro při svém pohybu ven z modelu také poškodilo záznamové zařízení s GPS přijímačem. Při takto prudkém nárazu je takto malé poškození velmi pozitivní. Další poškození se týkalo pohonné jednotky. Došlo k deformaci téměř všech částí ochranného rámu a poškození některých jeho spojů. Motor samotný a dokonce ani vrtule nebyly poškozeny. Náraz byl tak silný, že přetrhl velmi pevnou dynamovou šňůru ($\varnothing 1,7\text{mm}$) motoru, která sloužila jako pojistka v případě jeho nechtěného odlomení při letu. Pohonná jednotka byla nalezena cca 7 metrů od modelu. Podle poškození bylo navíc zřejmé, že síla, která deformovala rám působila směrem vpřed, takže tomuto poškození nemohl zabránit ani systém odlamování. Ten nezafungoval ani při sekundárním nárazu, který proběhl zřejmě až při dopadu samotné pohonné jednotky. Její vlastní dynamika byla dostatečná na zdeformování rámu. Hlavní účel rámu, tedy aby nedošlo k poškození motoru, a samotného modelu, byl splněn.

Přesto, že došlo k vážné nehodě, při níž by reálný pilot pravděpodobně utrpěl velmi vážná zranění, byla všechna řešení shledána funkčními. Možností pro zlepšení by bylo použití pevnější slitiny pro výrobu koše. Ta by se ale obtížněji ohýbala. Pokud by byly použity trubky většího průměru, narostl by aerodynamický odpor. Při takto silném nárazu by ani takové řešení pravděpodobně neodolalo poškození. Řešení je v předcházení podobným nehodám spočívající v létání v otevřených, nejlépe rovinných prostorech bez překážek a zejména dalšího provozu.



Obrázek 5.3.4. Připevnění motoru pomocí silentbloku a kontramatice.

Po nehodě byl zhotoven nový rám. Byla pouze mírně posunuta vzad poloha trubek, které drží motor, aby mohly být použity kratší šrouby. Zbytek rámu byl zhotoven shodně s prvním rámem. Spojení mezi rámem a motorem bylo opatřeno silentbloky zhotovenými z hadice navlečené na nosné šrouby, provlečené otvory v držáku motoru a zajištěné kontramaticemi proti povolání.

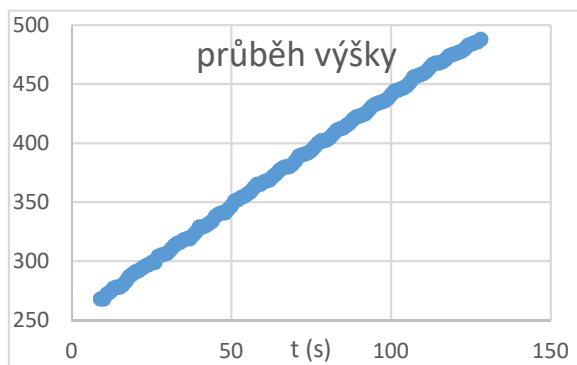
5.4. Zkouška č. 2

Tato zkouška proběhla 14.7.2017 v 7:25 SELČ. Při zemi vál proměnlivý vítr do síly 0,5 m/s. Takto brzy ráno bylo ovzduší velice klidné bez termické aktivity, která by ovlivnila měření. Toto počasí bylo prakticky ideální pro precizní testování klouzavosti. Měření probíhalo při vzletové hmotnosti 11,9 kg. Na motoru byla namontována vrtule s větším stoupáním. Úkolem tohoto experimentu bylo změřit co nejvíce číselných dat pro stanovení rychlosti vůči vzduchu, klouzavosti a stoupavosti.

Start proběhl úspěšně za použití odnímatelného podvozku, přičemž celý start proběhl velice rychle. Při startu došlo k bezproblémovému oddělení podvozku bez následného kontaktu s modelem.

Téměř ihned po startu bylo započato stoupání při plném výkonu motoru. Za 121 s bylo získáno převýšení 221 m. Stoupavost byla spočtena následujícím způsobem.

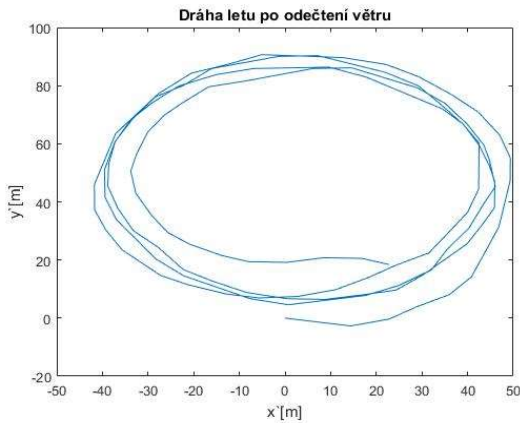
$$v_s = \frac{h}{t} = \frac{220}{119} = 1,85 \text{ m/s} \quad (5.4.1.)$$



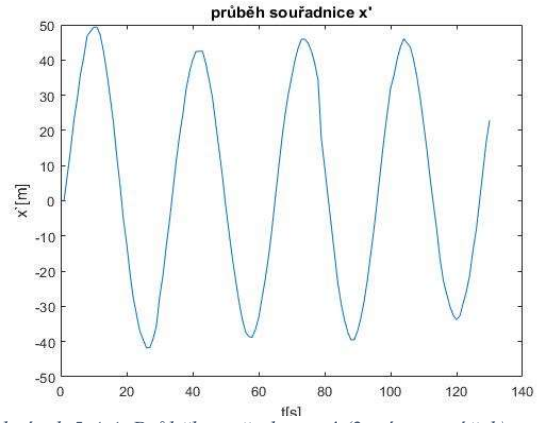
Obrázek 5.4.1. Průběh výšky při stoupání při plném výkonu.

Toto stoupání je zcela dostačující, ale nižší, než požadované při výpočtu výkonu motoru (2,5 m/s). Tento rozdíl byl zřejmě způsoben menší účinností vrtule (relativně malý průměr s větším stoupáním) a využitím motoru pouze na 71% maximálního výkonu.

Po nastoupení dostatečného převýšení pro zkoušení klouzavosti byly provedeny 2 série téměř pravidelných na sebe navazujících zatáček o 360°. První série zatáček byla vykonána pomocí naklánění, druhá pomocí řidiček. U obou sérií byla vypočítána klouzavost a průměrná vzdušná rychlost.



Obrázek 5.4.3. Dráha letu po odečtení vlivu větru (2. série zatáček).



Obrázek 5.4.4. Průběh souřadnice x' (2. série zatáček)

Vzhledem k tomu, že vítr bývá v nízkých výškách zásadně ovlivněn terénem a jeho měření je problematické, byl směr a síla větru získán z naměřených dat pomocí vytvořeného skriptu v programu Matlab 2017 s pomocí programu MS Excel 2016. Nejprve byly GPS souřadnice upraveny na odpovídající souřadnice s jednotkou metr. Poté byly vykresleny grafy vždy pro danou sérii zatáček. Protože pohyb modelu odpovídal vektorovému součtu vzdušné rychlosti a rychlosti větru, měly by po odečtení vektoru větru být získány kruhové trajektorie. Protože rychlost i směr větru byly neznámé, byl vítr rozdělen do souřadnic x a y a poté byly zkoušeny různé hodnoty tak, aby jednotlivé zatáčky byly co nejvíce kruhové a zejména aby byly soustředné. Pro co nejlepší soustřednost byly vykresleny grafy vždy jedné souřadnice v závislosti na čase. Ta by se měla blížit sinusovému průběhu a oscilovat okolo konstantní hodnoty (střed kruhu) Výpočet byl navíc zpřesněn použitím časově (výškově) proměnné síly větru v obou souřadnicích. Jako pomocné byly použity grafy vždy jedné souřadnice a času. Při ideálně kruhové trajektorii je tímto grafem sinus. Bylo sledováno, aby tyto funkce oscillovaly okolo konstantní hodnoty (střed kruhu). Odečet probíhal namísto rychlostí přímo v souřadnicích následujícím způsobem

$$\vec{x}' = \vec{x} - \vec{c}_x \quad (5.4.2.)$$

$$\vec{y}' = \vec{y} - \vec{c}_y \quad (5.4.3.)$$

$$c_i = c_{i-1} + V_{vi} \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (5.4.4.)$$

Po získání nových souřadnic (x' a y'), které odpovídaly letu, který by probíhal v bezvětřném počasí byla vyhodnocena klouzavost a průměrná vzdušná rychlost.

$$g = \frac{s}{h_1 - h_2} \quad (5.4.5.)$$

$$\overline{v_a} = \frac{s \cdot 3,6}{t_2 - t_1} \quad (5.4.6.)$$

Klouzavost pro druhu sérii zatáček byla:

$$g_2 = \frac{1066,65}{513 - 334} = 5,96 \quad (5.4.7.)$$

$$\overline{v_{a2}} = \frac{1066,65 \cdot 3,6}{707 - 578} = 29,8 \text{ km/h} \quad (5.4.8.)$$

Byly vyhodnoceny klouzavosti a průměrné rychlosti v obou sériích zatáček o 360°. V obou případech bylo dosaženo výrazně nižší rychlosti, než odpovídá současným kluzákům kategorie EN - B, přičemž při provádění zatáček pouze pomocí náklonu byla dle očekávání rychlost mírně vyšší. Shoda rychlosti v obou případech poukazuje na správnost odečtení větru.

Dále byla měřena klouzavost v přímém směru, která byla vyhodnocena jako poměr dopředné rychlosti a opadání. Dopředná rychlost byla předpokládána totožná s průměrnou rychlostí (30,9 km/h) při kroužení za pomoci náklonu a rychlosti opadání. Rychlost opadání byla opět brána jako průměrná hodnota ve dvou úsecích (nejprve proti větru, poté po větru). Výsledkem byly 2 různé klouzavosti (g_1 po větru a g_2 proti větru). Tyto dvě klouzavosti byly vyhodnocovány ze stejné dopředné rychlosti a rychlost opadání by se teoreticky také neměla lišit.

$$g_1 = \frac{\frac{\overline{V_a}}{3,6}}{\frac{h_1 - h_2}{t_2 - t_1}} = \frac{\frac{30,9}{3,6}}{\frac{477 - 445}{360 - 337}} = 6,17 \quad (5.4.9.)$$

$$g_2 = \frac{\frac{\bar{V}_a}{3,6}}{\frac{h_2 - h_3}{t_3 - t_2}} = \frac{\frac{30,9}{3,6}}{\frac{428 - 329}{439 - 371}} = 5,90 \quad (5.4.10.)$$

$$\bar{g} = \frac{g_1 + g_2}{2} = 6,04 \quad (5.4.11.)$$

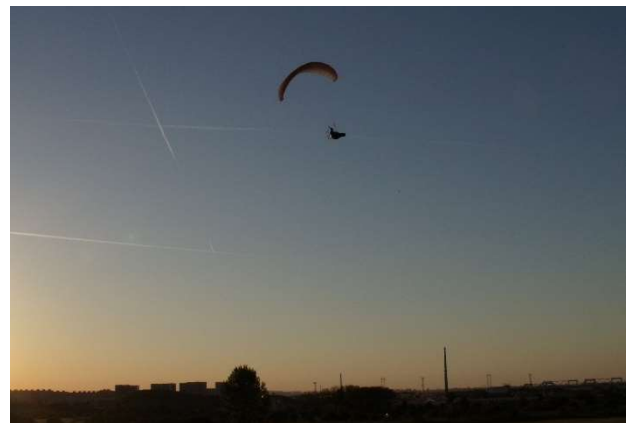
Klouzavosti po i proti větru jsou dle předpokladů málo odlišná čísla. Jejich drobný rozdíl byl zřejmě způsoben tím, že při letu proti větru nebyl dodržen zcela přímý let, což zřejmě způsobilo drobnou změnu opadání. Celková klouzavost v přímém směru byla 6,04.

5.5. Zkouška č. 3

Tato zkouška proběhla 19.6.2017 v 20:32 SELČ. Stále byl poměrně silný vítr severního



Obrázek 5.5.1. Zřejmá deformace při plném použití systému náklonu.



Obrázek 5.5.2. Dostatečný náklon modelu a jeho zatáčení při plném použití systému náklonu.

směru (při zemi vál vítr cca 2,5 m/s s nárazy až cca 5,5 m/s). Vzhledem k tomu, že ve výšce byl vítr ještě silnější a nárazový, nebylo možné provádět série zatáček o 360°, protože by se model příliš rychle vzdálil. Tento let byl proto zaměřen na důkladné vyzkoušení řízení náklonem. Mimo přibrzdění vrchlíku při startu a podrovnání při přistání byly řidičky stále v horní poloze. Systém náklonu dokázal i bez jejich pomoci plně zatáčet na obě strany a provádět kompletní dostatečně prudké zatáčky o 360°. Bylo pořízeno velké množství fotografií, z nichž byly posléze vybrány ty nejvíce vypovídající

5.6. Ostatní zkoušky

Mimo uvedený příklad bylo provedeno několik dalších letů. Při nich byla prováděna stejná měření, jako ve zkoušce č. 2. Zkoušky byly vyhodnocovány stejným způsobem. Pro přehlednost nebyly dále podrobně uváděny, ale shrnuty společně s výsledky rozebrané zkoušky v následující tabulce.

Tabulka 5.1. Přehled měřených letových veličin (do průměru rychlosti a stoupavosti nejsou kvůli odlišné letové hmotnosti započteny dopředné rychlosti a stoupavost z testů ze dne 1.6.2017)

datum testu	kompletní vzletová hmotnost [kg]	klouzavost náklonem [-]	dopředná rychlost při náklonu [km/h]	klouzavost řídičkami [-]	dopředná rychlost pomocí řídiček [km/h]	klouzavost v přímém směru [-]	stoupavost při plném výkonu [m/s]
01.06.2017	11,2			4,98	28,2		1,5
01.06.2017	11,2			6,92	28		
14.07.2017	11,9	5,51	30,9	5,96	29,8	6,04	1,85
17.07.2017	11,9	5,79	32,8	5,75	30,2	6,17	1,83
průměr		5,65	31,9	5,9	30	6,11	1,855

Z tabulky je patrný vliv úprav, které proběhly po první měřené zkoušce ze dne 1.6.2017. Použitím vrtule s větším stoupáním došlo k navýšení stoupavosti. Vlivem zvýšení letové hmotnosti došlo k navýšení dopředných rychlostí.

Klouzavosti získané měřením jsou nižší, než u současných kluzáků kategorie EN – B, pro které bývá klouzavost obvykle 9. Snížení bylo způsobeno tím, že měření probíhalo s namontovanou pohonnou jednotkou zvyšující čelní odpor. Vlivem zatáčení při měření klouzavosti na kruhových trajektoriích dochází ke zvýšení opadání a tím pádem snížení klouzavosti. Navíc mohlo být snížení klouzavosti částečně způsobeno tím, že některé části modelu nejsou zmenšeny v odpovídajícím měřítku (například průměr šňůr musí být kvůli pevnosti relativně větší). Model má také snížený počet komor, což zhoršuje jeho aerodynamické vlastnosti.

V několika případech bylo zjištěno, že systém ochrany vrtule je velmi účinný, pokud se vrtule neotáčí. Pokud se však vrtule otáčí a dojde ke kontaktu s terénem, je velmi snadno poškozena. Při testech byly poškozeny 3 vrtule, a to vždy při startu, kdy se směr letu zcela neshodoval se směrem jízdy podvozku a model z podvozku vyklouzl do strany. Tím došlo ke kontaktu s terénem

a rotaci koše kolem příčné nebo svislé osy. Vrtule při vysokých otáčkách má vlivem gyroskopického momentu snahu zachovávat rovinu rotace. Tím dojde při vychýlení koše k jejímu prohnutí a kontaktu s ochranným rámem. Špatná ochrana vrtule při vyšších otáčkách však zcela koresponduje s motorovými padákovými krosnami. U nich například při pouhém škrtnutí rámem o zem při startu a vysokých otáčkách vrtule dojde zpravidla k jejímu poškození. Odlišnost je zřejmě v tom, že při létání s krosnami má pilot více zpětné vazby a dokáže intuitivněji ovládat vrchlík tak, že je start ukončen dříve, než dojde ke kontaktu ochranného rámu se zemí.

6. Závěr

Byl navrhnut a zrealizován systém řízení náklonem. Ten byl následně otestován a upraven tak, aby věrně napodoboval naklání pilota, ale zároveň byl dostatečně robustní a spolehlivý. Systém po úpravě byl několikrát testován bez jediné poruchy a kluzák s ním velice ochotně a plynule měnil směr letu. Vzhledem k nedostatku vhodných dnů pro testování nebyl systém testován při nestandardních režimech letu.

Dále byl zrealizován systém elektrického pohonu modelu. Ten byl po drobných úpravách shledán zcela funkčním. Je odolný vůči běžným letovým zatížením. Jeho systém oddělení při kontaktu s terénem je taktéž zcela funkční. Použitý koš se systémem odlamování jsou schopny ochránit vrtuli pouze pokud se neotáčí, popřípadě při velmi nízkých otáčkách. Při vyšších otáčkách při kontaktu ochranného rámu s terénem došlo několikrát k poškození vrtule. Ochrana vrtule za obdobných situací by zřejmě spočívala v použití robustnějšího rámu s větší vzdáleností od vrtule. To by ovšem mělo nežádoucí vliv na letové vlastnosti a aerodynamiku modelu. Použití pohonu učinilo testovací lety výrazně jednodušší, bezpečnější, méně náročné na čas a povětrnostní podmínky.

S modelem bylo provedeno několik zkušebních letů, při nichž byly zjišťovány základní letové veličiny (rychlost letu, klouzavost, stoupavost, opadání). Ty byly dle očekávání odlišné od standardních kluzáků. Testy však prokázaly, že systém řízení je plně srovnatelný s reálným kluzákem.

Vhodným navázáním této práce by bylo provedení, změření a zdokumentování různých nestandardních režimů letu. Dále by bylo možné použít řídicí jednotku pro testování zmenšenin nově vyvinutých kluzáků.

7. Použitá literatura

- [1] PLOS, Richard. *Paragliding: moderní učebnice létání s padákovými kluzáky*. Vydání první Cheb: Svět křídel, 2016. ISBN 978-80-87567-88-3.
- [2] DVORÁK, Petr. *Paragliding manuál: pro piloty padákových kluzáků*. Cheb: Svět křídel, 2003. ISBN 80-85280-92-2.
- [3] *Padákový kluzák* [online]. 26-3-2016 [dne 25.2.2017]. Dostupné na: www.cs.wikipedia.org/wiki/Padákový_kluzák
- [4] *Postroje* [online]. [dne 25.2.2017]. Dostupné na: <http://www.advance.ch/es/productos/sillas/>
- [5] *Miniplane Top 80* [online]. [dne 23.2.2017]. Dostupné na: <http://www.abcparagliding.cz/paramotor/>
- [6] *Miniplane Top 80 specifikace motorové padákové krosny* [online]. [dne 23.2.2017]. Dostupné na: http://www.miniplane-usa.com/pages/models_a.htm
- [7] *Miniplane Top 80 motor* [online]. [dne 23.2.2017]. Dostupné na: <http://www.miniplane-usa.com/pages/motor.htm>
- [8] *Inzerát Sky ATIS M* [online]. [dne 23.2.2017]. Dostupné na: <http://www.paragliding-bazar.cz/inzerat/6053-sky-atis-m>
- [9] *E-glider – technická data* [online]. [dne 25.7.2017]. Dostupné na: <http://www.e-glider.com/en/e-glider-technical-data.html>
- [10] PUNČOCHÁŘ, Jan. *Model závěsného kluzáku*. Praha, 2011.

8. Seznam příloh

- {1} Výkres osy systému náklonu
- {2} zkouška 1.6.2017 1.část (zatáčení řídičkami) – Reálná dráha letu.
- {3} zkouška 1.6.2017.1. část (zatáčení řídičkami) – Dráha letu po odečtení větru.
- {4} zkouška 1.6.2017.1. část (zatáčení řídičkami) – Průběh výšky letu.
- {5} zkouška 1.6.2017 2. část (zatáčení řídičkami) – Reálná dráha letu.
- {6} zkouška 1.6.2017.2. část (zatáčení řídičkami) – Dráha letu po odečtení větru.
- {7} zkouška 1.6.2017.2. část (zatáčení řídičkami) – Průběh výšky letu.
- {8} zkouška 14.7.2017 1. část (zatáčení náklonem) – Reálná dráha letu.
- {9} zkouška 14.7.2017 1. část (zatáčení náklonem) – Dráha letu po odečtení větru.
- {10} zkouška 14.7.2017 1. část (zatáčení náklonem) – Průběh výšky letu.
- {11} zkouška 17.7.2017 1. část (zatáčení náklonem) – Reálná dráha letu.
- {12} zkouška 17.7.2017 1. část (zatáčení náklonem) – Dráha letu po odečtení větru.
- {13} zkouška 17.7.2017 1. část (zatáčení náklonem) – Průběh výšky letu.
- {14} zkouška 17.7.2017 2. část (zatáčení řídičkami) – Reálná dráha letu.
- {15} zkouška 17.7.2017 2. část (zatáčení řídičkami) – Dráha letu po odečtení větru.
- {16} zkouška 17.7.2017 2. část (zatáčení řídičkami) – Průběh výšky letu.