



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh startovacího zařízení pro malý
bezpilotní letoun do vzletové hmotnosti 5 kg**

**Design of UAV launcher for maximum
takeoff weight of aircraft 5 kg**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Ondřej UHER

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Uher** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459651**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh startovacího zařízení pro malý bezpilotní letoun do vzletové hmotnosti 5kg

Název bakalářské práce anglicky:

Design of UAV launcher for maximum takeoff weight of aircraft 5kg.

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Analýzu stávajících konstrukčních řešení
- 2) Konstrukční návrh startovacího zařízení pro letoun o startovací hmotnosti 5 kg
- 3) Zpracujte 3d model zvolené varianty
- 4) Pevnostní kontrolu hlavních konstrukčních prvků

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D., ústav letadlové techniky FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh startovacího zařízení pro malý bezpilotní letoun do vzletové hmotnosti 5kg“ vypracoval samostatně pod vedením Ing, Ivana Jeřábka, Ph.D. s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

.....
V Praze dne

.....
Ondřej Uher

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Ivanu Jeřábkovi, Ph.D., za cenné rady, veškerou pomoc a dobrou náladu. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a přítelkyni za podporu.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Ondřej Uher
Název BP: Návrh startovacího zařízení pro malý bezpilotní letoun do vzletové hmotnosti 5 kg
Anglický název: Design of UAV launcher for maximum takeoff weight of aircraft 5 kg
Rok: 2018
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav: Ústav letadlové techniky
Vedoucí BP: Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D.
Konzultant: Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D.
Bibliografické údaje: počet stran 59
počet obrázků 36
počet tabulek 17
počet příloh 5
Klíčová slova: bezpilotní letoun, start, startovací zařízení, UAV
Keywords: UAV, launcher, launching device.
Anotace: Tato bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukce startovacího zařízení pro bezpilotní letoun do vzletové hmotnosti 5 kg.
Abstract: This bachelor thesis deals with the design of UAV launcher for maximum takeoff weight of aircraft 5 kg.

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování.....	4
Anotační list	5
1 Úvod.....	9
1.1 Bezpilotní letoun (UA).....	10
1.2 Klasifikace UAS.....	10
2 Definice vstupních parametrů startovacího zařízení.....	11
2.1 Zástupci kategorie Mini kolem 5kg.....	11
2.1.1 RQ-11B Raven	11
2.1.2 Skylark I LE	12
2.1.3 EMT Aladin.....	12
2.1.4 RQ-20B Puma AE.....	13
2.1.5 Bayraktar Mini UAS	13
2.1.6 Blackstart	14
2.1.7 LEVIATHAN.....	14
2.2 Rozbor parametrů uvažovaných letounů.....	15
2.2.1 Maximální startovací hmotnost	15
2.2.2 Maximální rozměry letounu	15
2.2.3 Připojovací rozměry	15
2.2.4 Délka startu.....	15
2.2.5 Řízení a stabilizace letounu při startu	15
2.2.6 Shrnutí požadavků letounu.....	15
3 Analýza stávajících konstrukčních řešení.....	16
3.1 Start hodem z ruky.....	16
3.2 Start s využitím startovacího zařízení.....	16
3.2.1 Pneumatické	16
3.2.2 Hydraulicko-pneumatické.....	17
3.2.3 S pružným členem.....	17
3.2.4 Využívající výmetnici nebo raketu.....	18
3.2.5 Parazitní systémy	18
3.3 Zhodnocení stávajících řešení startovacího zařízení.....	19

4	Konstrukční návrh startovacího zařízení.....	20
4.1	Požadavky na konstrukci startovacího zařízení	20
4.1.1	Výpočet energie	20
4.1.2	Shrnutí parametrů startovacího zařízení.....	21
4.2	Koncepční návrh s pružnými listy.....	22
4.2.1	Popis návrhu	22
4.2.2	Hodnocení návrhu.....	22
4.3	Koncepční návrh s pružným lanem	23
4.3.1	Popis návrhu	23
4.3.2	Hodnocení návrhu.....	23
4.4	Koncepční návrh využívající výmetnici	24
4.4.1	Popis návrhu	24
4.4.2	Hodnocení koncepce.....	25
4.5	Vyhodnocení a výběr vhodného koncepčního návrhu.....	25
4.6	Konstrukční návrh optimální varianty	26
4.6.1	Popis funkce startovacího zařízení.....	30
5	Pevnostní kontrola hlavních prvků	31
5.1	Definice hlavních konstrukčních prvků	31
5.2	Výpočet potřebné a celkové tuhosti pružného lana	31
5.3	Výpočet ložiska vodící kladky	33
5.3.1	Výpočet axiální síly	33
5.3.2	Výpočet radiální síly	35
5.3.3	Výpočet ekvivalentního zatížení a základní dynamické únosnosti ložiska	36
5.4	Výpočet ložiska přední kladky	37
5.5	Kontrola vodících trubek	39
5.5.1	Výpočet zatížení trubek.....	39
5.6	Silové poměry ve spoušťovém mechanismu	42
5.6.1	Západka	42
5.6.2	Vačka	43
5.6.3	Táhlo.....	44
5.6.4	Spoušť.....	45
5.7	Kontrola západky	46

5.7.1	Kontrola na smyk (střih)	46
5.7.2	Kontrola na otlačení díry	47
5.8	Kontrola spouště.....	48
5.9	Kontrola čepu spouště	48
5.9.1	Zatížení čepu	48
5.9.2	Kontrola čepu na ohyb	49
5.9.3	Kontrola čepu na smyk (střih).....	49
5.10	Kontrola serva.....	50
6	Závěr	51
7	Zdroje.....	52
8	Seznam obrázků	54
9	Seznam tabulek	55
10	Seznam zkratk a symbolů	56
11	Seznam příloh.....	58

1 Úvod

Cílem této práce je návrh startovacího zařízení pro malý bezpilotní letoun do vzletové hmotnosti 5 kg. Pro to bude třeba provést rešerši letounů pro stanovení dalších vstupních parametrů startovacího zařízení. Z analýzy stávajících konstrukčních řešení startovacích zařízení budou vybrány dvě nejlepší koncepce a vypracovány tři koncepční návrhy. Z těchto návrhů bude vybrán ten nejlepší, který bude dále rozpracován do 3D modelu. Detailní rozpracování této varianty bude popsáno, včetně podrobného popisu funkce celého zařízení. U této varianty budou definovány hlavní součásti, které budou pevnostně zkontrolovány. Následně bude zpracována výkresová dokumentace tří hlavních sestav zařízení.

Motivací pro tuto práci je přinést řešení startu převážně průzkumných bezpilotních letounů v krizových situacích, kdy není možné letoun startovat hodem z ruky. Zařízení musí být lehké a malé, aby se dalo přenášet spolu s další výstrojí. Zařízení je myšleno převážně pro využití ozbrojenými silami či záchrannými složkami.

1.1 Bezpilotní letoun (UA)

„Bezpilotní letoun (UA) je letadlo určené k provozu bez pilota na palubě (může se jednat a většinou se jedná o součást bezpilotního systému). V kontextu legislativního rámce České republiky se za bezpilotní letadla považují všechna bezpilotní letadla s výjimkou modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 20 kg.“[1] Setkáváme se se zkratkou UAV (unmanned aerial vehicle), jejíž význam je stejný jako zkratky UA (unmanned aircraft). Ačkoliv UA je používána českým úřadem pro civilní letectví, bude dále užívána zažitá zkratka UAV.

Dále se setkáváme se zkratkou UAS (unmanned aerial system), což je ucelený systém sestávající ze samotného letounu (UAV), pozemní stanice a zařízení pro start a přistání (v případě, že jsou potřeba).

1.2 Klasifikace UAS

Třída	Kategorie	Operační výška	Dolet	Zástupci
Třída I - do 150 Kg	Malé - nad 20 Kg	1500 m	50 Km	Luna
	Mini - do 20 Kg	1000 m	25 km	Scan Eagle
	Mikro - pod 2 Kg	60 m	5 Km	Wasp III
Třída II - do 600 Kg	Taktické	3 000 m	200 Km	Sperwer
Třída III - nad 600 Kg	Bojové/ útočné	20 000 m	Bez omezení	Boeing X-45
	MALE	20 000 m		Global Hawk
	HALE	14 000 m		Predator

Tab. 1 Dělení UAS podle NATO. Září 2009 [2]

V tabulce (Tab. 1) je uvedeno dělení UAS dle NATO dohod září 2009. Z té plyne, že navrhované zařízení bude používáno pro letouny spadající do první třídy, do kategorie Mini.

2 Definice vstupních parametrů startovacího zařízení

Maximální startovací hmotnost letounu je definována v zadání práce limitem 5 kg. Zařízení bude používáno pro start letounu spadající do první třídy, kategorie Mini dle ustanovení NATO (viz Tab. 1). Pro doplnění parametrů startovacího zařízení, které nejsou definovány v zadání práce, je provedena rešerše letounů ve zmíněné kategorii.

2.1 Zástupci kategorie Mini kolem 5kg

2.1.1 RQ-11B Raven

Bezpilotní letoun z USA, který je v současnosti využíván i českou armádou. Jedná se o hornoplošník v uspořádání s tlačnou vrtulí umístěnou mimo osu trupu. Pohon je zajištěn elektromotorem. Startuje hodem z ruky.

Rozpětí [mm]	1400
Délka [mm]	900
Hmotnost [kg]	1,9
Minimální rychlost [km/h]	32

Tab. 2 Hlavní parametry RQ-11B Raven [3]



Obr. 1 RQ-11B Raven [4]

2.1.2 Skylark I LE

Izraelský UAV rovněž využívaný českou armádou je koncipován jako hornoplošník s velkou trupovou gondolou zavěšenou pod štíhlým trupem. Pohon je řešen elektromotorem s tažnou vrtulí. Startuje pomocí pružného lana.

Rozpětí [mm]	2000
Délka [mm]	1300
Hmotnost [kg]	5,4
Minimální rychlost [km/h]	≈40

Tab. 3 Hlavní parametry Skylark I LE [5]



Obr. 2 Skylark I LE [6]

2.1.3 EMT Aladin

Bezpilotní letoun původem z Německa, využíván hlavně německou armádou. Letoun je řešen jako hornoplošník s tažnou vrtulí vysunutou před trup. Startuje hodem z ruky nebo pomocí katapultu využívající pružného lana.

Rozpětí [mm]	1460
Délka [mm]	1570
Hmotnost [kg]	4
Minimální rychlost [km/h]	45

Tab. 4 Hlavní parametry EMT Aladin [7]



Obr. 3 EMT Aladin [8]

2.1.4 RQ-20B Puma AE

Je bezpilotní letoun z USA využívaný mimo jiné také švédskou armádou. Letoun má klasickou koncepci hornoplošníku s motorem vpředu a tažnou vrtulí. Startuje hodem z ruky nebo z katapultu.

Rozpětí [mm]	2800
Délka [mm]	1400
Hmotnost [kg]	6,3
Minimální rychlost [km/h]	47

Tab. 5 Hlavní parametry RQ-20B Puma AE[9]



Obr. 4 RQ-20B Puma AE [10]

2.1.5 Bayraktar Mini UAS

Systém původem z Turecka, kde ho využívá místní armáda. Letoun je koncipován jako hornoplošník s tlačnou vrtulí umístěnou za křídlem. Startuje hodem z ruky a přistává pomocí padáku.

Rozpětí [mm]	2000
Délka [mm]	1200
Hmotnost [kg]	5
Minimální rychlost [km/h]	40

Tab. 6 Hlavní parametry Bayraktar Mini UAS[11]



Obr. 5 Bayraktar Mini UAS [12]

2.1.6 Blackstart

Pochází z Velké Británie. Letoun využívá koncepce samokřídla s motorem vpředu a tažnou vrtulí. Startuje hodem z ruky.

Rozpětí [mm]	1500
Délka [mm]	980
Hmotnost [kg]	4
Minimální rychlost [km/h]	43

Tab. 7 Hlavní parametry Blackstart[13]



Obr. 6 Blackstart [14]

2.1.7 LEVIATHAN

LEVIATHAN je produkt americké firmy Piora. Letoun má klasické uspořádání s tažnou vrtulí a motorem vpředu. Startuje hodem z ruky.

Rozpětí [mm]	2600
Délka [mm]	1150
Hmotnost [kg]	5,9
Minimální rychlost [km/h]	40

Tab. 8 Hlavní parametry LEVIATHAN[15]



Obr. 7 LEVIATHAN [16]

2.2 Rozbor parametrů uvažovaných letounů

2.2.1 Maximální startovací hmotnost

Maximální startovací hmotnost 5 kg je definována v zadání práce. Pro další návrh bude uvedený parametr považován za limitní.

2.2.2 Maximální rozměry letounu

Na základě provedené rešerše letounu spadající do kategorie Mini dle NATO (viz Tab. 1) bylo definováno maximální rozpětí startujícího letounu na 2 000 mm a délka letounu 1500 mm.

2.2.3 Připojovací rozměry

Parametr zajišťuje vzájemnou kompatibilitu mezi letounem a startovacím zařízením. Standardně je letoun uložen při startu v pojízdné kolébce, která vykonává pohyb s ním a která se na konci pojezdu zastaví. Kolébka se opírá o odtokovou hranu nebo o trup. Při konstrukčním návrhu bude uvažováno s připojovacím zařízením tlačného charakteru do tvaru písmene U nebo do tvaru otevřeného písmene V. Maximální šířka letounu pro připojení na startovací zařízení je 100 mm.

2.2.4 Délka startu

Z rozboru vyplynulo, že letouny v uvažované kategorii jsou startovány hodem z ruky. To znamená, že rychlost startu je poměrně nízká (kolem 11,4 m/s) a zrychlení při startu, závislé na schopnostech obsluhy, je také nízké. Bezprostředně po startu je třeba zajistit dostatek prostoru pro získání letové rychlosti a stoupání. Předpokládá se, že letoun bude startovat pod úhlem 5°-15°. Optimální startovací úhel letounu bude řešen stavitelným členem na startovacím zařízení.

2.2.5 Řízení a stabilizace letounu při startu

Letoun startuje ve startovací konfiguraci, tzn. že bezprostředně po startu je možné využít všech ovládacích prvků. Během startu je možno pro urychlení letounu využít pohonu. Pro řízení letounu během startu se předpokládá využití standardních funkcí startovaného letounu. Startovací zařízení nebude obsahovat žádnou elektroniku ani mechanismy pro úpravu letových vlastností stroje během startu

2.2.6 Shrnutí požadavků letounu

Ze startovacího zařízení bude startovat bezpilotní letoun s maximální vzletovou hmotností 5 kg, o maximálním rozpětí 2000 mm a maximální délce 1500 mm. K samotnému zařízení bude připojen přes připojovací modul tlačného charakteru a uložen bude v menší kolébce díky tvaru trupu do písmene U nebo V o šířce 100 mm. Délka dráhy po kterou bude letoun urychlován startovacím zařízením, bude 1000 mm. Délka dráhy odpovídá hodu z ruky v závislosti na vzrůstu uživatele.

Hmotnost	5 kg
Rozměry	Max. rozpětí 2000 mm, max. délka 1500 mm
Připojovací rozměry	Tlačný modul, trup do U nebo V, max. šířka 100 mm
Délka startu	1000 mm
Řízení a stabilizace	Autopilotem po celou dobu

Tab. 9 Požadavky letounu na startovací zařízení

3 Analýza stávajících konstrukčních řešení

3.1 Start hodem z ruky

U většiny malých bezpilotních systémů většinou do vzletové hmotnosti 4 kg, ojediněle do 7 kg, se využívá start hodem z ruky. Během startu musí být letadlo již ve startovací konfiguraci. Hlavní výhodou uvedeného řešení je, že není třeba žádné další příslušenství kromě letounu samotného. Na druhou stranu, velkou nevýhodou je nutnost bezpečného okolí, protože osoba, která startovací úkon provádí, je po celou dobu startu odkryta a obvykle ve vzpřímené pozici. Dále je vyžadován určitý trénink v samotném hodu, aby nedošlo k nehodě, zranění obsluhy nebo ohrožení lidí či majetku v okolí.

3.2 Start s využitím startovacího zařízení

Startovací zařízení lze dělit podle mnoha parametrů. V předkládané práci bude použito dělení podle zdroje energie, která je použita pro urychlení letounu při startu na:

- pneumatické
- hydraulicko-pneumatické
- s pružným členem
- využívající výmetnici nebo raketu
- parazitní systémy.

3.2.1 Pneumatické

Zdrojem energie je stlačený pracovní plyn, obvykle okolní vzduch v akumulátoru, který je přes ventil spojen s pístem. K pístu je přichycena kolébka pro letoun. Po otevření ventilu plyn prudce zvětší svůj objem a tím se urychlí píst spojený s letounem. Výhodou je možnost nastavení širokého rozsahu rychlostí a zrychlení podle tlaku v akumulátoru, nižší hmotnost v porovnání s hydraulickými zařízeními. Nevýhodou jsou rozměry a nutnost přítomnosti kompresoru a tím i přívodu elektrické energie.



Obr. 8 Pneumatický katapult[17]

3.2.2 Hydraulicko-pneumatické

Pracovní ústrojí se stává z pístu a válce. Nad válec se tlačí pracovní olej a ten stlačuje plyn pod pístem. Na výstupu oleje je umístěn hydro motor a na něm naviják, v okamžiku startu je otevřen ventil a plyn pod pístem tlačí olej, který roztočí motor a ten navíjí lanko, které je spojeno, buď pevně se startovací kolébkou nebo přímo s letounem. Výhodou je možnost startování větších letounů, díky vyššímu tlaku a nastavení průběhu zrychlení. Nevýhodou však je vysoká hmotnost kapaliny a nutnost motoru pro pohon kompresoru a tím pádem přívodu elektrické energie.



Obr. 9 Hydraulicko-pneumatický katapult [18]

3.2.3 S pružným členem

Startovací systémy jsou ve většině případů praky nebo samostřily, využívající energii naakumulovanou buď v listu kuše nebo v pružném laně. Tento princip je vhodný spíše pro menší letouny. Aby měl dostatečnou energii pro větší letoun, samotné startovací zařízení by narostlo do obřích rozměrů. Výhodou je nízká hmotnost, a fakt, že k natažení je většinou dostačující pouze síla posádky, zajišťující start., popřípadě jednoduchý mechanismus např. vrátek. Nevýhodou je závislost průběhu zrychlení na tuhosti pružného členu. Také se musí konstrukčně řešit doraz vozíku.



Obr. 10 Prak [19]

3.2.4 Využívající výmetnici nebo raketu

Některá UAV využívají ke startu výbušnou výmetnici, případně využívají tzv. asistovaného startu pomocí přídatné rakety, která je nejčastěji po startu odhozena. Raketa bývá obvykle jednorázová na tuhé palivo a po vyhoření paliva je odhozena. Hlavní výhodou řešení je kompaktnost a prostorová nenáročnost jak na zařízení, tak i na samotný úkon startu. Nevýhodou je vysoké zrychlení, a tudíž zvýšené nároky na konstrukci samotného letounu. V některých případech je nevýhodou i velký hluk a kouř.



Obr. 11 Startovací zařízení s výmetnicí [20]

3.2.5 Parazitní systémy

Principem těchto systémů je využití rychlosti jiného pohybujícího se prostředku. V základě se vyskytují 2 provedení:

- Automobil, který má na střešních ližinách přidělané zařízení umožňující start bezpilotního letounu po dosažení dostatečné rychlosti.
- UAV vypouštěné z letících letadel či vrtulníků.

Výhodou prvního řešení jsou nízké náklady na samotné startovní zařízení a jeho konstrukční jednoduchost. V druhém případě je hlavním pozitivem výška, rychlost a možnost vypuštění již v cílovém operačním prostoru. Nevýhodou může být právě rychlost mateřského letounu nebo úplav mateřského nosiče (proud zvířeného vzduchu za letounem, či pod vrtulníkem).



Obr. 12 Parazitní zařízení [21]

3.3 Zhodnocení stávajících řešení startovacího zařízení

Na základě výše uvedeného rozboru je patrné, že pneumatické systémy mají výhodu ve hmotnosti a nastavitelnosti, ale vyžadují zdroj tlakového vzduchu. Hydraulicko-pneumatické systémy dosahují největších výkonů a jsou schopny startovat letouny do vzletové hmotnosti až 600kg, ale potřebují zdroj energie a mají velkou hmotnost. Zařízení využívající pružného členu se na druhou stranu vyznačují nízkou hmotností, rozměry a v neposlední řadě také jednoduchostí, jejich nevýhodou je nemožnost nastavení a nutnost mechanického dorazu. Systémy využívající výmetnice jsou z hlediska rozměrů a hmotnosti nejušpornější. Maximální zrychlení a rychlost při startu se obtížně mění a tomu je třeba přizpůsobit konstrukci letounu samotného. U parazitních řešení startovacích zařízení je obrovskou nevýhodou nutnost dalšího prostředku a prostoru na dosažení požadované rychlosti.

Hodnotící parametry: Prostorová náročnost, konstrukční náročnost, opakovatelnost startu, hmotnost.

Hodnotící stupnice:

- -1 nevyhovující
- 0 dostatečné
- 1 vhodné

	Pneumatické	Hydraulické	Pružný člen	Výmetnice	Parazitní
Prostorová náročnost	0	-1	1	1	-1
Konstrukční náročnost	0	-1	1	0	1
Opakovatelnost	0	0	1	0	1
Hmotnost	-1	-1	1	1	-1
Celkem	-1	-3	4	2	0

Tab. 10 Hodnotící tabulka stávajících koncepcí

Z hodnotící tabulky (Tab. 10), tedy vyplývá, že nevhodnější je koncepce využívající pružný člen. Druhý v pořadí je koncept s výmetnicí.

4 Konstrukční návrh startovacího zařízení

V této kapitole budou určeny požadavky na samotné zařízení a vypracovány tři koncepční návrhy, dva využívající pružného členu a jeden s výmetnicí. Následně z nich bude vybrán nejvhodnější, který bude dále detailně rozpracován.

4.1 Požadavky na konstrukci startovacího zařízení

Z důvodů optimalizace celého zařízení z hlediska hmotnosti a transportních rozměrů, je hlavním požadavkem kompaktnost celého systému a nízká hmotnost. Je předpokládána manipulace celého systému pomocí jedné až dvou osob, to znamená, že maximální rozměry ve složeném stavu by neměly přesáhnout rozměry letounu. Dalším požadavkem systému je možnost autonomního startu neboli startu bez přímé interakce obsluhy. Ta se pohybuje v okolí do 2 km a start proběhne díky bezdrátovému signálu či v přednastaveném čase. Proto je nutné, aby startovací zařízení dokázalo v rozloženém stavu samo stát a poskytlo během startu dostatečně stabilní a tuhou základnu. Z důvodu úspory hmotnosti a tuhosti, budou hlavní strukturální díly vyrobené z kompozitových materiálů (především kompozit s uhlíkovou výztuží a epoxidovou matricí) a obráběných dílů ze slitin kovů.

4.1.1 Výpočet energie

Z provedeného rozboru a rešerše v kapitole 2.0 vyplývá, že průměrná minimální rychlost v je 41 km/hod resp. 11,4 m/s. Hmotnost letounu m_{letoun} je definována zadáním 5 kg. Odpor letounu je po dobu startu kompenzován motorem. Kinetická energie letounu E_k je vypočtena vztahem 1.1:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_{letoun} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 11,4^2 = 324,9 J \approx 325 J \quad 1.1$$

Výška h 3 m byla odhadnuta jako bezpečná výška pro start v neideálních podmínkách např. potřeba startovat přes zeď či menší strom. Potenciální energie E_p je vypočtena vztahem 1.2, kde g je gravitační zrychlení:

$$E_p = m_{letoun} \cdot g \cdot h = 5 \cdot 9,81 \cdot 3 = 147,15 J \approx 148 J \quad 1.2$$

Celková energie E_c , kterou musí zařízení dodat letounu, aby zrychlil na požadovanou rychlost a získal odhadnutou výšku, se rovná součtu potenciální energie E_p a kinetické energie E_k :

$$E_c = E_k + E_p = 325 + 148 = 473 J \quad 1.3$$

4.1.2 Shrnutí parametrů startovacího zařízení

Požadované parametry startovacího zařízení jsou shrnuty (viz Tab. 11).

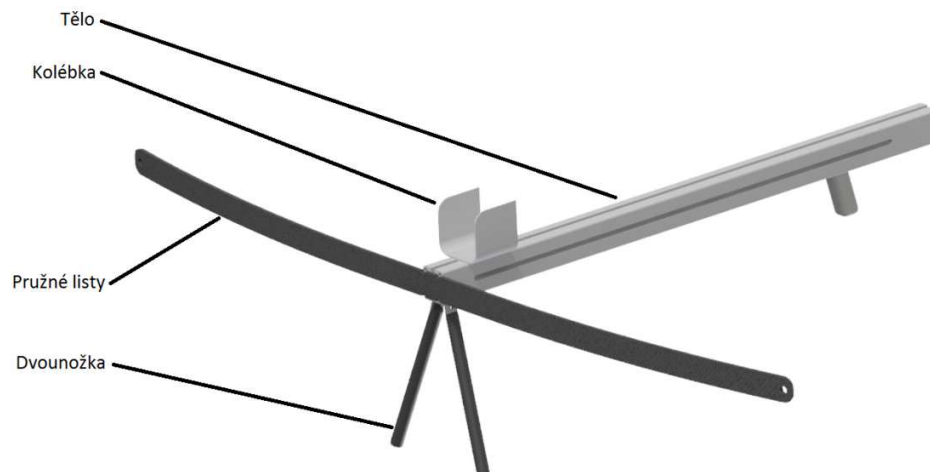
Šířka	500 mm
Délka	1500 mm
Hmotnost	Optimalizační parametr
Připojovací rozměry	Kompatibilní tlačným modulem, kolébka
Energie	473 J
Startovací rychlost	11,4 m/s

Tab. 11 Přehled požadovaných parametrů startovacího zařízení

4.2 Konceptní návrh s pružnými listy

4.2.1 Popis návrhu

Navržené zařízení je samostříl či kuše využívající energii akumulovanou v pružných listech. Listy se ohýbají tahem za tětivu, která je spojuje. Uprostřed tětivy je připevněna kolébka (Obr. 13), do které se ukládá letoun, jehož háček se opře o čelo kolébky. Kolébka je vyrobena buď jako hliníkový svařenec, nebo je odlaminována z uhlíkového kompozitu. Kolébka se pohybuje v drážce, která ji směrově vede. Ve spodní části kolébky je žebro, ve kterém je v přední části otvor pro tětivu a v zadní části otvor pro natahovací mechanismus. Ve spouštěcím mechanismu se zachytí tětiva samotná, nikoliv kolébka. Součástí celého vypouštěcího systému je také dvounožka z důvodu nutnosti ustavit celé zařízení pro autonomní start i usnadnění obsluhy. Z důvodu dodržení dráhy startu 1000 mm je celé zařízení rozměrné. Šířka je 1849 mm a délka je 1208 mm. Parametry zařízení (viz Tab. 12), celý koncept (viz Obr 13).



Obr. 13 Koncept samostřílu

Šířka	1849 mm
Délka	1208 mm
Výška*	260 mm
Hmotnost	≈6 Kg

Tab. 12 Hlavní parametry konceptního návrhu s pružnými listy

* Výška je udávána ve stavu se složenou dvojnóžkou

4.2.2 Hodnocení návrhu

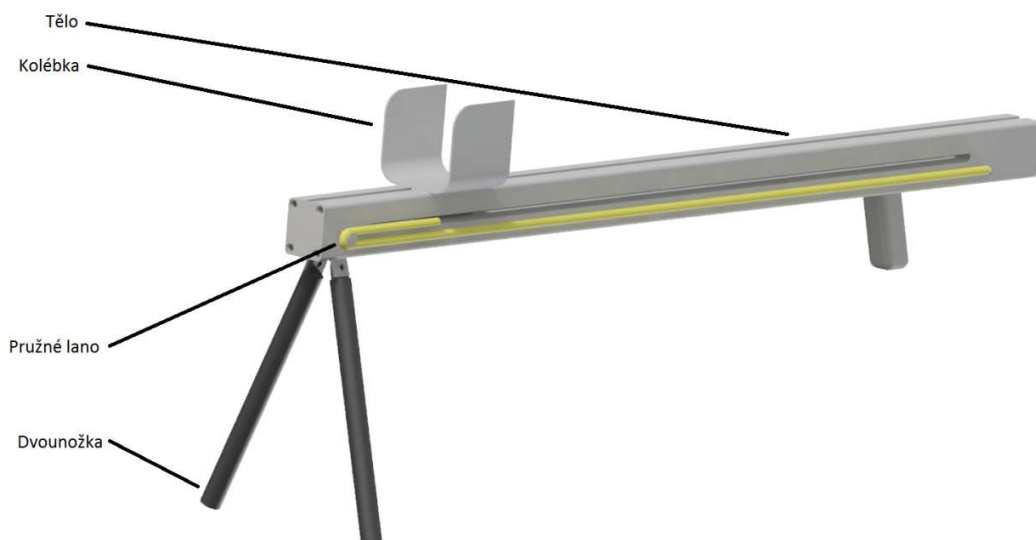
Celé zařízení je konstrukčně jednoduché, ačkoliv z důvodů větších transportních rozměrů by bylo vhodné vyřešit jeho složení do kompaktnější formy. To se ale negativně projeví na době, která je potřeba na přípravu zařízení před startem letounu. Skládací mechanismus by se také negativně projevil na

celkové hmotnosti celého systému. Síla potřebná k natažení by mohla vyžadovat přidavné natahovací zařízení.

4.3 Koncepční návrh s pružným lanem

4.3.1 Popis návrhu

Navržená koncepce je velice podobná komerčně nabízeným řešením. Využívá pryžové lano, které je přes kladku natahováno. Lano je průběžné a skrz kolébku vede v jednom kuse. Před natažením je lano lehce předepjaté, aby dodávalo energii po celou dráhu. V důsledku předpětí je nutný doraz. Háček letounu se pohybuje v drážce, kde ho tlačí díl, kterým prochází pružné lano. Kolébka nebo díl, jímž prochází lano, slouží také pro zajištění nataženého mechanismu ve spoušti. Šířka navrženého zařízení je 106 mm a délka je 1202 mm. Parametry zařízení (viz Tab. 13), celý koncept (viz Obr 14).



Obr. 14 Koncept s pružným lanem

Šířka	106 mm
Délka	1202 mm
Výška*	260 mm
Hmotnost	≈5,5 Kg

Tab. 13 Hlavní parametry konceptního návrhu s pružným lanem

* Výška je udávána ve stavu se složenou dvojnožkou

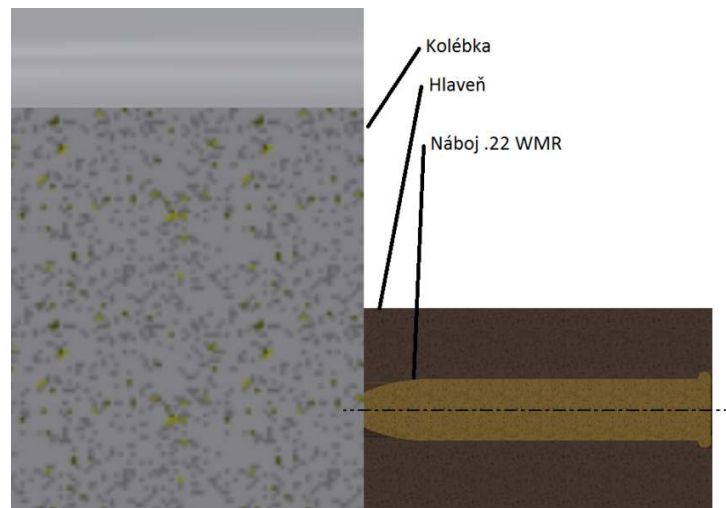
4.3.2 Hodnocení návrhu

Hlavní nevýhodou této koncepce je pružné lano, které trpí UV degradací a postupem času pryž zpuchří a bude potřeba ji vyměnit. Pružné lano je však také výhodné z hlediska minimalizace rozměrů.

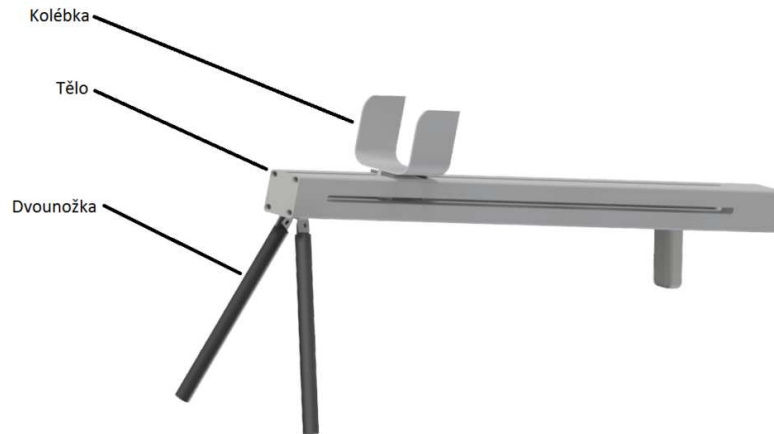
4.4 Konceptní návrh využívající výmetnici

4.4.1 Popis návrhu

Systém využívá energii z hoření či výbuchu. V kapitole 4.1.1 byla vypočtena minimální energie 473 J, potřebná k tomu, aby letoun dosáhl minimální rychlosti a výšky. Z dostupných typů výmetnic a nábojů byl vybrán náboj .22 WMR, což je náboj ráže 5,7 mm. Hmotnost kulky je 2,6g. Celková energie uvedeného náboje je 480 J [22]. Start je uskutečněn odpálením náboje. Kolébka se musí dotýkat kulky, aby bylo zamezeno rázu, který by vznikl při nárazu kulky do kolébky. Detail (viz Obr. 15). Aby nedocházelo ke ztrátám energie třením kolébky o tělo, je nutné užít valivá ložiska, což se negativně projeví na hmotnosti. Tato koncepce je konstrukčně složitá a vyžaduje větší množství přesně obrobenech dílů. Šířka navrženého zařízení je 106 mm a délka je 1202 mm. Parametry zařízení (viz Tab. 12), celý koncept (viz Obr. 16).



Obr. 15 Schéma uspořádání pro start



Obr. 16 Koncept s nábojem

Šířka	106 mm
Délka	1202 mm
Výška*	270 mm
Hmotnost	≈6 Kg

Tab. 14 Hlavní parametry koncepčního návrhu s výmetnicí

* Výška je udávána ve stavu se složenou dvojnožkou

4.4.2 Hodnocení koncepce

Hlavní nevýhodou je konstrukční náročnost, větší počet přesně obrobených dílů, vyšší hmotnost v porovnání s předchozími koncepcemi a nutnost přebít nový náboj po každém startu. Výhodou je, minimum času a úsilí pro uvedení zařízení do stavu před startem.

4.5 Vyhodnocení a výběr vhodného koncepčního návrhu

Z předchozího rozpracování jednotlivých koncepcí jsou známy jejich výhody a nevýhody. Přehled parametrů všech koncepcí (viz Tab. 15). Nejvhodnější je koncepčního návrhu s pružným lanem z důvodů nejmenších rozměrů a hlavně hmotnosti. Další výhodou je, že není potřeba skládacího mechanismu jako u návrhu s pružnými listy nebo většího množství přesných dílů jako u návrhu s výmetnicí.

Koncepce	Pružné listy	Pružné lano	Výmetnice
Šířka	1849 mm	106 mm	106 mm
Délka	1208 mm	1202 mm	1202 mm
Výška	260 mm	260 mm	270 mm
Hmotnost	≈6 Kg	≈5,5 Kg	≈6 Kg

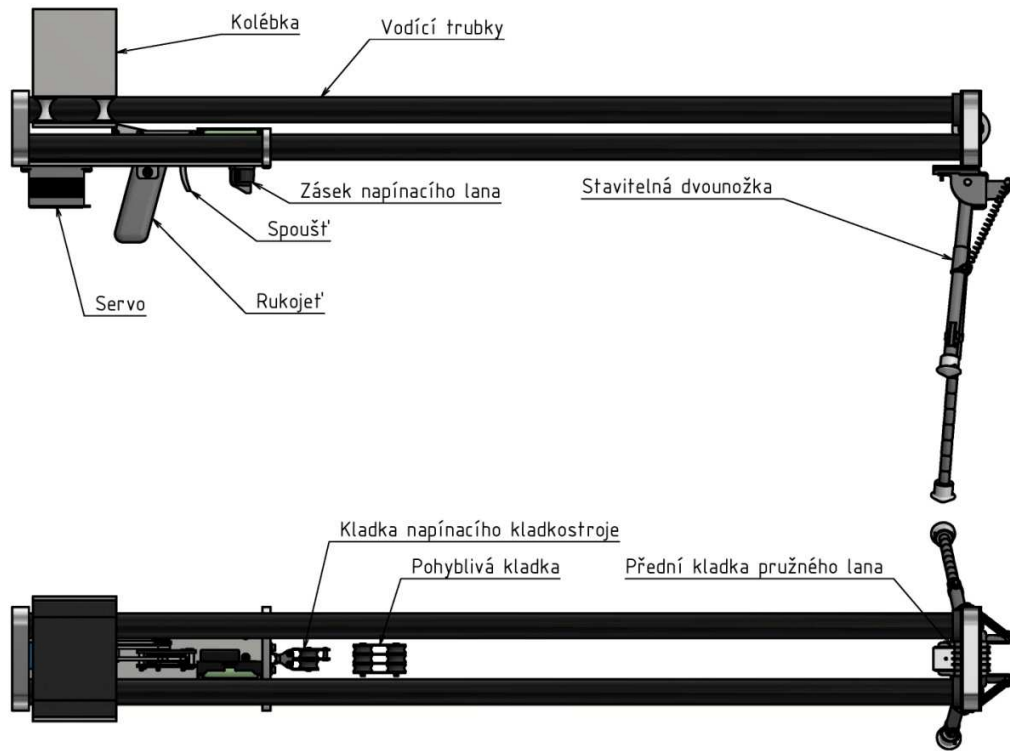
Tab. 15 Porovnání hlavních parametrů všech koncepcí

4.6 Konstrukční návrh optimální varianty

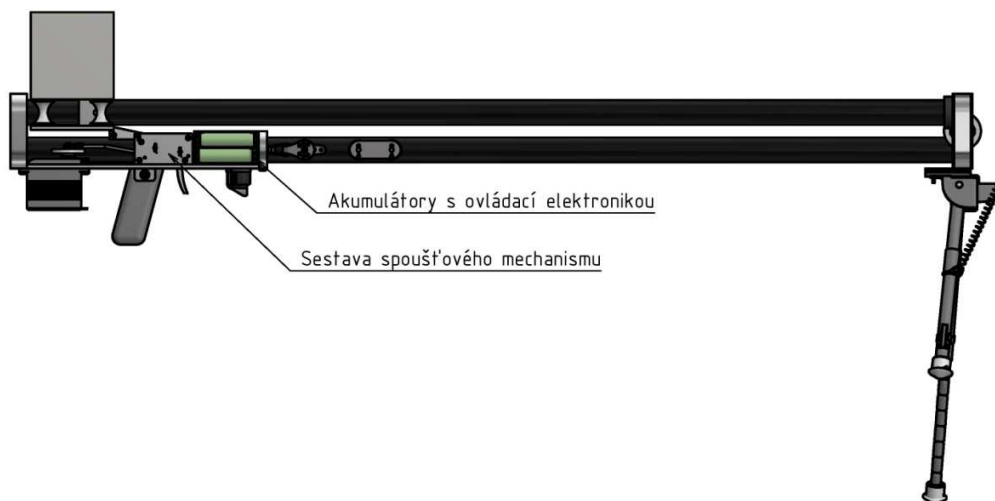
Zkonstruované zařízení se skládá ze čtyř kompozitových trubek, které jsou spojeny přes hliníkové koncovky. Po horních trubkách jezdí na čtyřech pojezdových kladkách kolébka, která drží letoun. V přední koncovce je umístěna přední kladka pružného lana. To je nataženo mezi spodní pohyblivou kladkou a přes přední kladku je vedeno do kladky v kolébce. Celkem přes přední kladku vedou čtyři prameny pružného lana. Na přední koncovce se nachází dvounožka. Mezi spodními trubkami je k držáku, ke kterému je uchycena pevná kladka napínacího kladkostroje, přišroubovaná základní deska. V desce je přišroubován zásek kladkostroje, spoušťový mechanismus s rukojetí, servo a akumulátory s ovládací elektronikou (viz Obr. 19). Konstrukční návrh celého systému (viz Obr. 17). Dvoupohledový obrázek s popisem (viz Obr. 18).



Obr. 17 ISO pohled na konstrukční návrh

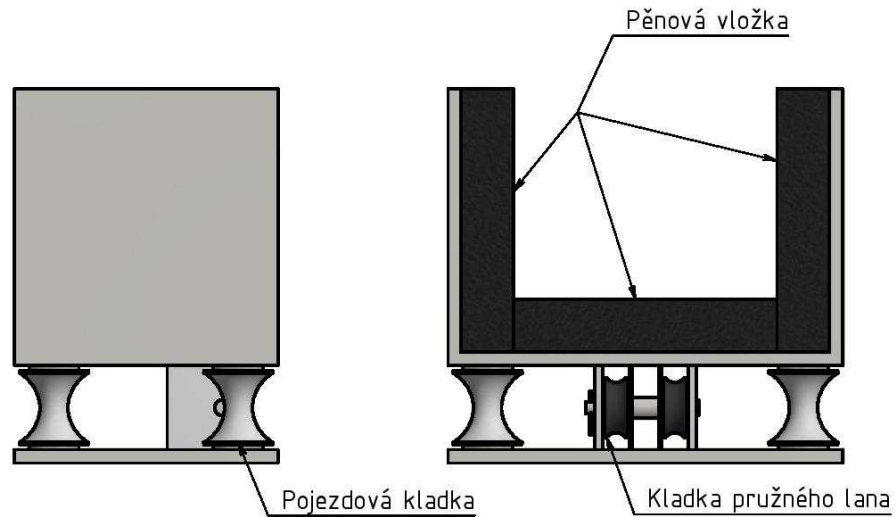


Obr. 18 Vnější popis



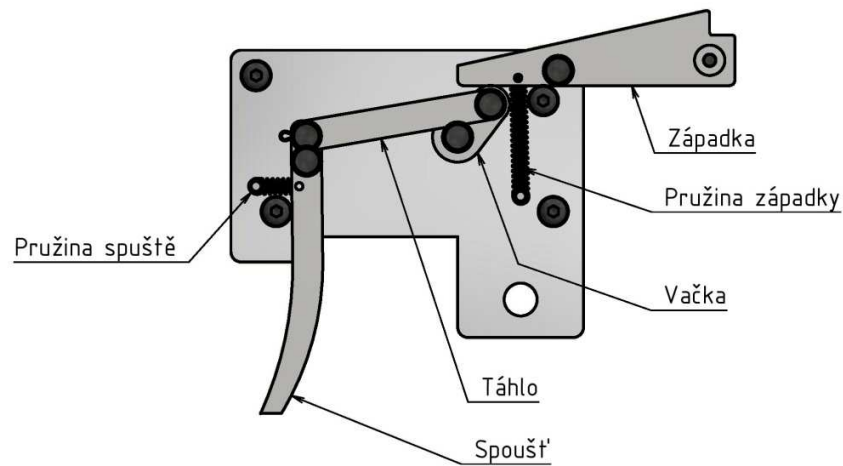
Obr. 19 Popis vnitřních částí

Kolébka sestává z hliníkového U dílu, v kterém je vlepena pěnová vložka. V rozích dílu se nacházejí 4 pojezdové kladky. Mezi spodní deskou a U dílem je umístěna kladka pružného lana. Celá sestava (viz Obr. 20).

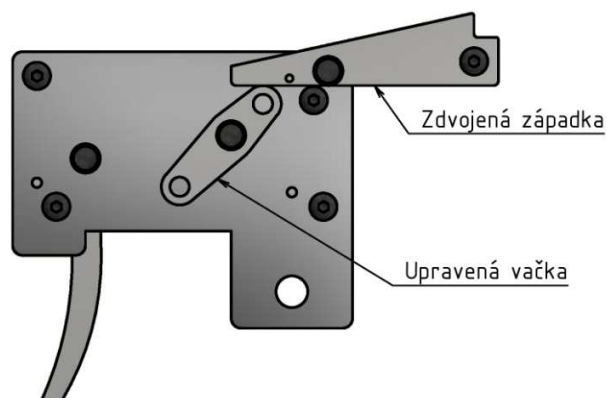


Obr. 20 Detail kolébky

Mechanismus spouště je uchycen na základní desce (viz Obr. 21). Princip tohoto mechanismu spočívá ve vačce, která je při startu pootočená pomocí táhla. Táhlo je taženo spouští. Při pootočení vačky dojde k otočení západky, která zubem ve své zadní části drží kolébku. Součástí mechanismu jsou 2 tažné pružiny, které vrací po startu mechanismus do výchozí pozice. Celý mechanismus je sevřen mezi dvěma deskami. Distanční sloupky mezi těmito deskami slouží k omezení mechanismu a zabránění jeho zablokování. Celý mechanismus je též možné ovládat servem. Ovládací vačka a západka jsou totiž zdvojeny a vačka modifikována pro připojení táhla k servu, (viz Obr. 22). Obě západky jsou pevně propojeny, když je jedna otočena, otočí se obě. Vačky však propojeny nejsou, takže každá má vlastní ovládací táhlo.



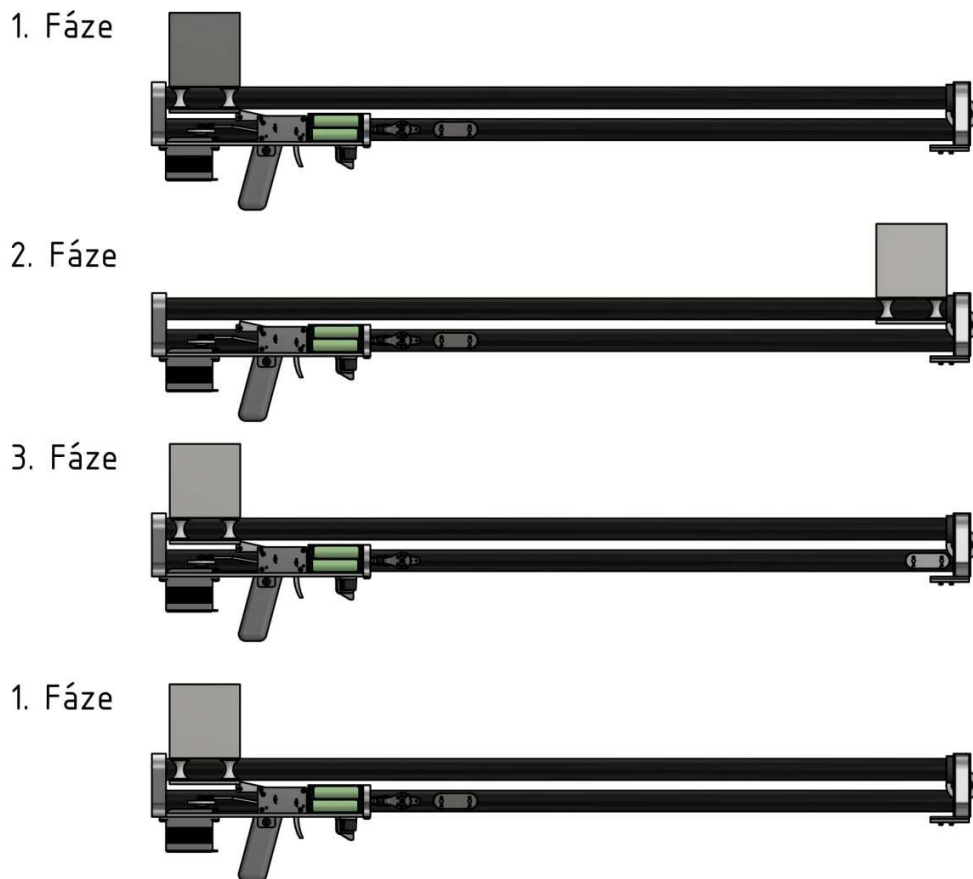
Obr. 21 Detail mechanismu spouště



Obr. 22 Zdvojení mechanismu spouště

4.6.1 Popis funkce startovacího zařízení

1. Fáze: Zařízení připraveno ke startu, což znamená, že kolébka je vzadu opřena o západku spouště, napínací kladkostroj je dotažen a lanko je v záseku. **2. Fáze:** Nastává po startu, kdy kolébka je vpředu opřena o doraz, kladkostroj je dotažen, ale uvolněn. **3. Fáze:** Ruční natažení a přesunutí kolébky zpět do zadní části a opření o západku, tím dojde k oddálení kladek v kladkostroji, který je uvolněn z minulé fáze. **4. Fáze:** Jediným úkonem je dotažení kladkostroje a zaseknutí jeho lanka v záseku, aby se nepovolil, čímž dojde k napnutí pružného lana. Tím je zařízení připraveno pro opětovný start. Celý proces je znázorněn (viz Obr.23)



Obr. 23 Schéma principu

5 Pevnostní kontrola hlavních prvků

5.1 Definice hlavních konstrukčních prvků

Hlavními konstrukčními prvky rozumíme takové díly konstrukce, po jejichž selhání je kompletně znemožněno další fungování zařízení. Hlavními prvky byli určeny: pružné lano, ložiska v pojezdových kladkách, ložiska přední kladky, vodící trubky, západka, spoušť, čep spouště a servo. V následujících podkapitolách budou provedeny pevnostní výpočty výše zmíněných prvků. Pasivní odpory v mechanismu nebyly uvažovány.

5.2 Výpočet potřebné a celkové tuhosti pružného lana

Pro zjištění sil působících na kontrolované části je potřeba stanovit potřebnou a celkovou tuhost pružného lana. Pro stanovení potřebné tuhosti pružného lana se předpokládá, že energie E_c se přetvoří v práci W_p , která je definována vztahem 1.4:

$$E_c = W_p = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \Delta y \quad 1.4$$

Kde F je síla v pružině a Δy je prodloužení pružiny. Neboli také rovnice 1.5:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot F \cdot y_2 - \frac{1}{2} \cdot F \cdot y_1 \quad 1.5$$

Kde y_2 je délka maximálně natažené pružiny a y_1 je předepjatá délka pružiny. Tuhost pružiny K je definována vztahem 1.6:

$$F = K \cdot y \quad 1.6$$

Dosazením vztahu 1.6 do rovnice 1.5, dostáváme:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot K \cdot (y_2^2 - y_1^2) \quad 1.7$$

Pak potřebná tuhost pružiny K je vyjádřena vztahem 1.8:

$$K = \frac{2 \cdot E_c}{(y_2^2 - y_1^2)} \quad 1.8$$

Hodnoty y_1 a y_2 byly odměřeny z 3D modelu (viz Příloha 5). Celková energie E_c byla vypočtena v kapitole 4.1.1 a její velikost byla stanovena na 473 J. Dosazením těchto hodnot do rovnice 1.8 je stanovena potřebná tuhost pružného lana na hodnotu 0,7568 N/mm:

$$K = \frac{2 \cdot 473}{(1,125^2 - 0,125^2)} = 756,8 \text{ N/m} = 0,7568 \text{ N/mm} \quad 1.9$$

Většina výrobců neuvádí číselné hodnoty tuhostí pružných lan. Byl tedy proveden experiment, při kterém bylo lano o délce 1000 mm a průměru 6 mm postupně zatěžováno silou až 50 N. Experiment byl vyhodnocen a byla stanovena výsledná tuhost lana K_{6mm} :

$$K_{6mm} = 0,0865 \text{ N/mm} \quad 2.0$$

Počet paralelně řazených pružných lan n byl stanoven viz. vztah 2.1:

$$n = \frac{K}{K_{6mm}} = \frac{0,7568}{0,0865} = 8,749 \rightarrow 9 \quad 2.1$$

Z praktických důvodů není vhodné použít 9 paralelně řazených pružných lan o průměru 6 mm vedle sebe, protože konstrukce by byla příliš široká. Proto bylo vybráno lano o průměru 9 mm a jeho tuhost byla přepočtena vztahem:

$$\frac{K_{6mm}}{K_{9mm}} = \frac{\frac{E \cdot A_1}{l}}{\frac{E \cdot A_2}{l}} = \frac{A_1}{A_2} \quad 2.2$$

Kde E je modul pružnosti v tahu pružných lan, K_{9mm} je tuhost 9 mm lana, A_1 je plocha průřezu 6 mm lana, A_2 je plocha průřezu 9 mm lana a l je délka, pak tuhost 9mm lana je stanovena:

$$K_{9mm} = \frac{K_{6mm} \cdot A_2}{A_1} = \frac{0,0865 \cdot 28,2743}{63,6173} = 0,1947 \text{ N/mm} \quad 2.3$$

Počet svazků 9 mm pružného lana je určen:

$$n = \frac{K}{K_{9mm}} = \frac{0,7568}{0,1947} = 3,887 \rightarrow 4 \quad 2.4$$

Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližší vyšší celé číslo. Celková tuhost $K_{výsledná}$ se vypočte součinem tuhosti jedné pružiny viz vztah 2.3 a počtem nutných pružin viz. rovnice 2.4:

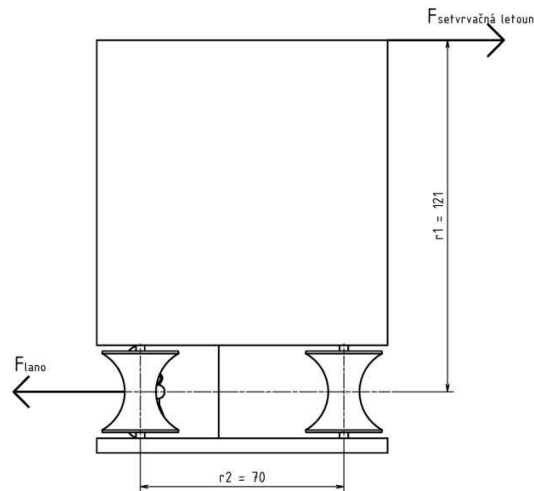
$$K_{výsledná} = n \cdot K_{9mm} = 4 \cdot 0,1947 = 0,7788 \text{ N/mm} \quad 2.5$$

5.3 Výpočet ložiska vodící kladky

Ložisko je zatíženo axiální a radiální silou. Radiální silou je zatíženo od tvarového spojení s vodící tyčí. Axiálně je ložisko zatíženo od hmotnosti kolébky, hmotnosti letounu a od setrvačné síly, která vzniká při startu letounu. Pro výpočet je nejprve třeba vypočítat radiální zatížení.

5.3.1 Výpočet axiální síly

Klopným momentem rozumíme moment od setrvačné síly (viz Obr. 24).



Obr. 24 Schéma pro výpočet klopného momentu od setrvačné síly

Pro výpočet síly F_{lano} byl použit vztah pro sílu v pružině, do kterého byla dosazena celková tuhost $K_{výsledné}$ viz. rovnice 2.5 a dále prodloužení lana v momentě, ve kterém je největší rychlost kolébky, což je těsně před opuštěním letounu:

$$F_{lano} = K_{výsledné} \cdot y_1 = 0,7788 \cdot 125 = 97,33 \text{ N} \quad 2.6$$

Pro výpočet zrychlení působícího na letoun byl použit první Newtonův pohybový zákon:

$$F_{lano} = (m_{kolebka} + m_{letoun}) \cdot a \quad 2.7$$

Kde $m_{kolebka}$ je hmotnost kolébky, m_{letoun} je hmotnost letounu a a je zrychlení, které je určeno vztahem:

$$a = \frac{F_{lano}}{(m_{kolebka} + m_{letoun})} = \frac{97,33}{2 + 5} = 13,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad 2.8$$

Pro výpočet setrvačné síly $F_{setrvačná\ letounu}$ letounu bylo opět využito prvního Newtonova pohybového zákona:

$$F_{setrvačná\ letounu} = m_{letoun} \cdot a = 5 \cdot 13,9 = 69,52\ N \quad 2.9$$

Klopný moment $M_{klopný}$ je počítán k bodu, který leží na ose vodících trubek a je v půlce vzdálenosti mezi kladkami. Rameno, na kterém setrvačná síla působí, r_1 bylo odměřeno z 3D modelu (viz Příloha 5):

$$M_{klopný} = F_{setrvačná\ letounu} \cdot r_1 = 69,52 \cdot 0,121 = 8,41\ Nm \quad 3.0$$

Síla $F_{ložisko}$, kterou vyvolává klopný moment $M_{klopný}$ na ložisko je vypočtena pomocí momentové rovnováhy:

$$F_{ložisko} = \frac{M_{klopný}}{\frac{r_2}{2}} = \frac{\frac{8,41}{2}}{\frac{0,035}{2}} = 120,2\ N \quad 3.1$$

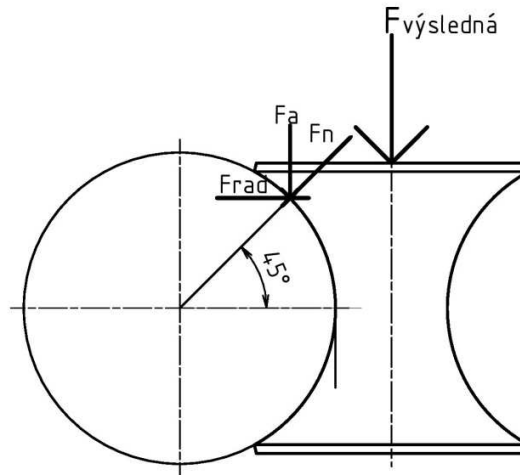
Kde r_2 je rameno na kterém klopný moment působí, a které bylo odměřeno z 3D modelu (viz Příloha 5). Výsledná síla $F_{výsledná}$ působící na ložisko je součet síly od klopného momentu $F_{ložisko}$ a tíhových sil od hmotnosti kolébky $m_{kolébka}$ a hmotnosti letounu m_{letoun} :

$$F_{výsledná} = F_{ložisko} + (m_{kolébka}/2 + m_{letoun}/2) \cdot g = 120,1 + \left(\frac{2}{2} + \frac{5}{2}\right) \cdot 9,81 = 188,8\ N \quad 3.2$$

Hmotnost kolébky $m_{kolébka}$ byla zjištěna z 3D modelu (viz Příloha 5), hmotnost m_{letoun} letounu je definována v zadání práce.

5.3.2 Výpočet radiální síly

Výsledná síla působící na ložisko $F_{výsledná}$ viz. rovnice 3.2 se rozkládá na normálovou reakci F_n , která se dále rozkládá na reakci radiální F_{rad} a axiální reakci F_a . Na schématu (Obr. 25) je rozložení sil na vodící tyči a pojezdové kladce. Předpokládá se úhel nositelky s vodorovnou osou 45° , ideální tuhé chování všech těles a pasivní účinky jsou zanedbány.



Obr. 25 Schéma rozložení sil

Pomocí goniometrické funkce cosinus byla vypočtena normálová reakce F_n na vodící tyči:

$$F_n = \cos(45) \cdot F_{výsledná} \quad 3.3$$

Rozkladem normálové síly F_n do svislé osy je určena její axiální složka F_a . Ze vztahu 3.3 bylo dosaženo:

$$F_a = \sin(45) \cdot F_n = \sin(45) \cdot \cos(45) \cdot F_{výsledná} = \sin(45) \cdot \cos(45) \cdot 188,8 = 94,4 \text{ N} \quad 3.4$$

Analogicky jako viz. rovnice 3.4 bylo dosaženo z rovnice 3.3, čímž byla vypočtena hledaná radiální reakce F_{rad} :

$$F_{rad} = \cos(45) \cdot F_n = \cos(45)^2 \cdot F_{výsledná} = \cos(45)^2 \cdot 188,8 = 94,4 \text{ N} \quad 3.5$$

5.3.3 Výpočet ekvivalentního zatížení a základní dynamické únosnosti ložiska

Pro výpočet základní dynamické únosnosti je potřeba vypočítat ekvivalentní zatížení. Rovnice 3.6 byla převzata z katalogu SKF[23] stejně jako výpočtový součinitel f_0 a hodnota statické únosnosti C_0 :

$$f_0 \frac{F_{výsledná}}{C_0} = 14,8 \cdot 0,188 / 0,83 = 3,35 \rightarrow e = 0,38 \quad 3.6$$

Pro odečtení výpočtových koeficientů (f_0, C_0) z katalogu SKF [23] bylo nutné zjistit poměr axiálního a radiálního zatížení a tento poměr porovnat s koeficientem e :

$$\frac{F_{výsledná}}{F_{rad}} = \frac{188,8}{94,8} = 2 \rightarrow \frac{F_{výsledná}}{F_{rad}} > e \rightarrow X = 0,56 \quad Y = 1,15 \quad [23] \quad 3.7$$

Výpočet ekvivalentního zatížení F_{ekv} v souladu s katalogem SKF[23]:

$$F_{ekv} = X \cdot F_{rad} + Y \cdot F_{výsledná} = 0,56 \cdot 94,8 + 1,15 \cdot 188,8 = 269,984 \text{ N} \approx 270 \text{ N} \quad 3.8$$

Kde X a Y jsou výpočtové koeficienty z katalogu SKF[23]. Úhlová rychlost ložiska ω je určena pomocí obvodové rychlosti v a průměru kružnice d . Obvodová rychlost v byla určena z rozboru v kapitole 4.1.1 a průměr kružnice d byl odměřen z 3D modelu (viz Příloha 5):

$$\omega = \frac{v}{d/2} = \frac{11,4}{0,026/2} = 876,9 \text{ s}^{-1} \quad 3.9$$

Otáčky za minutu n :

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 876,9}{2 \cdot \pi} = 8374 \text{ ot/min} \quad 4.0$$

Ze vztahu pro životnost ložiska z katalogu SKF[23] byl vyjádřen vztah pro základní dynamickou únosnost C

$$L_h = \left(\frac{C}{F_{ekv}} \right)^m \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \geq 500 \text{ hod} \rightarrow C = F_{ekv} \cdot \sqrt[p]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} \quad 4.1$$

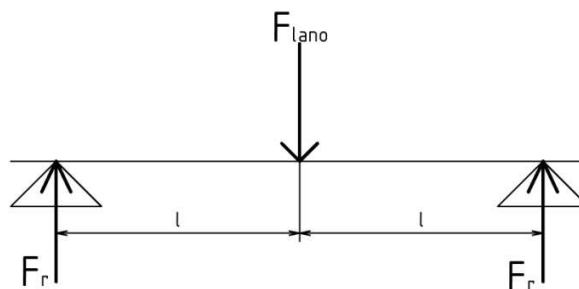
Kde životnost ložiska L_h byla určena na 500 hodin. Koeficient p pro ložiska s bodovým stykem byl určen z katalogu SKF[23] a F_{ekv} je ekvivalentní zatížení ložiska viz vztah 3.8.

$$C = 270 \cdot \sqrt[3]{\frac{60 \cdot 8374 \cdot 500}{10^6}} = 1703,7 \text{ N} \approx 1,71 \text{ kN} \quad 4.2$$

Z katalogu SKF bylo zvoleno ložisko 61800, které má základní dynamickou únosnost $C = 1,72 \text{ kN}$. [23], která je vyšší než vypočtená ve vztahu 4.2.

5.4 Výpočet ložiska přední kladky

Ložiska v přední kladce jsou zatíženy pouze radiální silou, jelikož přední kladka pouze otáčí osu pružného lana. Výpočet radiální síly vyplývá ze schématu (viz Obr. 26) a rovnice silové rovnováhy.



Obr. 26 Schéma zatížení přední kladky

Pro výpočet síly F_{lano} byl použit vztah pro sílu v pružině, do kterého byla dosazena celková tuhost $K_{výsledné}$ viz. rovnice 2.6 a dále prodloužení lana y_2 v momentě, ve kterém je největší síla, což je při maximálním prodloužení:

$$F_{lano} = K_{výsledné} \cdot y_2 = 0,7788 \cdot 1125 = 876 \text{ N} \quad 4.3$$

Z rovnice statické rovnováhy ve směru svislé osy je určena radiální síla F_r :

$$F_r = \frac{F_{lano}}{2} = \frac{876}{2} = 438 \text{ N} \quad 4.4$$

Úhlová rychlost ložiska ω je určena pomocí obvodové rychlosti v a průměru kružnice d_{pk} . Obvodová rychlost v byla určena z rozboru v kapitole 4.1.1 a průměr kružnice d_{pk} byl odměřen z 3D modelu (viz Příloha 5):

$$\omega = \frac{v}{d_{pk}/2} = \frac{11,4}{0,045/2} = 506,7 \text{ s}^{-1} \quad 4.5$$

Otáčky za minutu n :

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 506,7}{2 \cdot \pi} = 4\,838,3 \text{ ot/min} \quad 4.6$$

Ze vztahu pro životnost ložiska z katalogu SKF[23] byl vyjádřen vztah pro základní dynamickou únosnost C :

$$L_h = \left(\frac{C}{F_{ekv}} \right)^m \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \geq 100 \text{ hod} \rightarrow C = F_{ekv} \cdot \sqrt[p]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} \quad 4.7$$

Kde životnost ložiska L_h byla určena na 100 hodin. Koeficient p pro ložiska s bodovým stykem byl určen z katalogu SKF[23] a F_{ekv} je F_r viz vztah 4.4.

$$C = 438 \cdot \sqrt[3]{\frac{60 \cdot 4\,838,3 \cdot 100}{10^6}} = 1302,5 \text{ N} = 1,31 \text{ kN} \quad 4.8$$

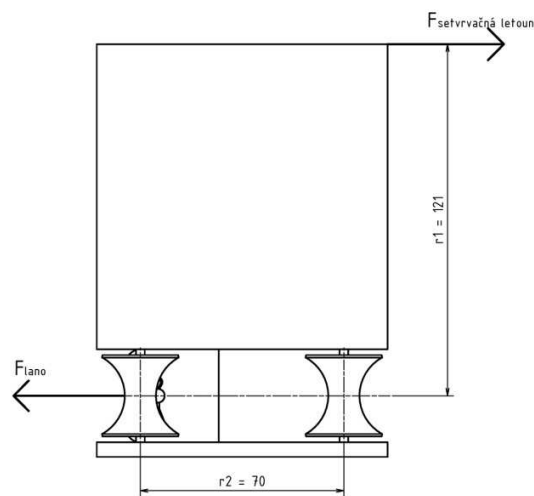
Z katalogu SKF bylo zvoleno ložisko 638-RZ, která má základní dynamickou únosnost $C = 1,33 \text{ kN}$ [23], která je vyšší než vypočtená ve vztahu 4.8.

5.5 Kontrola vodících trubek

V kapitole bude zkontrolována horní dvojice vodících trubek na ohyb kvůli charakteru zatížení. Trubky jsou zatíženy tíhovou silou od kolébky, tíhovou silou letounu a silou vyvolanou klopným momentem při startu (viz Obr. 27). K návrhu a kontrole byla použita aplikace Tube Design od firmy CompoTech [24].

5.5.1 Výpočet zatížení trubek

Největší průhyb vodících trubek je předpokládán v polovině jejich délky, proto výpočet namáhání bude proveden v této poloze.



Obr. 27 Schéma pro výpočet klopného momentu od setrvačné síly

Pro výpočet síly F_{lano} byl použit vztah pro sílu v pružině, do kterého byla dosazena celková tuhost $K_{výsledné}$ (viz rovnice 2.5) a dále prodloužení lana y_p , v polovině délky trubek:

$$F_{lano} = K_{výsledné} \cdot y_p = 0,7788 \cdot 625 = 486,75 \text{ N} \quad 4.9$$

Pro výpočet zrychlení působícího na letoun byl použit první Newtonův pohybový zákon:

$$F_{lano} = (m_{kolebka} + m_{letoun}) \cdot a \quad 5.0$$

Kde $m_{kolebka}$ je hmotnost kolébky, m_{letoun} je hmotnost letounu a a je zrychlení, které je určeno vztahem:

$$a = \frac{F_{lano}}{(m_{kolebka} + m_{letoun})} = \frac{486,75}{2 + 5} = 69,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad 5.1$$

Pro výpočet setrvačné síly $F_{setrvačná letounu}$ letounu bylo opět využito prvního Newtonova pohybového zákona:

$$F_{\text{setrvačná letounu}} = m_{\text{letoun}} \cdot a = 5 \cdot 69,54 = 347,68 \text{ N} \quad 5.2$$

Klopný moment $M_{\text{klopný}}$ je počítán k bodu, který leží na ose vodících trubek a je v půlce vzdálenosti mezi kladkami. Rameno, na kterém setrvačná síla působí, r_1 bylo odměřeno z 3D modelu (viz Příloha 5):

$$M_{\text{klopný}} = F_{\text{setrvačná letounu}} \cdot r_1 = 347,68 \cdot 0,121 = 42,07 \text{ Nm} \quad 5.3$$

Síla $F_{\text{ložisko}}$, kterou vyvolává klopný moment $M_{\text{klopný}}$ na ložisko je vypočtena pomocí momentové rovnováhy:

$$F_{\text{klopná}} = \frac{M_{\text{klopný}}}{2} / \frac{r_2}{2} = \frac{42,07}{2} / \frac{0,07}{2} = 600,7 \text{ N} \quad 5.4$$

Kde r_2 je rameno, na kterém klopný moment působí a které bylo odměřeno z 3D modelu (viz Příloha 5). Výsledná síla $F_{\text{zadní}}$, resp. $F_{\text{přední}}$, působící na zadní, resp. přední, ložisko je součet síly od klopného momentu $F_{\text{klopná}}$ a tíhových sil od hmotnosti kolébky $m_{\text{kolébka}}$ a hmotnosti letounu m_{letoun} :

$$\begin{aligned} F_{\text{zadní}} &= F_{\text{klopná}} + (m_{\text{kolébka}}/2 + m_{\text{letoun}}/2) \cdot g = 600,7 + \left(\frac{2}{2} + \frac{5}{2}\right) \cdot 9,81 \\ &= 635 \text{ N} \end{aligned} \quad 5.5$$

$$\begin{aligned} F_{\text{přední}} &= -F_{\text{klopná}} + (m_{\text{kolébka}}/2 + m_{\text{letoun}}/2) \cdot g = -600,7 + \left(\frac{2}{2} + \frac{5}{2}\right) \cdot 9,81 \\ &= -566,37 \text{ N} \end{aligned} \quad 5.6$$

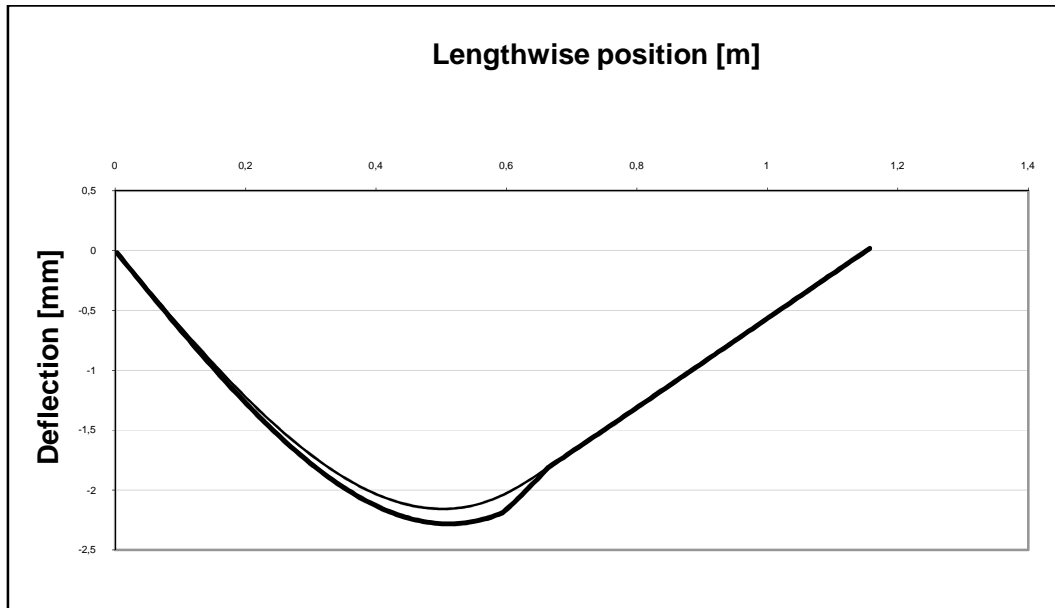
Hmotnost kolébky $m_{\text{kolébka}}$ byla zjištěna z 3D modelu (viz Příloha 5), hmotnost m_{letoun} letounu je definována v zadání práce.

Vstupní parametry pro aplikaci Tube Design od firmy CompoTech [24] (viz Tab. 16). Pozice odpovídají poloze přední, resp. zadní, vodící kladky, to znamená střed kolébky je v půlce dráhy. Délka celé trubky je 1160 mm, vnitřní průměr je 26 mm a vnější průměr je 29 mm. Skladba laminátu čteně materiálů (viz Příloha 1).

Síla	Pozice od zadního čela
635 N	600 mm
-566,37 N	670 mm

Tab. 16 Vstupní údaje aplikace Tube Design

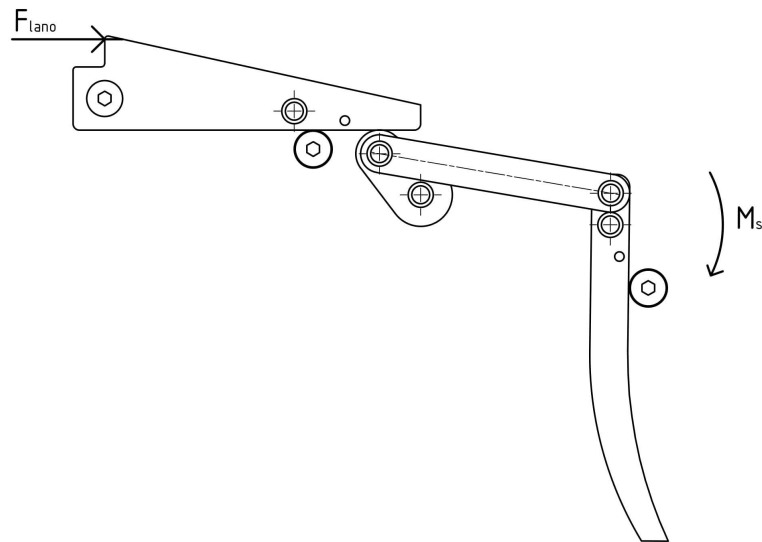
Výsledkem analýzy v aplikaci Tube Design od firmy CompoTech [24] je křivka průhybu vodících trubek (viz Obr. 28) a hodnoty napětí v místě maximálního ohybového momentu. Napětí v axiální vrstvě kompozitové trubky z vláken t700 12K je 55.85 Nmm^{-2} (viz Příloha 1). Typická maximální hodnota pevnosti v tlaku v jednosměrném epoxidovém laminátu z vláken t700 12K se pohybuje kolem 1200 Nmm^{-2} [24]. To znamená, že namáhání trubky je hluboko pod mezí pevnosti.



Obr. 28 Graf průhybu vodící trubky

5.6 Silové poměry ve spoušťovém mechanismu

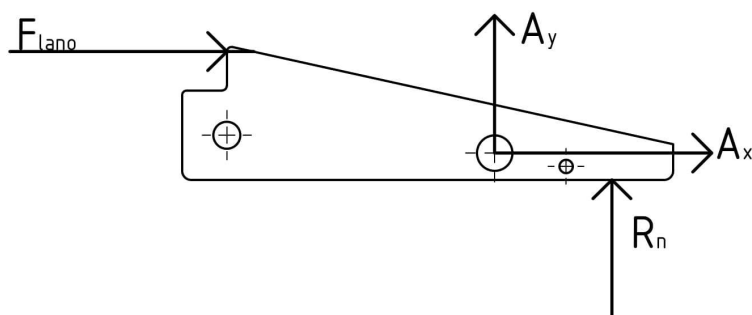
Spoušťový mechanismus je namáhán působící silou F_{lano} od pružného lana. Ta působí na západku a je v rovnováze udržována momentem spouště M_s (viz Obr. 29)



Obr. 29 Schéma zatížení mechanismu

5.6.1 Západka

Na západku působí síla v laně F_{lano} , viz rovnice 4.3, tečná reakce R_n od vačky. Západka je uložena na čepu od kterého působí reakční síly A_x a A_y (viz Obr. 30).



Obr. 30 Rozložení sil na západce

Reakce A_x je v rovnováze se silou F_{lano} :

$$A_x = -F_{lano} = -876 \text{ N} \quad 5.7$$

Z rovnice momentové rovnováhy určíme tečnou reakci R_n :

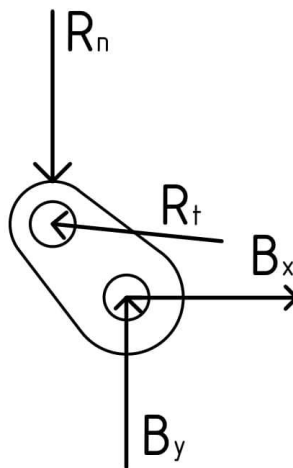
$$R_n = \frac{F_{lano} \cdot r_3}{r_4} = \frac{876 \cdot 11,38}{13,49} = 739 \text{ N} \quad 5.8$$

Hodnoty r_3, r_4 jsou ramena, na kterých působí síly pro výpočet momentů a které jsou odečteny z 3D modelu (viz Příloha 5). Reakce A_y je v rovnováze se silou R_n :

$$A_y = -R_n = -739 \text{ N} \quad 5.9$$

5.6.2 Vačka

Na vačku působí tečná reakce R_n ze západky a síla R_t od táhla. Vačka je uložena na čepu od kterého působí reakční síly B_x a B_y (viz Obr. 31).



Obr. 31 Rozložení sil na vačce

Z rovnice momentové rovnováhy ke středu čepu je vypočtena síla v táhlu R_t :

$$R_t = -\frac{R_n \cdot r_6}{r_5} = -\frac{739 \cdot 6,51}{5,31} = -906 \text{ N} \quad 6.0$$

Kde R_n je určena z rovnice viz. 5.8 a hodnoty r_5, r_6, α byli odečteny z 3D modelu (viz Příloha 5). Síla byla rozložena do vodorovné resp. svislé osy R_{tx} resp. R_{yx} :

$$R_{tx} = R_t \cdot \cos\alpha = -906 \cdot \cos(9,7) = -893 \text{ N} \quad 6.1$$

$$R_{ty} = R_t \cdot \sin\alpha = -906 \cdot \sin(9,7) = -152,65 \text{ N} \quad 6.2$$

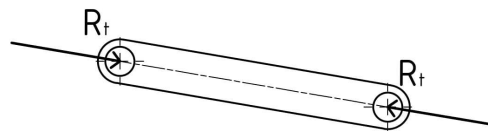
Z rovnic silové rovnováhy byli vypočteny reakce v čepu B_x resp. B_y :

$$B_x = R_{tx} = -893 \text{ N} \quad 6.3$$

$$B_y = R_n - R_{ty} = 739 - (-152,65) = 891,65 \text{ N} \quad 6.4$$

5.6.3 Táhlo

Na táhlo působí síla R_t , viz rovnice 6.0, což je reakce od vačky, resp. spouště.



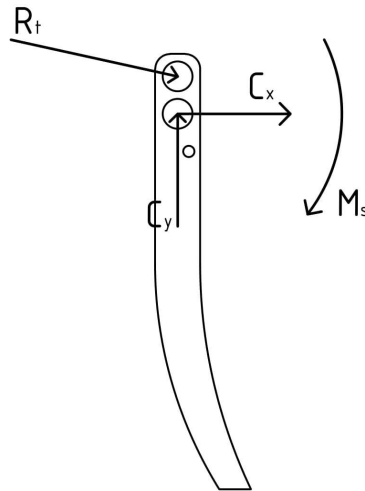
Obr. 32 Rozložení sil na táhlu

Obě reakce jsou v rovnováze:

$$R_t = R_t = -906 \text{ N} \quad 6.5$$

5.6.4 Spoušť

Na spoušť působí reakce R_t od táhla a moment spouště M_S . Spoušť je uložena na čepu, od kterého působí reakční síly C_x a C_y (viz Obr. 33).



Obr. 33 Rozložení sil na spoušti

Z rovnic silové rovnováhy byli určeny reakce C_x resp. C_y :

$$C_x = -R_{tx} = 893 \text{ N} \quad 6.6$$

$$C_y = R_{ty} = -152,65 \text{ N} \quad 6.7$$

Kde hodnoty R_{tx} a R_{ty} , viz rovnice 6.1 a 6.2. Z rovnice momentové rovnováhy byl vypočten moment spouště M_S :

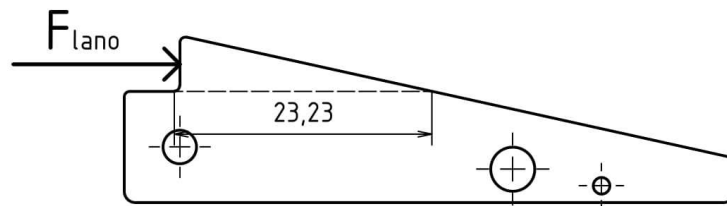
$$M_S = -R_t \cdot r_7 = -(-906) \cdot 4,94 = 4\,475,6 \text{ Nmm} \approx 4,5 \text{ Nm} \quad 6.8$$

Kde hodnota r_7 byla odečtena z 3D modelu (viz Příloha 5).

5.7 Kontrola západky

5.7.1 Kontrola na smyk (střih)

Západka je namáhána na smyk silou F_{lano} , (viz Obr. 34). Smykové napětí musí být menší než dovolené. Geometrie pro výpočet plochy byly odečteny z 3D modelu (viz Příloha 5). Mez kluzu oceli 11 375 je $\sigma_k = 196 \text{ Nmm}^{-2}$ [25].



Obr. 34 Schéma namáhání smykem západky

Maximální dovolené smykové napětí τ_d se vypočte ze vztahu:

$$\tau_d = \frac{\sigma_k}{\alpha} = \frac{192}{2} = 96 \text{ Nmm}^{-2} \quad 6.9$$

Kde součinitel $\alpha = 2$ je pro teorii maximálního smykového napětí a kde σ_k je mez kluzu materiálu. Smykové napětí v západce od působící síly v laně F_{lano} :

$$\tau = \frac{F_{lano}}{S} = \frac{876}{23,23 \cdot 4} = 9,42 \text{ Nmm}^{-2} \quad 7.0$$

Kde S je smyková plocha, která je určena geometrií a odečtena ze 3D modelu (viz Příloha 5). Součinitel bezpečnosti k je poměr dovolené hodnoty ku vypočtené:

$$k = \frac{\tau_d}{\tau} = \frac{96}{9,42} = 10,19 \quad 7.1$$

Podmínka je splněna s bezpečností $k = 10,19$. **Součást vyhovuje.**

5.7.2 Kontrola na otláčení díry

Maximální tlak ve spoji musí být nižší než maximální dovolený tlak. Byla zvolena bezpečnost $k = 2$. Mez kluzu oceli 11 375 je $\sigma_k = 196 \text{ Nmm}^{-2}$ [25].

Maximální dovolený tlak ve spoji je určen pomocí meze kluzu σ_k a součinitele bezpečnosti k :

$$P_d = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{192}{2} = 96 \text{ MPa} \quad 7.2$$

Síla působící v díře je určena kvadratickým součtem reakčních sil A_x , A_y viz rovnice 5.7, 5.9:

$$F_{díra_{západka}} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} = \sqrt{876^2 + 739^2} = 1146 \text{ N} \quad 7.3$$

Tlak ve spoji P je podíl působící síly a plochy průmětu čepu:

$$P = \frac{F_{díra_{západka}}}{d \cdot l} = \frac{1146}{4 \cdot 4} = 71,625 \text{ MPa} \quad 7.4$$

Kde hodnoty d a l byly změřeny v CAD programu z 3D modelu (viz Příloha 5).

Z rovnic 7.2 a 7.4 je patrné, že **součást vyhovuje**

5.8 Kontrola spouště

Spoušť bude kontrolována na otláčení. Maximální tlak ve spoji musí být nižší než maximální dovolený tlak. Díl je vyroben z oceli 11 373. Výpočet dovoleného tlaku se zvolenou bezpečností $k=2$ je v rovnici 6.5. Působící síla $F_{díra_spoust}$ je kvadratický součet reakčních sil C_x, C_y , viz rovnice 6.6, 6.7:

$$F_{díra_spoust} = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} = \sqrt{893^2 + 152,65^2} = 905,95 \text{ N} \quad 7.5$$

Tlak ve spoji P se vypočte analogicky jako v rovnici 7.4:

$$P = \frac{F_{díra_spoust}}{d_2 \cdot l} = \frac{905,95}{5 \cdot 4} = 45,29 \text{ MPa} \quad 7.6$$

Kde hodnoty d_2 a l byly změřeny z 3D modelu (viz Příloha 5).

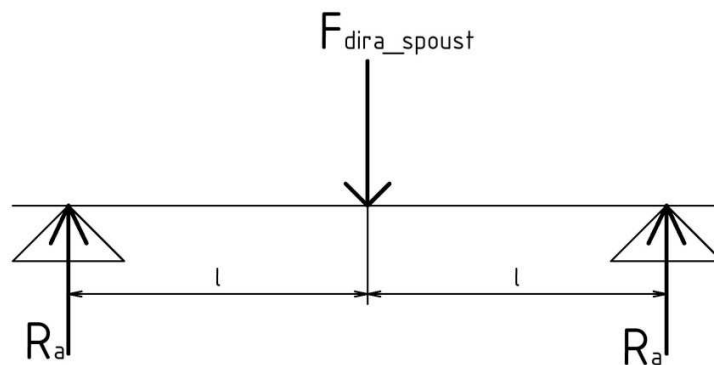
Z rovnic 7.2 a 7.6 je patrné, že **součást vyhovuje**.

5.9 Kontrola čepu spouště

Čep bude kontrolován na ohyb, jedná se o válcový čep s průměrem 5 mm, jeho délka je 14 mm. Čep je vyrobený z oceli 14 220, $\sigma_k = 440 \text{ Nmm}^{-2}$ [25].

5.9.1 Zatížení čepu

Čep je zatížen silou $F_{díra_spoust}$, viz rovnice 7.5.



Obr. 35 Schéma zatížení čepu

Reakční síla R_a je vypočtena z rovnice statické rovnováhy:

$$R_a = \frac{F_{díra_spoust}}{2} = \frac{905,95}{2} = 452,98 \text{ N} \quad 7.7$$

5.9.2 Kontrola čepu na ohyb

Vypočtené napětí je porovnáno s mezí kluzu materiálu čepu. Ohybové napětí σ_o je určeno

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{R_a \cdot l_{2\text{čep}}}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{452,98 \cdot 7}{\frac{\pi \cdot 5^3}{32}} = 258,4 \text{ Nmm}^{-2} \quad 7.8$$

Kde hodnota $l_{2\text{čep}}$ je polovina délky čepu a je zjištěna ze 3D modelu (viz Příloha 5), kde M_o je ohybový moment, W_o je modul průřezu, R_a je reakce, viz. rovnice 7.7, a kde d je průměr čepu. Výpočet součinitele bezpečnosti je analogický jako v rovnici 7.1:

$$k = \frac{\sigma_k}{\sigma_o} = \frac{440}{258,4} = 1,75 \quad 7.9$$

Kontrola vyšla s bezpečností $k = 1,75$. **Součást vyhovuje.**

5.9.3 Kontrola čepu na smyk (střih)

Čep bude kontrolován na smyk, jedná se o válcový čep s průměrem 5 mm vyrobený z oceli 14 220, $\sigma_k = 440 \text{ Nmm}^{-2}$ [25].

Maximální dovolené smykové napětí τ_d se vypočte ze vztahu:

$$\tau_d = \frac{\sigma_k}{\alpha} = \frac{440}{2} = 220 \text{ Nmm}^{-2} \quad 8.0$$

Kde součinitel $\alpha = 2$ je pro teorii maximálního smykového napětí a kde σ_k je mez kluzu materiálu. Smykové napětí v čepu od působící reakční síly $F_{\text{dír}_a_spoušt}$:

$$\tau = \frac{F_{\text{dír}_a_spoušt}}{S} = \frac{905,95}{5 \cdot 4} = 45,29 \text{ Nmm}^{-2} \quad 8.1$$

Kde S je smyková plocha, která je určena geometrií a odečtena ze 3D modelu (viz Příloha 5). Součinitel bezpečnosti k je poměr dovolené hodnoty ku vypočtené:

$$k = \frac{\tau_d}{\tau} = \frac{220}{45,29} = 4,85 \quad 8.2$$

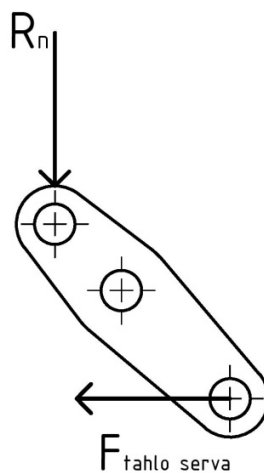
Kontrola vyšla s bezpečností $k = 4,85$. **Součást vyhovuje.**

5.10 Kontrola serva

U serva bude zkontrolován kroutící moment, kterým servo disponuje a který je po servu požadován. Dle specifikací výrobce má servo HITEC d845wp kroutící moment 50 kg/cm při napětí 7,4V [26]. Pro toto napětí jsou potřeba např. dva sériově zapojené akumulátory typu 18650 o nominálním napětí 3,7 V.

Přepočet kroutícího momentu serva M_k do jednotek soustavy SI:

$$M_k = M_{katalog} \cdot g \cdot 0,01 = 50 \cdot 9,81 \cdot 0,01 = 4,905 \text{ Nm} \quad 8.3$$



Obr. 36 Rozložení sil na vačce serva

Potřebná síla k pootočení vačkou $F_{tahlo serva}$ je odvozena z rovnice momentové rovnováhy:

$$F_{tahlo serva} = \frac{R_n \cdot r_7}{r_8} = \frac{739 \cdot 6,51}{10,6} = 453,86 \text{ N} \quad 8.4$$

Kde hodnoty r_7, r_8 byly změřeny ve 3D modelu, (viz Příloha 5) a kde R_n , viz. rovnice 5.8.

Požadovaný moment:

$$M_{k požadovaný} = F_{tahlo serva} \cdot r_9 = 453,86 \cdot 10 = 4538,6 \text{ Nmm} \\ = 4,539 \text{ Nm} \quad 8.5$$

Kde $F_{tahlo serva}$ viz. rovnice 8.4 a kde hodnota r_9 byla změřena ve 3D modelu, (viz Příloha 5).

Požadovaný moment $M_{k požadovaný}$ je menší než moment M_k , kterým servo disponuje.

Servo vyhovuje.

6 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout zařízení pro start bezpilotního letounu s maximální vzletovou hmotností 5 kg. Byla provedena analýza stávajících konstrukčních řešení zařízení pro start bezpilotních letounů a bylo navrženo zařízení určené pro start bezpilotního letounu o maximální vzletové hmotnosti 5 kg, byl zpracován 3D model a provedena pevnostní kontrola hlavních dílů.

V první části práce byly zjištěny základní parametry letounů o hmotnosti do 5 kg, v této části byla provedena rešerše, ze které byli určeny základní vstupní parametry pro startovací zařízení. Poté byla zpracována analýza stávajících konstrukčních řešení startovacích zařízení, ze kterých byli vybrány dvě koncepce. V části práce zabývající se konstrukčním návrhem byli vybrané koncepce rozpracované do tří koncepčních návrhů, z nichž jeden byl vybrán jako nejvhodnější a následně byl rozpracován detailně do 3D modelu. Následuje kapitola, ve které jsou definovány a následně pevnostně zkontrolovány hlavní části zařízení, kterými jsou: pružné lano, vodící trubky, ložiska v přední kladce, ložiska pohybových kladek, západka spouště, spoušť, čep spouště a servo. Kontrolované díly pevnostně vyhovují.

Navržené zařízení využívá energii akumulovanou v pružném laně. Letoun sedí v pohyblivé kolébce, která má měkké výměnné pěnové vložky, aby bylo zařízení kompatibilní s co největším počtem letounů. Pružné lano je koncipováno jako čtyři paralelně řazené pružiny a je napínáno kladkostrojem. Příprava ke startu probíhá ve třech krocích. Napřed je uvolněn kladkostroj po předchozím startu, poté je natažena kolébka a zajištěna ve spouštěcím mechanismu. Posledním krokem je napnutí pružného lana pomocí kladkostroje.

Jedním z požadavků je samostatný start bez lidské interakce, z toho důvodů zařízení disponuje dvounožkou a spouštěvým mechanismus je vybaven možností startu pomocí serva.

Hlavní parametry navrženého zařízení, (viz Tab. 16). Přiložená výrobní dokumentace a 3D model byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2018 Professional a obsahuje výkresy hlavních sestav. Cíle práce byli splněny ve všech bodech.

Hmotnost	5 Kg
Délka	1199 mm
Šířka	150 mm
Výška	280 mm

Tab. 17 Parametry navrženého zařízení

7 Zdroje

- [1] Úřad pro civilní letectví.[Online] <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/co-je-to-bezpilotni-letadlo-bezpilotni-system-model-letadla>.
- [2] PLOEGER, Friedrich Wilhelm. *Strategic Concept of Employment: for Unmanned Aircraft Systems in NATO* [online]. 2010, , 6 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: http://www.japcc.org/wp-content/uploads/UAS_CONEMP.pdf
- [3] AUTOR NEUVEDEN. *avinc.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.avinc.com/uas/view/raven>
- [4] AUTOR NEUVEDEN. *avinc.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: https://www.avinc.com/images/uploads/prod_thumbs/830/raventn-2.png
- [5] AUTOR NEUVEDEN. *elbitsystems.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <http://elbitsystems.com/products/uas/skylark-i-lex/>
- [6] AUTOR NEUVEDEN. *army-technology.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.army-technology.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/1l-Image-22.jpg>
- [7] AUTOR NEUVEDEN. *emt-penzberg.de* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.emt-penzberg.de/produkte/aladin/technische-daten.html>
- [8] AUTOR NEUVEDEN. *emt-penzberg.de* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: https://www.emt-penzberg.de/typo3temp/pics/aladin_b7_01_254fff4277.jpg
- [9] AUTOR NEUVEDEN. *avinc.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.avinc.com/uas/view/puma>
- [10] AUTOR NEUVEDEN. *army-technology.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.army-technology.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/1-image-10.jpg>
- [11] AUTOR NEUVEDEN. *archive.is* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://archive.is/rR2u/>
- [12] AUTOR NEUVEDEN. *archive.is* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://archive.is/rR2u/19d6c804122f8e2bd281dc08cf1174b73e58946a.png>
- [13] AUTOR NEUVEDEN. <http://www.bbsr.co.uk> [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.bbsr.co.uk/products/Blackstart-fixed-wing-UAV/>
- [14] AUTOR NEUVEDEN. <http://www.bbsr.co.uk> [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: http://www.bbsr.co.uk/images/tier/20_1_375x250.jpg
- [15] AUTOR NEUVEDEN. *prioria.com/* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.prioria.com/leviathan/>
- [16] AUTOR NEUVEDEN. <http://www.irvine-sensors.com/> [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.irvine-sensors.com/images/leviathan.png>
- [17] AUTOR NEUVEDEN. *robonic.fi* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: https://www.robonic.fi/wp-content/uploads/2015/08/IMG_3190_1000x650.jpg
- [18] AUTOR NEUVEDEN. *uavrl.com* [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW: http://uavrl.com/images/Launcher_G5_%20600.jpg

- [19] AUTOR NEUVEDEN. [api.ning.com](https://api.ning.com/files/26rh2i2B5MbU1fjuQeR34d700-fGz6zhBBYJmYoMCF8hOfx6esKTVwpLAuoMiGDizEZUfJZwFId*w0sKhJISA194KwwYZOVg/waspllllaunch.jg) [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW:
https://api.ning.com/files/26rh2i2B5MbU1fjuQeR34d700-fGz6zhBBYJmYoMCF8hOfx6esKTVwpLAuoMiGDizEZUfJZwFId*w0sKhJISA194KwwYZOVg/waspllllaunch.jg
- [20] AUTOR NEUVEDEN. <http://imagesvc.timeincapp.com> [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW:
<http://imagesvc.timeincapp.com/v3/foundry/image/?q=60&url=https%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fthe-drive-staging%2Fmessage-editor%252F1507822690771-hero-30.jpg>
- [21] AUTOR NEUVEDEN. [airforce-technology.com](https://www.airforce-technology.com/wp-content/uploads/sites/4/2017/09/3-car-top-launcher.jpg) [online]. [cit. 28.7.2018]. Dostupný na WWW:
<https://www.airforce-technology.com/wp-content/uploads/sites/4/2017/09/3-car-top-launcher.jpg>
- [22] *Cartridges of the World 11th Edition*, Book by Frank C. Barnes, Edited by Stan Skinner, Gun Digest Books, 2006, [ISBN 978-0-89689-297-2](https://www.amazon.com/dp/0896892972) pp. 490, 492
- [23] , AUTOR NEUVEDEN. [Skf.com](http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=61901&unit=metricUnit) [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z:
<http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=61901&unit=metricUnit>
- [24] Compotech Plus spol. s r.o., Tube Design [software]. Červen 2018. [přístup 31. 7. 2018].
- [25] AUTOR NEUVEDEN. [tprom.cz](http://www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli) [online]. [cit. 31.7.2018]. Dostupný na WWW:
<http://www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli>
- [26] AUTOR NEUVEDEN. [Hitecrd.com](https://hitecrd.com/products/servos/d-series-32-bit-programmable-servos/d-845wp-32-bit-monster-torque-waterproof-steel-gear-servo/product) [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z:
<https://hitecrd.com/products/servos/d-series-32-bit-programmable-servos/d-845wp-32-bit-monster-torque-waterproof-steel-gear-servo/product>

8 Seznam obrázků

- Obr. 1 RQ-11B Raven [4]
- Obr. 2 Skylark I LE [6]
- Obr. 3 EMT Aladin [8]
- Obr. 4 RQ-20B Puma AE [10]
- Obr. 5 Bayraktar Mini UAS [12]
- Obr. 6 Blackstart [14]
- Obr. 7 LEVIATHAN [16]
- Obr. 8 Pneumatický katapult[17]
- Obr. 9 Hydraulicko-pneumatický katapult [18]
- Obr. 10 Prak [19]
- Obr. 11 Startovací zařízení s výmetnicí [20]
- Obr. 12 Parazitní zařízení [21]
- Obr. 13 Koncept samostřílu
- Obr. 14 Koncept s pružným lanem
- Obr. 15 Schéma uspořádání pro start
- Obr. 16 Koncept s nábojem
- Obr. 17 ISO pohled na konstrukční návrh
- Obr. 18 Vnější popis
- Obr. 19 Popis vnitřních částí
- Obr. 20 Detail kolébky
- Obr. 21 Detail mechanismu spouště
- Obr. 22 Zdvojení mechanismu spouště
- Obr. 23 Schéma principu
- Obr. 24 Schéma pro výpočet klopného momentu od setrvačné síly
- Obr. 25 Schéma rozložení sil
- Obr. 26 Schéma zatížení přední kladky
- Obr. 27 Schéma pro výpočet klopného momentu od setrvačné síly
- Obr. 28 Graf průhybu vodící trubky
- Obr. 29 Schéma zatížení mechanismu
- Obr. 30 Rozložení sil na západce
- Obr. 31 Rozložení sil na vačce
- Obr. 32 Rozložení sil na táhlu
- Obr. 33 Rozložení sil na spoušti
- Obr. 34 Schéma namáhání smykem západky
- Obr. 35 Schéma zatížení čepu
- Obr. 36 Rozložení sil na vačce serva

9 Seznam tabulek

- Tab. 1 Dělení UAS podle NATO. Září 2009 [2]
- Tab. 2 Hlavní parametry RQ-11B Raven [3]
- Tab. 3 Hlavní parametry Skylark I LE [5]
- Tab. 4 Hlavní parametry EMT Aladin [7]
- Tab. 5 Hlavní parametry RQ-20B Puma AE[9]
- Tab. 6 Hlavní parametry Bayraktar Mini UAS[11]
- Tab. 7 Hlavní parametry Blackstart[13]
- Tab. 8 Hlavní parametry LEVIATHAN[15]
- Tab. 9 Požadavky letounu na startovací zařízení
- Tab. 10 Hodnotící tabulka stávajících koncepcí
- Tab. 11 Přehled požadovaných parametrů startovacího zařízení
- Tab. 12 Hlavní parametry koncepčního návrhu s pružnými listy
- Tab. 13 Hlavní parametry koncepčního návrhu s pružným lanem
- Tab. 14 Hlavní parametry koncepčního návrhu s výmetnicí
- Tab. 15 Porovnání hlavních parametrů všech koncepcí
- Tab. 16 Vstupní údaje aplikace Tube Design
- Tab. 17 Parametry navrženého zařízení

10 Seznam zkratk a symbolů

Kinetická energie letounu	E_k	[J]
Hmotnost letounu	m_{letoun}	[Kg]
Minimální rychlost letounu	v	[m/s]
Potenciální energie letounu	E_p	[J]
Gravitační zrychlení	g	[m/s ²]
Výška startu	h	[m]
Celková energie letounu	E_c	[J]
Práce pružiny	W_p	[J]
Síla	F	[N]
Prodloužení	Δy	[mm]
Maximální délka pružiny	y_2	[mm]
Délka předepjaté pružiny	y_1	[mm]
Tuhost pružiny	K	[N/mm]
Tuhost pružného lana Ø6mm	K_{6mm}	[N/mm]
Počet paralelně řazených pružin	n	[-]
Tuhost pružného lana Ø9mm	K_{9mm}	[N/mm]
Modul pružnosti v tahu lana	E	[MPa]
Plocha průřezu lana 1	A_1	[mm ²]
Plocha průřezu lana 2	A_2	[mm ²]
Délka lana	l	[mm]
Požadovaná tuhost pružiny	$K_{výsledný}$	[N/mm]
Síla v laně	F_{lano}	[N]
Hmotnost kolébky	$m_{kolébka}$	[Kg]
Zrychlení	a	[m/s ²]
Setrvačná síla letounu	$F_{setrvačná letounu}$	[N]
Klopný moment	$M_{klopný}$	[Nm]
Síla působící na ložisko	$F_{ložisko}$	[N]
Rameno 1	r_1	[mm]
Rameno 2	r_2	[mm]
Výsledná síla	$F_{výledná1}$	[N]
Normálová síla	F_n	[N]
Axiální složka normálové síly	F_a	[N]
Radiální složka normálové síly	F_{rad}	[N]
Výpočtový součinitel f_0	m	[Kg]
Základní statická citlivost	C_0	[kN]
Poměr axiálního a radiálního zatížení	e	[-]
Výpočtový součinitel X	X	[-]
Výpočtový součinitel Y	Y	[-]
Ekvivalentní zatížení ložiska	F_{ekv}	[N]
Úhlová rychlost	ω	[s ⁻¹]
Otáčky	n	[ot/min]
Životnost	L_h	[hod]
Základní dynamická únostnost	C	[kN]
Výpočtový součinitel p	p	[-]
Průměr kružnice	d	[mm]

Průměr kružnice přední kladky	d_{pk}	[mm]
Reakční síla v ložisku	F_r	[N]
Poloha lana v kritické pozici	y_p	[mm]
Reakční síla v bodě A ve směru X	A_x	[N]
Normálová reakční síla	R_n	[N]
Reakční síla v bodě A ve směru Y	A_y	[N]
Reakční síla v ose táhla	R_t	[N]
Složka reakční síly v táhle v ose X	R_{tx}	[N]
Složka reakční síly v táhle v ose Y	R_{ty}	[N]
Úhel svírající táhlo s osou X	α	[°]
Reakční síla v bodě B ve směru X	B_x	[N]
Reakční síla v bodě B ve směru Y	B_y	[N]
Rameno pro výpočet momentu 3	r_3	[mm]
Rameno pro výpočet momentu 4	r_4	[mm]
Rameno pro výpočet momentu 5	r_5	[mm]
Rameno pro výpočet momentu 6	r_6	[mm]
Reakční síla v bodě C ve směru X	C_x	[N]
Reakční síla v bodě C ve směru Y	C_y	[N]
Moment na spoušti	M_s	[Nm]
Mez kluzu	σ_k	[Nmm ⁻²]
Dovolené smykové napětí	τ_d	[Nmm ⁻²]
Součinitel pevnostní teorie	α	[-]
Smykové napětí	τ	[Nmm ⁻²]
Součinitel bezpečnosti	K	[-]
Dovolený tlak	P_d	[MPa]
Síla v díře v západce	$F_{díra_západka}$	[N]
Tlak	P	[MPa]
Reakční síla v podpoře	R_a	[N]
Ohybový moment	M_o	[Nm]
Polovina délky čepu	$l_{2čep}$	[mm]
Modul průřezu v ohybu	W_o	[mm ³]
Ohybové napětí	σ_o	[Nmm ⁻²]
Krutící moment serva dle katalogu	$M_{katalog}$	[Kg/cm]
Krutící moment serva	M_k	[Nm]
Síla v táhlu serva	$F_{táhlo\ serva}$	[N]
Rameno pro výpočet momentu 7	r_7	[mm]
Rameno pro výpočet momentu 8	r_8	[mm]
Rameno pro výpočet momentu 8	r_9	[mm]
Požadovaný krutící moment serva	$M_k\ požadovaný$	[Nm]
Síla v přední kladce	$F_{přední}$	[N]
Síla v zadní kladce	$F_{zadní}$	[N]

11 Seznam příloh

- Příloha 1.: Report z aplikace Tube Design [24]
- Příloha 2.: Výkres sestavy zařízení
- Příloha 3.: Výkres sestavy spoušťového mechanismu
- Příloha 4.: Výkres sestavy kolébky
- Příloha 5.: CD s 3D modelem

Příloha 1.: Report z aplikace Tube Design [24]

Customer specification sheet



CompoTech Plus s.r.o.
Družstevní 159
Sušice I. 342 01
Tel.: +420 376 521 131
Fax: +420 376 522 350
www.compotech.com
ondrej@compotech.com
vitek@compotech.com

Tube Name : **vodici_trubka V.1 R.0 CR.20c.xls**

Filename: vodici_trubka V.1 R.0 CR.20c.xls
Associated drawings : -
Designer : **O.Uher**
Date : 4.8.2018
Approved by : **O.Uher**

Parallel Tube	
Tube Weight :	0,22 Kg
Tube Length :	1160 mm
Left Internal Diameter :	26,0 mm
Left Outer Diameter :	29,0 mm
Left Wall Thickness :	1,5 mm
Right Internal Diameter :	26,0 mm
Right Outer Diameter :	29,0 mm
Right Wall Thickness :	1,5 mm

Loads and Mechanical Properties in Examined Cross Section	
Distance of Examined Cross Section from the Left Hand End:	600 mm
Bending Moment :	40,1 Nm
Internal Pressure :	0,0 MPa
Axial Force :	0,0 N
Torsional Moment :	0,0 Nm
Axial Young's Modulus of the Tube* :	107905 MPa
Tangencial Young's Modulus of the Tube* :	5414 MPa
Shear Modulus of Elasticity of the Tube* :	9321 MPa
Thermal Expansivity in Axial Direction* :	-1,5E-06 1/K
Therm. Expans. in Tangenc. Direction* :	5,9E-05 1/K
Bending Stiffness* :	1,3E+09 Nmm²
Torsional Stiffness* :	2,3E+08 Nmm²

Laminate							
Layer Nr.	Fibre Volume Fraction %	Type of Fibre	Layer Thickness* mm	Winding Angle* °	Axial Stress* MPa	Tangencial Stress* MPa	Torsion Shear* MPa
1	56	t700	0,991	3,12	55,85	0,00	0,00
2	56	t700	0,507	22,31	29,88	0,00	0,00

Bending - simply supported

Tube Length : **1160 mm**
1st Support Dist. from the Left End : **0 mm**
2nd Support Dist. from the Left End : **1160 mm**

Max. Bending Moment : **40,08 Nm**
Max. Bending Deflection : **2,16 mm**
Max. Def. with Shear : **2,28 mm**

Isolated Forces

635 N at 600 mm from the left end.
-566,37 N at 670 mm from the left end.