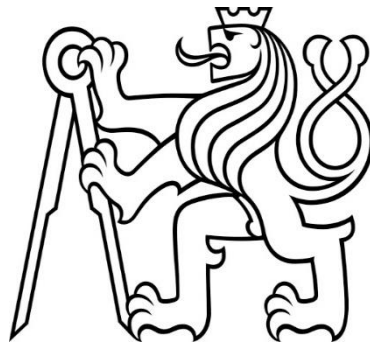


**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

*Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky*



**Bakalářská práce**

**FLYBOARD – úvodní studie provozních parametrů  
pilotovaného zařízení**

*FLYBOARD – The Preliminary Study of Operation Parameters of  
Piloted Flying Device*

**2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Světlík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **491189**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací 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:

**FLYBOARD - úvodní studie provozních parametrů pilotovaného létajícího zařízení.**

Název bakalářské práce anglicky:

**FLYBOARD - The Preliminary Study of Operation Parameters of a Piloted Flying Device.**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod - cíle - rešerše dosaženého stavu obdobné techniky (30 %)
  2. Definice požadovaného provozního profilu létajícího zařízení (10 %)
  3. Stanovení základních technických parametrů zařízení (40 %)
    - 3.1 Návrh propulzní jednotky
    - 3.2 Rozbor aerodynamických vlivů na stabilizaci letu
    - 3.3 Ověření energetické zásoby
  4. Studie letounu - konstrukční část (10 %)
  5. Závěr - navazující aktivity (10 %)
- Rozsah práce 6,000-9,000 slov

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Prokop, MBA ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Petr Prokop, MBA  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Michal Schmirler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „FLYBOARD – úvodní studie provozních parametrů pilotovaného létajícího zařízení“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a použil jsem pouze zdroje uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Jan Světlík

## Anotační list

Název práce	FLYBOARD – úvodní studie provozních parametrů pilotovaného létajícího zařízení FLYBOARD – The Preliminary Study of Operation Parameters of a Piloted Flying Device
Autor	Jan Světlík
Studijní program	Teoretický základ strojního inženýrství
Akademický rok	2021/2022
Druh práce	Bakalářská
Ústav	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí práce	Ing. Petr Prokop, MBA

### Klíčová slova

Flyboard, Multikoptéra, Bezkartáčový stejnosměrný motor, Vrtule, Metoda nejmenších čtverců

### Keywords

Flyboard, Multicopter, Brushless DC motor, Propeller, Least squares method

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá úvodní studií flyboardů. Flyboard je létající multikoptéra, která se řídí kromě regulací propulzních jednotek změnou polohy těžiště pilota. V první části práce je provedena rešerše aktuálních obdobných zařízení. V další části je popsáno, jak by se flyboard mohl pohybovat a řídit. Následující kapitola rozebírá jeden z možných přístupů pro stanovení základních technických parametrů zařízení. Tato kapitola popisuje výběr motorů, akumulátorů a vrtulí. V konstrukční části se práce zaměřuje na návrh konkrétního flyboardu podle vypočítaných technických parametrů.

## Abstract

This bachelor thesis deals with the introductory study of flyboards. Flyboard is a flying multicopter, which is controlled in addition to the regulation of propulsion units by changing the position of the pilot's center of gravity. In the first part of the work, a search of current similar devices is performed. The next section describes how the flyboard could move and steer. The following chapter discusses one of the possible approaches for determining the basic technical parameters of the device. This chapter describes the selection of engines, batteries and propellers. In the construction part, the work focuses on the design of a specific flyboard according to the calculated technical parameters.

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Prokopovi, MBA za skvělé vedení bakalářské práce, při kterém poskytoval mnoho odborných a cenných rad. Dále za jeho trpělivost, vstřícnost a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Papežovi za jeho praktické rady o konstrukci multikoptér. Chtěl bych také poděkovat Ing. Bc. Zdeňkovi Padovcovi, Ph.D. za cenné rady o pevnostním návrhu konstrukce. Mé poděkování patří prof. Ing. Jaroslavu Novákovi za informace o elektrických pohonech. Za jazykovou korekturu bych rád poděkoval Mgr. Lence Perutce. Závěrem chci poděkovat mým blízkým a rodině za podporu během studia.

## Obsah

1. Úvod - cíle .....	13
2. Rešerše aktuálního stavu obdobné techniky .....	14
2.1. Human flying drone.....	15
2.2. Airboard.....	16
2.3. Omni Hoverboard.....	17
2.4. Skysurfer.....	18
2.5. Zhodnocení a vyvození doporučení .....	19
3. Definice požadovaného provozního profilu létajícího zařízení .....	20
3.1. Vertikální let .....	21
3.2. Horizontální let .....	21
3.3. Otočení se na místě .....	22
3.4. Let po oblouku .....	22
3.5. Obecný pohyb.....	22
3.6. Zhodnocení a shrnutí.....	22
4. Stanovení základních technických parametrů zařízení .....	22
4.1. Návrh propulzní jednotky .....	23
4.1.1. Návrh a výpočet motoru .....	24
4.1.2. Návrh a výpočet vrtule .....	28
4.2. Rozbor aerodynamických vlivů na stabilizaci letu.....	33
4.3. Ověření energetické zásoby.....	35
4.4. Bilance hmotnosti.....	36
4.5. Stanovení letových parametrů.....	36
4.5.1. Vertikální let .....	36
4.5.2. Horizontální let.....	38
4.5.3. Let po kruhu .....	39
4.6. Shrnutí základních technických parametrů .....	40

5. Studie letadla – konstrukční část.....	41
5.1. Trubky rámu .....	42
5.2. Spojka rámu .....	43
5.3. Patka motoru .....	45
5.4. Přistávací patka .....	45
5.5. Rám akumulátorů .....	46
5.6. Klec akumulátorů.....	47
5.7. Deska.....	47
5.8. Sestava navrhovaného flyboardu.....	48
6. Závěr – navazující aktivity .....	49
7. Zdroje.....	51
8. Seznam příloh .....	54



## Seznam použitých symbolů a zkratek

$a_{\text{hormax}}$	$[\text{ms}^{-2}]$	Maximální horizontální zrychlení
$a_{\text{vertmax}}$	$[\text{ms}^{-2}]$	Maximální vertikální zrychlení
$C_{\text{xvert}}$	[1]	Vertikální součinitel aerodynamického odporu
$C_{\text{xhor}}$	[1]	Horizontální součinitel aerodynamického odporu
$E_{\text{akumulátoru}}$	[J]	Energie akumulátoru
$F_{\text{hormax}}$	[N]	Maximální horizontální síla
$F_{\text{t}}$	[N]	Tíhová síla
$F_{\text{tahmaxmotoru}}$	[N]	Maximální tahová síla motoru
$F_{\text{vertmax}}$	[N]	Maximální vertikální síla
$F_{\text{vrtule}}$	[Lbf]	Tahová síla vrtule
$g$	$[\text{ms}^{-2}]$	Tíhové zrychlení
$I$	[A]	Elektrický proud
$I_{\text{max}}$	[A]	Maximální elektrický proud
$I_{\text{s}}$	[A]	Maximální teoretický elektrický proud
$I_0$	[A]	Elektrický proud naprázdno
$k_{\text{T}}$	$[\text{Nm}/\text{A}]$	Momentová konstanta
$k_{\text{v}}$	$[\text{V}^{-1}\text{min}^{-1}]$	Otáčková konstanta
$m$	[kg]	Hmotnost flyboardu a pilota
$m_{\text{akumulátoru}}$	[kg]	Hmotnost akumulátoru
$m_{\text{motoru}}$	[kg]	Hmotnost motoru
$m_{\text{užitečná}}$	[kg]	Užitečná hmotnost flyboardu
$M_{\text{k}} (M)$	[Nm]	Kroutící moment
$M_{\text{ks}}$	[Nm]	Záběrový moment
$M_{\text{vrtule}}$	[In-Lbf]	Kroutící moment vrtule
$n_{\text{akumulátoru}}$	[1]	Počet akumulátorů
$n_{\text{pohonných jednotek}}$	[1]	Počet pohonných (propulzních) jednotek
$n$	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky
$n_{\text{vrtule}}$	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky vrtule
$n_0$	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky naprázdno
$P$	[W]	Výkon
$P_{\text{celkový}}$	[W]	Celkový výkon
$P_{\text{hříděl synchron}}$	[W]	Maximální synchronizovaný výkon na hřídeli

$P_{\max}$	[W]	Maximální výkon
$P_{\text{vrtule}}$	[Hp]	Výkon vrtule
$P_{\text{vrtule vis}}$	[W]	Výkon vrtule ve stavu visení
$P_{\text{zbytkový}}$	[W]	Zbytkový výkon
$q$	[1]	Tahový poměr
$q_P$	[1]	Výkonový poměr
$q_{\text{stab}}$	[1]	Míra možné regulace tahu poloviny motorů
$Q_{\text{akumulátoru}}$	[mAh]	Kapacita akumulátoru
$R_i$	[ $\Omega$ ]	Vnitřní odpor
$S_{\text{hor}}$	[m <sup>2</sup> ]	Horizontální průřez
$S_{\text{vert}}$	[m <sup>2</sup> ]	Vertikální průřez
$t_{\min}$	[s]	Minimální čas letu flyboardu
$U_{\text{akumulátoru}}$	[V]	Napětí akumulátoru
$U_{\max}$	[V]	Maximální napětí
$V_{\text{hor}}$	[ms <sup>-1</sup> ]	Horizontální rychlost
$V_{\text{hor max}}$	[ms <sup>-1</sup> ]	Maximální horizontální rychlost
$V_{\text{vert max}}$	[ms <sup>-1</sup> ]	Maximální vertikální rychlost
$\alpha$	[°]	Úhel náklonu
$\alpha_{\text{krit}}$	[°]	Kritický úhel náklonu
$\eta$	[1]	Účinnost
$\rho$	[m]	Poloměr křivosti
$\rho_{\text{vzduchu}}$	[kgm <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost

## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Létající vodní stroj [1] .....	14
Obr. 2.1 Human flying drone Caseho Neistata [3] .....	15
Obr. 2.2 Aiboard [4] .....	16
Obr. 2.3 Omni Hoverboard [9] .....	18
Obr. 2.4 Skysurfer [11] .....	19
Obr. 4.1 Schéma propulzní jednotky [16] .....	23
Obr. 4.2 Otáčková charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv .....	25
Obr. 4.3 Proudová charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv .....	26
Obr. 4.4 Výkonová charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv .....	26
Obr. 4.5 Charakteristika účinností motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv .....	27
Obr. 4.6 Kompletní charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv .....	28
Obr. 4.7 Závislost otáček motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E .....	29
Obr. 4.8 Kontrolní graf snižování výkonu podle momentu motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E .....	30
Obr. 4.9 Závislost kroutícího momentu motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E .....	31
Obr. 4.10 Závislost tahové síly na výkonu motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E .....	32
Obr. 4.11 Závislost výkonu motoru na tíhové síle na jeden motor Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E .....	33
Obr. 4.12 Kritický úhel alfa pro navrhovaný flyboard .....	33
Obr. 4.13 Využití poloviny motorů v závislosti na náklonu pro navrhovaný flyboard .....	34
Obr. 4.14 Vektorový rozklad sil při vertikálním letu .....	37
Obr. 4.15 Vektorový rozklad sil při horizontálním letu .....	38
Obr. 4.16 Vektorový rozklad sil při letu po kružnici .....	39

Obr. 4.17 Závislost nejmenšího poměru oblouku při dané rychlosti .....	40
Obr. 5.1 Pracovní náčrt rozložení vrtulí .....	42
Obr. 5.2 Trubky rámu .....	43
Obr. 5.3 Spojka rámu pohled 1 .....	44
Obr. 5.4 Spojka rámu pohled 2 .....	44
Obr. 5.5 Patka motoru .....	45
Obr. 5.6 Patka motoru s namontovaným silentblokem [28] .....	46
Obr. 5.7 Patka motoru odlehčovací tvar .....	46
Obr. 5.8 Klec akumulátorů .....	47
Obr. 5.9 Pohled zespoda na spodní desku .....	48
Obr. 5.10 Sestavený navrhovaný flyboard [13; 22; 28; 29; 30; 31; 32] .....	48

## Seznam tabulek

Tab. 4.1 Parametry motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv [17].....	24
Tab. 4.2 Spočtené maximální provozní výstupní parametry motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv .....	28
Tab. 4.3 Data vrtule 27x13E [19] .....	29
Tab. 4.4 Základní technické parametry navrhovaného flyboardu .....	40

## 1. Úvod - cíle

S čím dál masovějším létáním dronů s kamerou a stavěním RC letadel začaly vznikat projekty, které měly za cíl postavit z dostupných součástek stroj natolik velký, aby unesl člověka. To se podařilo. Rád bych na to navázal svým návrhem létajícího stroje.

Svůj stroj jsem se rozhodl označit jako flyboard, protože obdobná zařízení nejsou zaštitěna jediným společným názvem. Českým ekvivalentem by bylo letící prkno. Do češtiny se slova, jako je skateboard a snowboard, doslovně nepřekládají, a proto jsem se rozhodl užít anglické označení, jelikož obdobné se už ujalo i u vodních létajících strojů.

Flyboard je lehký a malý létající dopravní prostředek pilotovaný jedním člověkem, který pro překonání zemské tíže využívá více rotujících ploch. Jedná se o specifický druh multikoptéry. Flyboard pro svůj pohyb v prostoru bude využívat kromě regulací výkonů jednotlivých motorů i vychýlení těžiště pilota, který na flyboardu stojí, tím se bude odlišovat.

Jelikož flyboard má poměrně krátký dolet v porovnání s jinými létajícími dopravními prostředky, chtěl bych svou práci zaměřit hlavně na jeho sportovní využití. Za funkční a již provozované předchůdce flyboardu bych označil létající vodní stroje, které ovšem potřebují externí zdroj pohonu, a to je limituje v letu pouze několik metrů nad hladinou. Flyboard by teoreticky mohl být jejich nástupcem a umožnit lidem létat kdekoliv, kde je vhodná atmosféra.



*Obr. 1.1 Létající vodní stroj [1]*

Závody s flyboardy by mohly poskytnout levnější ekvivalent k soutěžím, jako byl například známý Red Bull Air Race, ve kterém měl pilot za úkol v letadle proletět co nejrychleji závodní trať.

Cílem této práce je prostudovat teorii a předvést postup, jak by se mohl flyboard navrhovat tak, aby byl bezpečný, co nejvíce kompaktní a vhodný pro sportovní využití. Dalším cílem je navrhnout konkrétní flyboard, který by byl letuschopný.

## 2. Rešerše aktuálního stavu obdobné techniky

V této části práce bych rád porovnal již některé postavené flyboardy a podobná zařízení. Vzhledem k tomu, že většina strojů je dílem domácích kutilů, kteří svá díla prezentovali jen formou videí a obrázků na sociálních sítích, využiji dat z textů, kterými svoje média popsali. Některé stroje autoři připravují ke komerčnímu prodeji, detailnější informace je tak složitější získat. Dále se pokusím co nejvíce parametrů naměřit a odhadnout.

Měření provedu optickou metodou na internetové stránce [eleif.net/photo\\_measure.html](http://eleif.net/photo_measure.html). Tato metoda funguje tak, že do stránky dáme kótu

na předmět, u kterého známe rozměry. Této referenční kótě přiřadíme známý rozměr, stránka nám pak umožní dávat do fotky další kóty, u kterých ukáže rozměr, jenž spočítá díky referenční kótě. Aby bylo měření přesné, je nutné zajistit, aby všechny měřené body ležely v jedné rovině stejně vzdálené od roviny objektivu pořizovacího zařízení. Tato podmínka je těžko realizovatelná, a tak nám tato metoda přinese přibližné rozměry, které jsou vhodné pro porovnání. [2]

### 2.1. Human flying drone

Jeden z prvních, kdo tuto tematiku velmi popularizoval, byl v roce 2016 americký kutil Casey Neistat. Ten ve svém videu tvrdí, že v době, kdy daný videozáznam natáčel, neexistovaly drony, jež by unesly člověka, a tak si jeden postavil. Ačkoliv Casey svůj dron neovládá vlastní vahou, protože je zavěšen na laně, rád bych ho zde uvedl, protože jako jeden z prvních prokázal schopnost postavit multikoptéru, která by unesla člověka v poměrně velké výšce. Ve videu letí ve výšce řádu desítek metrů, takže jeho zařízení by mohlo být schopné létat bez přízemního efektu.

Jeho obří dron má 8 ramen rozložených po kruhu a na jejich koncích se nachází celkem 16 motorů, na každém rameni jsou tedy dvě protiběžné vrtule. Výše zmíněnou metodou jsem odhadl největší rozměry jeho dronu na 2 metry. Vrtuli jsem naměřil jako 26 palcovou. Konstrukce je tvořena dvěma deskami, ve kterých začínají všechna ramena. Na vrchní desce jsou umístěny akumulátory. Přistávací zařízení je řešeno rámovou konstrukcí, jež vychází ze spodní desky. [3]



*Obr. 2.1 Human flying drone Caseho Neistata [3]*

## 2.2. Airboard

Konstruktér Airboardu Jeff Elkins lítal na již zmíněných vodních zařízeních zobrazených v úvodu a od roku 2016 staví, testuje a vylepšuje svůj Airboard. Rád bych představil jeho nejnovější zařízení Airboard 2.0.

Airboard je postaven do čtvercového půdorysu, jeho strana může mít přes 3 metry. Výška, ve které pilot po přistání stojí od země, je přes 50 cm. Airboard je tak největším zařízením, které zde porovnám.

Airboard stojí na hliníkových profilech a nad nimi je vidět prostor, kde jsou uschovány akumulátory. Na nich se nachází místo pro pilota, z něhož vychází 4 ramena, na kterých jsou umístěny dva protiběžné motory, jež pohánějí velké vrtule větší než 35 palců. Regulátory jsou poblíž motorů na jejich ramenou. Zajímavá je konstrukce pro ochranu pilota, která je tvořena rámem a síťovinou mezi ním. Síť zabraňuje pádu pilota do prostoru vrtulí, ale nechrání ho při případném lomu vrtule. Pilot nemá nohy pevně uloženy, ale dokáže se naklápět, proto má Airboard pevné hole, které mají v rukojeti řídicí prvky pro pilota. Přistávací zařízení je tvořeno ze 4 hliníkových ližin uspořádaných do kříže. [4]

Airboard je dle mého názoru zbytečně velký, a to zejména kvůli ochranné konstrukci, která by šla lépe upravit posunutím vrtulí pod úroveň pilotových chodidel. Z toho důvodu na mě stroj působí dosti nemotorně pro sportovní využití.



Obr. 2.2 Aiboard [4]



### 2.3. Omni Hoverboard

Videa o tomto projektu se začínají objevovat na YouTube od roku 2015. V porovnání s ostatními projekty je tento stroj nejmenší. V době svého vzniku držel Guinnessův světový rekord v nejdelší uletěné vzdálenosti hoverboardu. Hoverboard je dopravní prostředek, který se vznáší pouze pár metrů nad zemí, nicméně jeho další vývoj a testování vedly k létání ve volném prostoru. [5]

Jako motory byly použity RotoMax 1.60. Z této reference jsem odhadl šířku na 2 metry a vrtule jako 21 palcové. Konstrukce je tvořena jednou hlavní trubkou, ze které vychází 8 ramen, na nichž je 8 tlačných motorů. Akumulátory jsou připevněny pod hlavní trubku. Přistávací zařízení je tvořeno 4 zahnutými nohama vycházejícími na koncích ze spodní části hlavní trubky. Díky prohnutí dokážou nohy více pružit a to umožňuje měkčí přistání. Nosný rám je vyroben z kompozitních uhlíkových vláken. Pilot je napevno uchycen skrze snowboardové vázání, které se nachází na koncích hlavní trubky a je umístěno na horní části. Konstrukce je vyztužená třetivami, jež mohou mít i ochrannou funkci. Řídící prvek drží pilot v ruce a je spojen kabelem s Omni Hoverboardem. Výhodou konstrukce je voděodolnost, která umožňuje létat nad vodou, kde jsou bezpečné pády, aniž by byl při nich stroj zničen. [6; 7; 8]

Celkový výkon Omni Hoverboardu je okolo 24 kW, což je poměrně málo, ale díky tomu je hodně kompaktní. Dolet stroje je minimální, pohybuje se okolo jedné a půl minuty. Omni Hoverboard je ovládán jen prostřednictvím řídicí páky, která reguluje celkový výkon stroje, vyrovnání si musí provést pilot sám pomocí své váhy. Tato forma řízení není pro každého a může být velmi nebezpečná. K vyrovnávání je potřeba mnohého tréninku, který je nejprve prováděn s jištěním na laně. [6; 7; 9]



Obr. 2.3 Omni Hoverboard [9]

#### 2.4. Skysurfer

Projekt Skysurfer je ze všech nejnovější, první prototyp je z roku 2020. Autor Hunter Kowald své zařízení představuje jako nejsilnější, nejkompaktnější a nejbezpečnější ultralight letadlo, na kterém stojí člověk. [10]

Šířka Skysurferu může být okolo 2,5 metrů, jeho vrtule jsou 27 palcové. Konstrukce je velmi obdobná jako u Omni Hoverboardu. Skysurfer má hlavní část rámu, z kterého vede 8 ramen, motorů s tlačnými vrtulemi má ale 10, protože dvě vrtule se nachází pod hlavní částí rámu. Toto řešení nepovažuji za příliš optimální, protože tyto dvě vrtule nebudou vhodně obtékány. Na hlavní části rámu můžeme nalézt opět snowboardové vázání a pod ním akumulátory a další elektroniku. Přistávací zařízení je tvořeno čtyřmi tyčemi kolmými k zemi, které vycházejí ze 4 krajních ramen. Celý rám je tvořen z kompozitu z uhlíkových vláken. Ovládací zařízení drží pilot v ruce. Na rozdíl od Omni Hoverboardu je signál přenášen skrze rádiové vlny. [10; 11]

Kowald ke svému zařízení uvádí až skoro neuvěřitelné parametry, jež naměřil pilot o hmotnosti 84 kg: [10]

- Stroj dokáže zvednout 226,8 kg.
- Na míru dělaná uhlíková konstrukce byla testována s koeficientem bezpečnosti 1,5 a unesla 340,2 kg.
- Až dva motory mohou selhat, přesto je stroj schopen bezpečně přistát.
- Stroj je vybaven separátními zdroji energie, při selhání jednoho je stroj schopen bezpečně přistát.

- V případě nouze pro zvýšení tahu je vrtule schopna prorazit rychlost zvuku a vydržet v této rychlosti.
- Rychlost zařízení může být 80 km/h.
- Vydrží létání 20+ minut.
- Žádný výškový limit (tímto Kowald nejspíše poukazuje na to, že stroj není pouze jen hoverboard).

Skysurfer je dle mě velmi dobře optimalizován a svými výkony vhodný pro náročnější sportovní využití. Myslím si, že díky svým parametrům je to nejlepší z porovnávaných zařízení. Použití separátních systémů přispívá k větší bezpečnosti. [10]



Obr. 2.4 Skysurfer [11]

## 2.5. Zhodnocení a vyvození doporučení

Aby byl flyboard co nejkompaktnější, je vhodné využít oválného rozložení vrtulí okolo nohou pilota, tak jako to má Omni Hoverboard, a také využít hlavní části rámu, na nichž budou napojena nosná ramena. Vrtule pod hlavní částí rámu nebudou, tento prostor je vhodný pro konstrukci přistávacího zařízení, které by mělo být dostatečně pružné, aby zvládlo i tvrdá přistání. Na vrchní straně hlavní části rámu je vhodné umístit snowboardové vázání.

Pro to, aby mohl mít stroj ještě více výkonu o podobné velikosti, je vhodné použít protiběžné vrtule. Vrtule musí být umístěny tak, aby byly z důvodu bezpečnosti pod úrovní pilota. Toto řešení umožní snížit hmotnost o konstrukci nutnou pro ochranu pilota.

Materiál rámu flyboardu by měl být z kompozit z uhlíkových vláken. Tento materiál vykazuje výhodu vysoké měrné hmotnosti. Další výhodou je technologičnost, která umožňuje výrobu trubek nestandardního profilu na míru. Tento profil se může i měnit. Nevýhodou je nehomogenita, která zhoršuje u kompozitu kontrolu. [12] Pohonné komponenty jsou z modelářského prostředí, nebo jsou vyrobeny na míru. U strojů můžeme vidět bezkartáčové stejnosměrné motory, regulátory a Li-Pol akumulátory. [6]

Další vhodné vlastnosti pro zvýšení bezpečnosti jsou voděodolnost a nehořlavost. Pohon by měl být konstruován odděleně tak, aby při selhání nějaké části stroje bylo zařízení schopné bezpečně přistát. Stroj by neměl mít naklánění ovládané pouze těžištěm pilota, ale i regulací výkonů jednotlivých motorů tak, aby se flyboard nedostal do polohy, ze které by hrozilo zřícení. Pilot by měl být zvukovými a grafickými signály na displeji řídicího zařízení informován a varován v případě nebezpečí. Dalším aspektem pro bezpečnost je trénovanost pilota, jenž by měl být fyzický zdatný pro létání na flyboardu. Pilot by dále měl být seznámený s pilotáží a nebezpečím plynoucím z létání.

### 3. Definice požadovaného provozního profilu létajícího zařízení

Nejdříve je nutné dopravit flyboard do prostoru, kde je možné létat. Před letem je potřeba flyboard připravit, a to nabitím akumulátorů a kontrolou celého stroje, zejména provést zkoušky všech motorů, jestli správně fungují. Flyboard je vhodné používat jen za dobrého počasí, zejména za optimálních povětrnostních podmínek.

Flyboard bude startovat z vodorovné zpevněné plochy, po nabrání dostatečné výšky se bude pohybovat podle různých režimů letu, které mu umožní pohyb ve volném prostoru. Flyboard je dle mého názoru vhodné řídit kombinací faktorů, jak pilotem, tak řídicí jednotkou. Tato kombinace spojení člověka se strojem umožní velmi intuitivní ovládání, ale na druhou stranu jsou v záloze elektrická omezení, která budou chránit pilota před pádem. Přistání bude probíhat po vyrovnaní a následném pomalém snižování výšky až k dosednutí.

Flyboard by měl být vybaven malým počítačem se senzory a GPS modulem, při čemž jsou tyto komponenty schopny měřit náklon, zrychlení, výšku a polohu. To umožní pohyb jako u běžných multikoptérových dronů. Tento letový režim bude

výhodný pro méně zkušené piloty, jimž může být nápomocný při výuce létání. Výhodný bude pro přiblížení na přistání, nebo visení ve vzduchu, či klidný let. Pilot fyzicky nic nedělá, po vychýlení se stroj okamžitě vrací do letu, který je mu předdefinován, a to ovládacím zařízením nebo programem. [13]

Další možností bude letový režim, do kterého se zapojí aktivně pilot. Tento režim je vhodný pro rychlé sportovní létání. Flyboard se nemusí hned vyrovnávat, to znamená, že nemusí snižovat výkon na vrtulích, které jsou náklonem postaveny výše oproti jiným. Pilot tak náklonem udává směr a rychlost letu. Po překročení určitého náklonu se začne flyboard vyrovnávat kvůli bezpečnosti tak, aby vždy dokázal letět, aniž by nechtěně ztrácel výšku. Takto si pilot může elektronicky omezit výkony svého flyboardu, aby byl pro něj bezpečný. Níže je podrobněji uvedeno, jak by se jednotlivé pohyby vykonávaly.

### 3.1. Vertikální let

Pilot tento let fyzicky ovlivnit nemůže, jde o rovnováhu mezi vztlakovými silami motorů a tíhovou silou. Výšku tak bude měnit pomocí regulační páky na svém řídicím zařízení, které bude držet v ruce.

Stoupání nemusí být nijak elektronicky omezeno. Maximální výška je fyzicky omezená strukturou atmosféry, protože ve větší výšce je menší hustota vzduchu a tím vrtule ztrácí tah. Dalším omezením jsou akumulátory, které zvládnout dodávat energii jen v omezeném čase.

Klesání bude vykonáno prostřednictvím snížení výkonů motorů. Elektronicky by mělo být omezeno tak, aby nedošlo k pádu. Také je potřeba snížit rychlost klesání při přistání, hlavně při dosedání. Minimální výška je daná terénem.

### 3.2. Horizontální let

Horizontálního let pilot fyzicky ovlivnit může, a to svým náklonem. Pilot poletí tím směrem, kterým se nakloní. Regulační páku v tomto případě nepoužívá, stroj se udržuje v konstantní výšce. Před překročením tak velkého náklonu, který by stroj nedokázal vybalancovat, bude pilot varován, stroj se začne vyrovnávat. Pokud by se překročila i tato hranice, stroj se vyrovná, ale ztratí u toho výšku.

### 3.3. Otočení se na místě

Do tohoto manévru nemůže pilot opět zasáhnout. Vrtule stroje se otáčí tak, že každé dvě sousední vrtule se otáčí jiným směrem. Otočka by byla tedy provedena tím způsobem, že by se snížil výkon u poloviny motorů, které se otáčí stejným směrem. K ovládání tohoto pohybu by sloužila další regulační páka, či tlačítko na řídicím zařízení.

### 3.4. Let po oblouku

Poté, co pilot získá nějakou dopřednou rychlost, může pomocí aktivního náklonu do strany provést let po oblouku. Jde o speciální případ horizontálního letu.

### 3.5. Obecný pohyb

Flyboard je v podstatě schopen vykonávat složením předchozích popsáných pohybů jakýkoliv obecný pohyb, vše záleží na schopnostech pilota a daném nastavení řídicí jednotky. Dokonce by dokázal udělat i salto s pilotem, ovšem za cenu ztráty výšky.

### 3.6. Zhodnocení a shrnutí

Největší provozní omezení představují akumulátory, které dovolují flyboardu provoz v řádu minut. Dalším omezením jsou zákony upravující provoz ve vzdušném prostoru. Flyboard také limituje již zmíněné počasí, jelikož akumulátory je vhodné udržovat při správné teplotě nad 0° C.

Až na tyto omezení je flyboard schopný se pohybovat téměř všude. Letový režim záleží na elektronickém nastavení stroje, pilotovi a cíli letu. Flyboard je možné využít v rámci rychlého sportovního letu mezi pylony až po klidný pozorovací let.

## 4. Stanovení základních technických parametrů zařízení

Aby flyboard dokázal létat, musí překonat tíhovou sílu podle upraveného druhého Newtonova zákona:

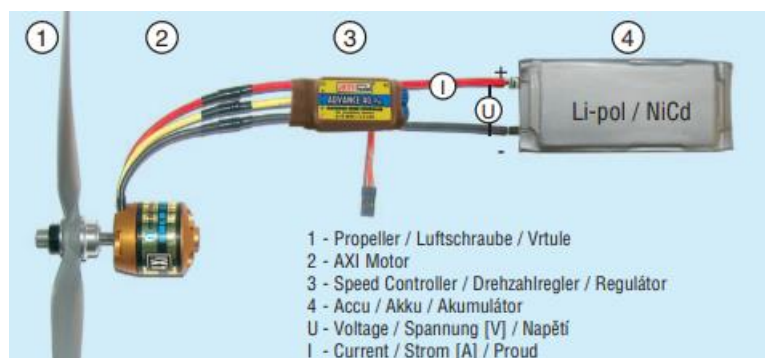
$$F_t = mg \tag{4.1}$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení a  $m$  je hmotnost celého stroje i s hmotností pilota. Propulzní jednotky musí poskytovat v součtu větší vztlakové síly, než je tíhová síla.

Potřebné je volit takové komponenty, které při co nejmenší hmotnosti umožní co největší tah.

#### 4.1. Návrh propulzní jednotky

Pro pohon byl vybrán bezkartáčový stejnosměrný motor, který pohání vrtuli, jež rotačním pohybem generuje vztlakovou sílu. Tento typ motoru je velmi spolehlivý, dobře regulovatelný a oproti jiným elektrickým motorům vyniká dobrým poměrem výkonu ke své hmotnosti. Spolehlivost je dána jednoduchou konstrukcí, protože nejsou použity mechanické kartáče, jenž by se mohly opotřebovat. Mechanické kartáče jsou nahrazeny elektronicky v regulátorech. Další výhodou je vysoká účinnost. Nebezpečím může být Curierova teplota, která může způsobit odmagnetování permanentních magnetů, ovšem tomu se dá předejít chlazením vrtulí a nepoužíváním motoru nad jmenovité hodnoty. Energii motorům budou dodávat Li-pol akumulátory. Ty se vyznačují dobrým poměrem uskladněné energie ke své hmotnosti. Na následujícím obrázku je ukázán celý pohonný mechanismus: [14; 15]



Obr. 4.1 Schéma propulzní jednotky [16]

Vzhledem k náročnosti úlohy jsem si vypracoval vlastní skript v softwaru Matlab, který umožňuje uskutečnit celý výpočet v řádu minut. To je vhodné pro iterační postup, při kterém se zvolí vstupní parametry a zadají data z jednotlivých částí pohonného systému. Skript je opatřen logickými funkcemi, které výpočet zastaví v případě, že by už v nějaké jeho části nebyl návrh letuschopný, po opravě lze pokračovat. Pokud jsou logické podmínky splněny, skript vypočítá základní technické charakteristiky flyboardu. Část skriptu viz příloha č.2.

Jako vstupní parametr musíme zvolit celkovou hmotnost  $m$ , která se skládá z hmotnosti pilota, kterou jsem zvolil 105 kg, a hmotnosti Flyboardu. Druhým vstupním parametrem je číslo  $n_{\text{pohonných jednotek}}$ , které bude udávat počet

propulzních jednotek. Po několika pokusech jsem dospěl k hmotnosti m s 255 kg a počtu pohonných jednotek 16.

#### 4.1.1. Návrh a výpočet motoru

Prvním komponentem, jenž se vybere, je motor. Na trhu je velký výběr modelářských motorů. Výrobci udávají poměrně podobné základní údaje o svých motorech, z nichž lze zjednodušeným výpočtem sestavit charakteristika motoru pro různé motory na trhu. Prodejci ovšem většinou bohužel neuvádějí proměřené charakteristiky. Vybral jsem motor Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv. Tento prodejce udává navíc maximální napětí. V následující tabulce jsou uvedena data od prodejce s označením fyzikálních veličin, které se použijí pro výpočet charakteristiky: [17; 18]

Tab. 4.1 Parametry motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv [17]

Maximální proud	$I_{\max}$	170 A
Maximální napětí	$U_{\max}$	44 V
Otáčková konstanta	$k_v$	$167 \text{ V}^{-1}\text{min}^{-1}$
Maximální výkon	$P_{\max}$	7992 W
Vnitřní odpor	$R_i$	$0,021 \Omega$
Proud naprázdno	$I_0$	4,5 A
Hmotnost motoru	$m_{\text{motoru}}$	2074 g

První závislost, která se sestaví, bude lineární závislost mezi momentem a otáčkami. Pro sestavení se použijí dva body, a to režim chodu motoru na prázdno a teoretický režim záběrového momentu, kdy se motor neotáčí. Obecně pro motor se vypočítá napětí jako součin napětí akumulátorů v součinu s jejich počtem, proto je nutné už v tomto bodě si zvolit akumulátory, které jsou prodejcem motoru doporučeny. Vybral jsem akumulátor s napětím 22,8 V. Počet akumulátorů v sérii bude dva. Pro výpočet otáček na prázdno se využije následující rovnice:

$$n_0 = k_v(n_{\text{akumulátoru}} \cdot U_{\text{akumulátoru}} - R_i \cdot I_0) \quad (4.2)$$

kde součin vnitřního odporu a proudu naprázdno je napětí na prázdno, jenž je potřeba pro překonání vnitřního odporu motoru. Dále je nutné určit momentovou konstantu:

$$k_T = \frac{60}{k_v \cdot 2 \cdot \pi} \quad (4.3)$$

Následně lze určit maximální výpočetní teoretický proud:

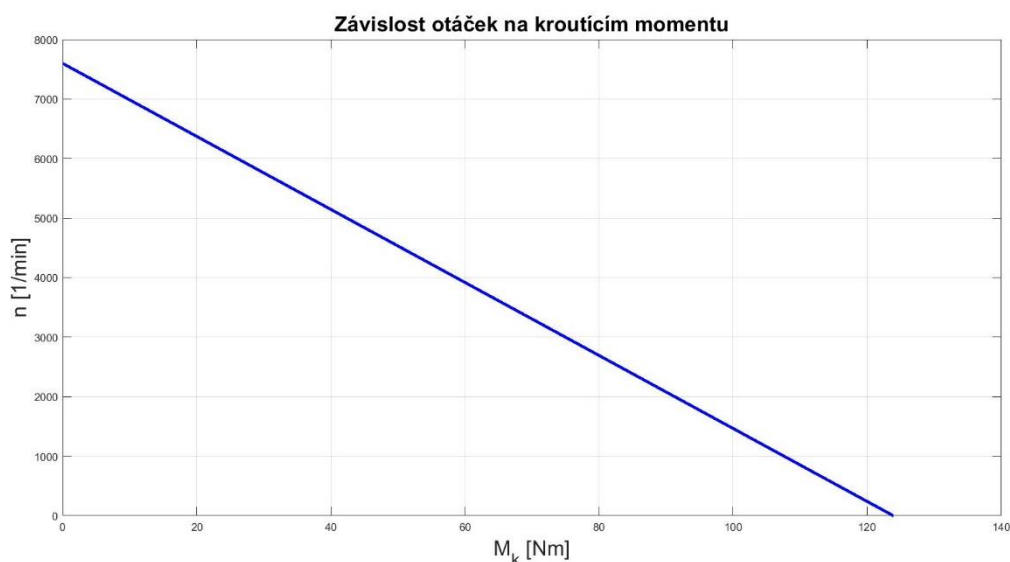


$$I_s = n_{akumulátoru} \cdot \frac{U_{akumulátoru}}{R_i} \quad (4.4)$$

Nyní je možné vypočítat záběrový moment podle rovnice:

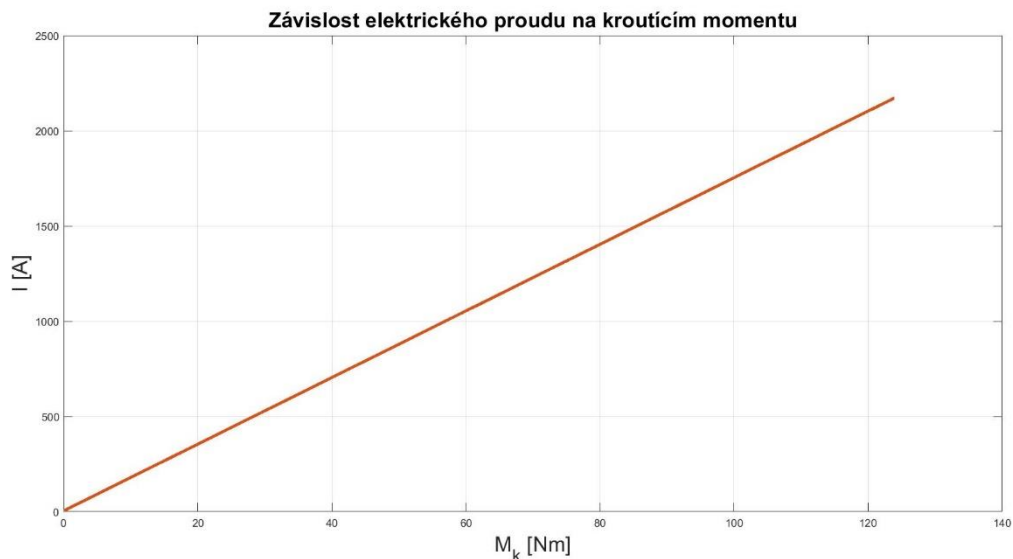
$$M_{ks} = k_T \cdot (I_s - I_0) \quad (4.5)$$

Na základě těchto výpočtů jsou známy souřadnice dvou bodů, a to umožňuje sestavení lineární závislosti. Na dalším obrázku je otáčková charakteristika použitého motoru.



Obr. 4.2 Otáčková charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv

Další charakteristikou je teoretická charakteristika elektrického proudu, která je opět lineární, a tak se sestaví ze dvou bodů. Prvním bodem je proud na prázdko při nulovém momentu a druhým bodem je teoretický maximální výpočetní proud při záběrovém momentu. Na obrázku (4.3) lze pozorovat charakteristiku elektrického proudu použitého motoru.



Obr. 4.3 Proudová charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv

Z předešlých charakteristik, lze vytvořit charakteristiku výkonu. Využije se známého vztahu pro mechanický výkon:

$$P = M_k \cdot \omega \quad (4.6)$$

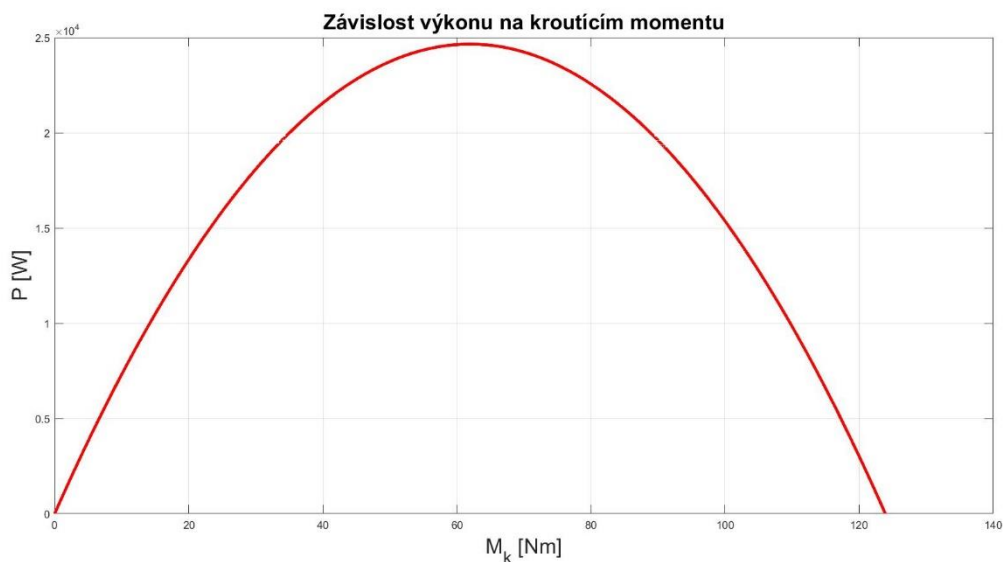
Dále z podobnosti trojúhelníků lze užít poměru:

$$\frac{n_0}{M_{ks}} = \frac{n}{M_{ks} - M_k} \quad (4.7)$$

Sloučením rovnic (4.6) a (4.7) lze získat finální vztah pro výkon, který je závislý jen na momentu:

$$P = \frac{1}{30} \cdot \pi \cdot M_k \cdot \frac{M_{ks} - M_k}{M_{ks}} \cdot n_0 \quad (4.8)$$

Podle této rovnice lze sestavit výkonovou charakteristiku:

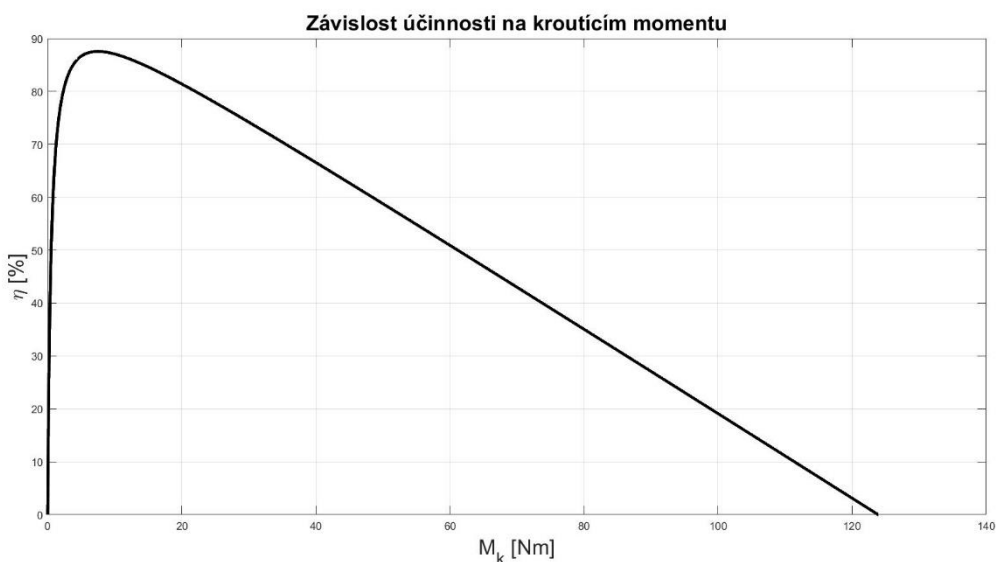


Obr. 4.4 Výkonová charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv

Poslední potřebnou charakteristikou je průběh účinnosti, která je definovaná poměrem výstupního výkonu na hřídeli ku vstupnímu elektrickému výkonu. Průběh mechanického výkonu je již znám a elektrické charakteristiky taky, lze tedy psát:

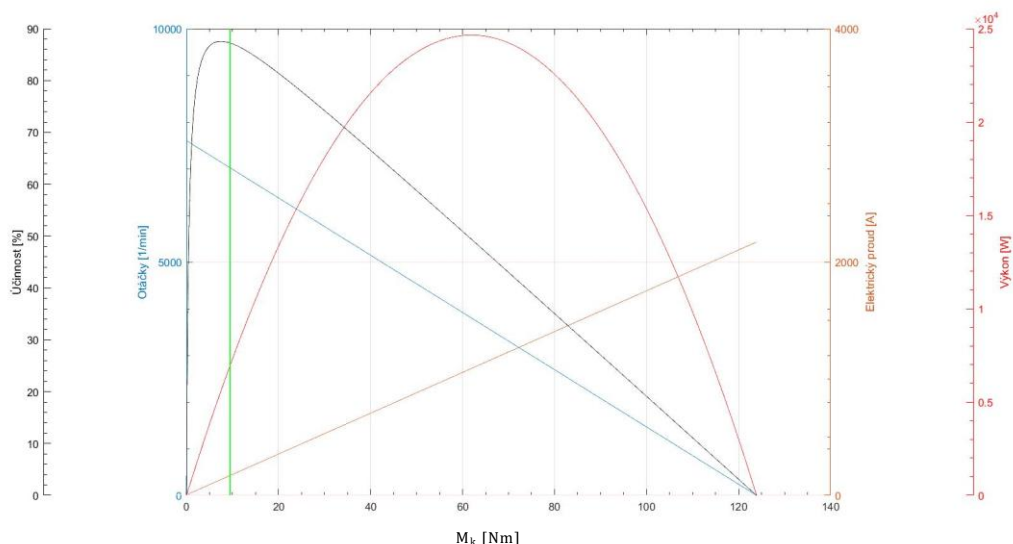
$$\eta = \frac{P}{(n_{akumulátoru} \cdot U_{akumulátoru} + I_0 \cdot R_i) \cdot (I + I_0)} \quad (4.9)$$

kde I je elektrický proud z proudové charakteristiky. Účinnost lze vidět na obrázku 4.5.



Obr. 4.5 Charakteristika účinností motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv

Pro přehlednost je výhodný graf zobrazující všechny charakteristiky do jedné. Výstupem těchto charakteristik bude nalezení místa, ve kterém motor dokáže dodávat nepřetržitě nejvyšší výkon. Tohle místo lze najít dosazením maximálního proudu do proudové charakteristiky. Na dalším grafu je vyznačeno zeleně:



Obr. 4.6 Kompletní charakteristika motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv

Ačkoliv prodejce udává maximální výkon 7992 W, tak tento výkon jde udržet jen na omezenou dobu, po kterou by hrozilo zničení motoru. Navíc výkon je součinem kroutícího momentu a úhlové rychlosti, tento údaj by se pak špatně porovnával s vrtulí. Z těchto důvodů jsou vhodnější výkonnostní hodnoty určené z výpočtů z charakteristik motorů, které jsou vypsány v tabulce pro použitý motor. [17]

Tab. 4.2 Spočtené maximální provozní výstupní parametry motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv

Výkon na hřídeli	6 956 W
Kroutící moment	9,46 Nm
Otáčky	7019 min <sup>-1</sup>
Účinnost	87 %

#### 4.1.2. Návrh a výpočet vrtule

Při nákupu motoru je doporučovaná vrtule. Je vhodné se přibližně rozměrově držet doporučení, protože menší vrtule by se pro stejný výkon musela točit velmi rychle a naopak velká vrtule by mohla mít problém s velkým potřebným kroutícím momentem, kterého by motor nemusel dosáhnout.

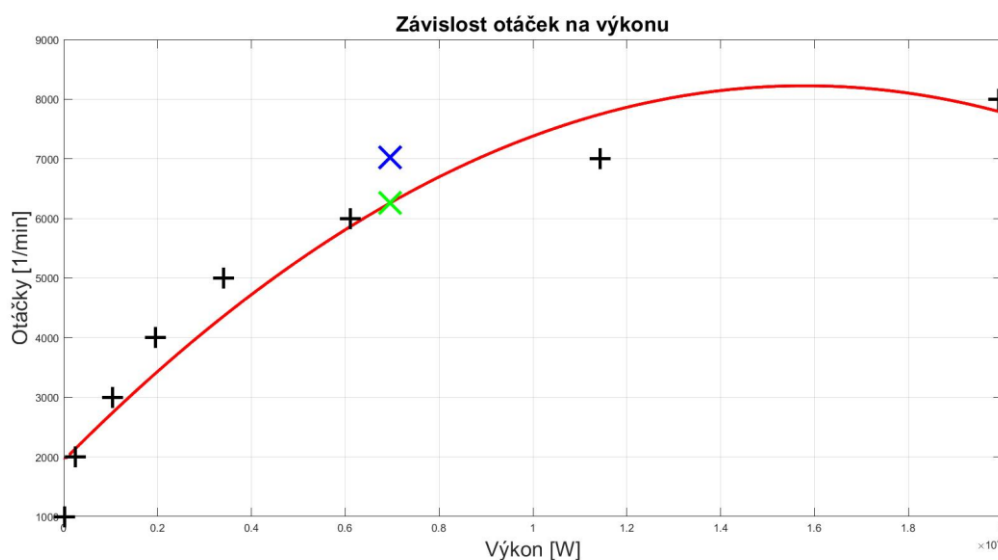
Zvažoval jsem i aplikaci dmychadla, to ovšem zde nemá dobré uplatnění, protože jeho výhody plynou z obtékání nabíhacího vzduchu, který v případě visu může být nulový. Oproti vrtuli by tak dmychadlo bylo těžší. Dmychadla s velkým výkonem navíc nejsou běžně dostupná na trhu. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro vrtuli.

Složení charakteristik vrtule výpočtem by nebylo tak jednoduché jako u motorů a byl by překonán rozsah této práce, proto byla použita data získaná na stránkách APC Propellers, ta jsou udána po 1000 otáčkách. V tabulce (4.3) jsou uvedeny hodnoty pro zvolenou vrtuli 27x13E, která nebyla obtékána vzduchem. [19]

Tab. 4.3 Data vrtule 27x13E [19]

$n_{vrtule}$ [min <sup>-1</sup> ]	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$F_{vrtule}$ [Lbf]	1,475	5,980	13,747	24,442	38,777	56,989	78,431	101,713
$P_{vrtule}$ [Hp]	0,036	0,328	1,388	2,630	4,568	8,195	15,321	26,727
$M_{vrtule}$ [In-Lbf]	2,298	10,332	29,170	41,440	57,580	86,087	137,947	210,556

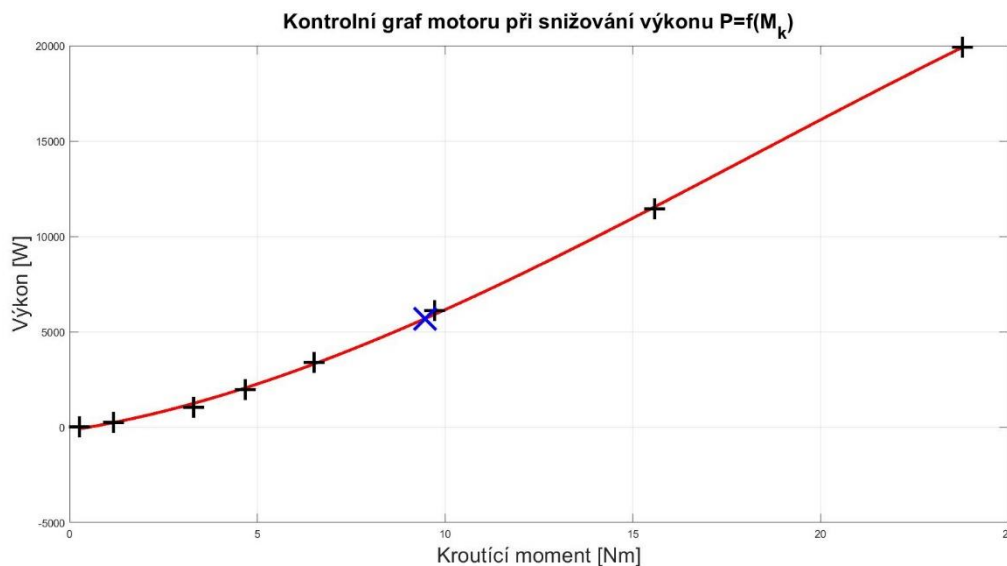
Aby se data dala využít, je potřeba je převést do jednotek SI a proložit je aproximační křivkou. Křivka má červenou barvu a jednotlivé naměřené body představuje černý křížek. Ve skriptu v Matlabu byla vytvořena část kódu, který dokáže tato data aproximovat zvoleným polynomem metodou nejmenších čtverců, nejčastěji druhým nebo třetím. Tato část kódu pro první graf lze vidět v příloze č. 2. První závislostí je závislost otáček na výkonu, u které se zjišťuje, zdali motor má ve svém maximálním provozním výkonu i dostatečné otáčky. [20]



Obr. 4.7 Závislost otáček motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E

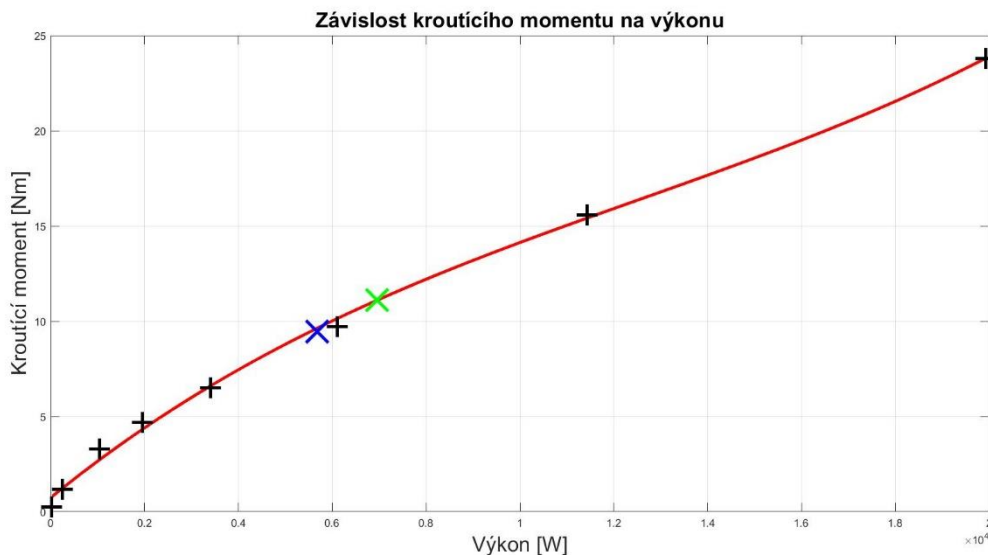
Modrý bod ukazuje, jaký výkon a otáčky má motor při svém maximálním provozním stavu. Zelený bod ukazuje, jaké potřebuje vrtule otáčky při daném výkonu. Pokud je modrý bod nad zeleným bodem vrtule, znamená to, že motor má při tomto výkonu dostatečné otáčky. Kdyby toto nenastalo, skript je vybaven logickou funkcí, která by vytvořila závislost výkonu na otáčkách a snížila výkon motoru podle jeho maximálních otáček. Ačkoliv by se v tomto případě ztratila část výkonu motoru, je to lepší řešení než přidávat převodový mechanismus. Nejvhodnější je najít co možná neoptimálnější vrtuli tak, aby rozdíl nebyl tak veliký.

Obdobný postup se aplikuje při kontrole výkonu a kroutícího momentu. Jelikož otáčky motoru byly vyšší, než kolik bylo třeba při daném výkonu, bude nutné snížit výkon podle momentu. Kontrola závislosti momentu motoru a jeho sníženého výkonu na výkon, který bude mít dostatečný kroutící moment, je na obrázku 4.8.



Obr. 4.8 Kontrolní graf snižování výkonu podle momentu motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E

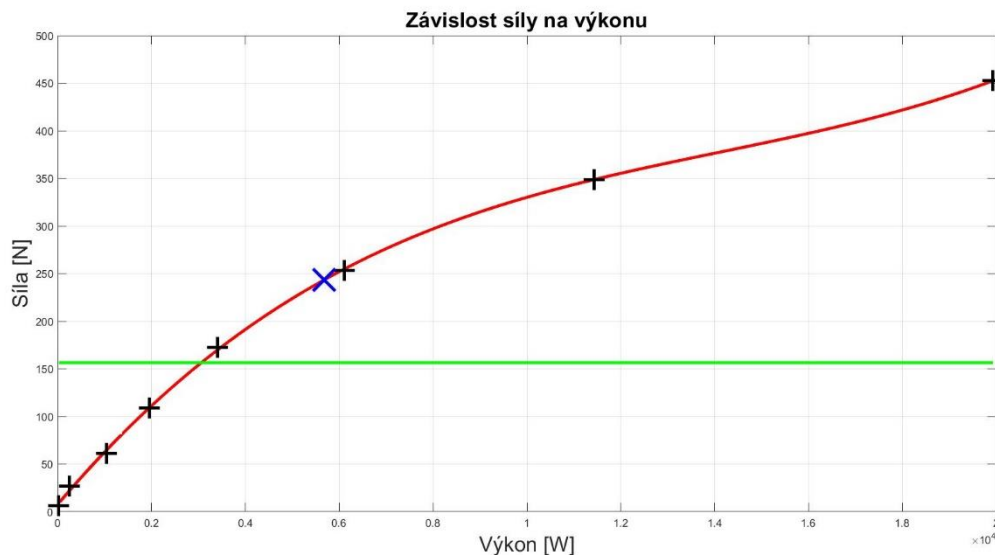
Po získání výkonu, který motor je schopný dodat při svém největším momentu, lze sestavit obdobnou závislost jako u otáček, a to závislost momentu na výkonu, která je na obrázku 4.9.



Obr. 4.9 Závislost kroutícího momentu motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E

Zelený bod patří vrtuli pro nejvyšší provozní výkon motoru, ten ale motor v tomto případě není schopen dodat, a tak modrý bod zobrazuje redukováný kroutící moment motoru, který je schopen dodat při maximálním provozním výkonu. Logická funkce skriptu by podobně postupovala v případě motoru, kde by bylo potřeba redukovat otáčky. Synchronizovaný výkon je 5 684 W, což představuje snížení výkonu o nejméně 1 000 W, bylo by tedy vhodné užít jinou vrtuli. APC Propellers bohužel nemají data pro vrtuli doporučenou prodejcem motoru 27x12; ostatní vrtule poskytují podobné, nebo horší výsledky.

Po získání synchronizovaného výkonu lze vytvořit závislost mezi výkonem a tahem vrtule.



Obr. 4.10 Závislost tahové síly na výkonu motoru Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E

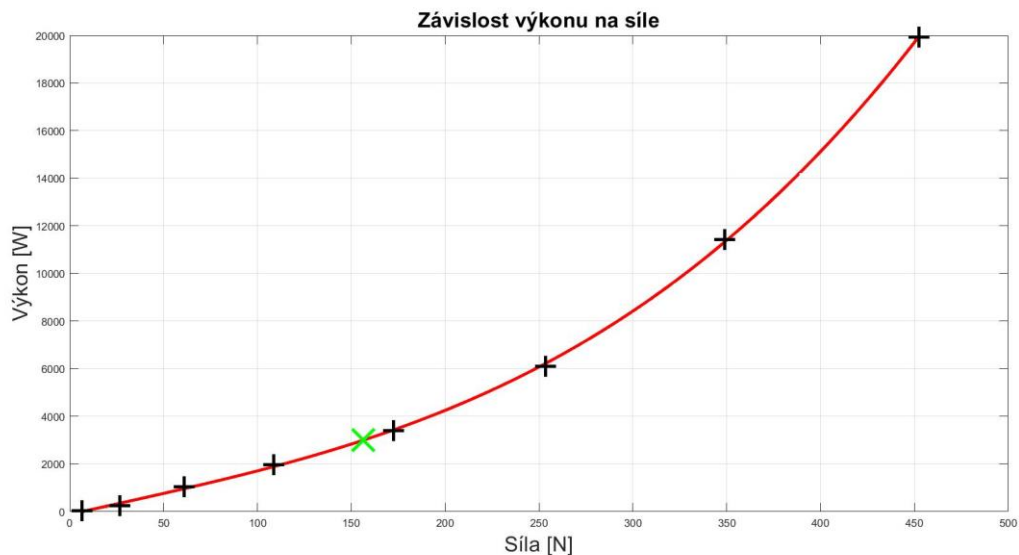
Modrý bod představuje maximální tahovou sílu motoru při synchronizovaném výkonu. Zelená čára představuje tíhovou sílu na jeden motor, tedy sílu, při které by flyboard visel ve vzduchu. Z toho lze určit tahový poměr  $q$  podle rovnice (4.10):

$$q = \frac{F_{tahmaxmotoru} \cdot n_{pohonných\ jednotek}}{F_t} \quad (4.10)$$

Tahový poměr je vhodný pro srovnání různých kombinací propulzních jednotek při stejné hmotnosti. Matlabový skript tak umožňuje rychlé porovnání různých kombinací jednotlivých částí propulzních jednotek. Dále tahový poměr udává, jak stroj bude schopný zrychlovat a jak se mu bude dařit provádět vyrovnání. Pro řešený flyboard vychází  $q=1,5577$ .

Poslední sestavenou závislostí je závislost výkonu motoru při visení na tíhové síle, která připadne na jeden motor. Tato závislost je potřebná pro sestavení základních parametrů zařízení.

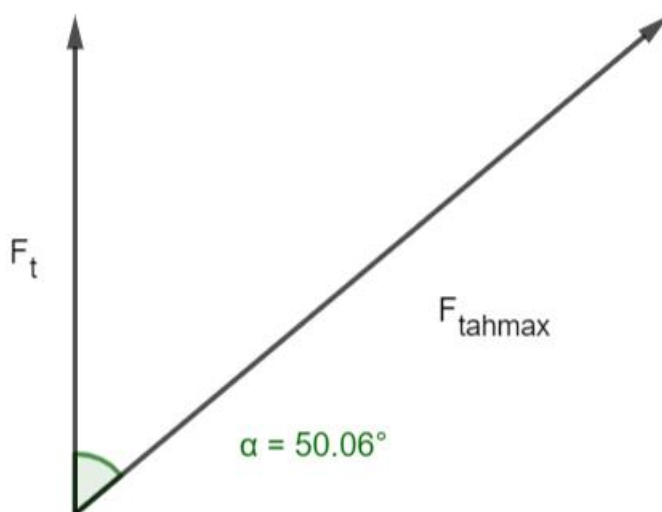




Obr. 4.11 Závislost výkonu motoru na tíhové síle na jeden motor Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv a vrtule 27x13E

#### 4.2. Rozbor aerodynamických vlivů na stabilizaci letu

Flyboard se může stabilizovat mnoha způsoby. Nejdůležitější je kontrola výšky, aby nedošlo k pádu. Lze odvodit teoretický kritický úhel  $\alpha$ , po jehož překonání nelze flyboard vyrovnat, aniž by neztratil výšku. Aby flyboard visel ve vzduchu při nulovém náklonu, musí generovat tahovou sílu tak velkou, jaká na něj působí tíhová síla. Flyboard by měl být schopen generovat sílu větší. Tato síla  $F_{\text{tahmax}}$  při vektorovém rozkladu by do vertikálního směru měla mít složku větší, než je tíhová síla. Kritický úhel je úhel mezi  $F_{\text{tahmax}}$  a  $F_t$  pro případ, že vertikální složka vektoru  $F_{\text{tahmax}}$  se rovná vektoru  $F_t$ .



Obr. 4.12 Kritický úhel alfa pro navrhovaný flyboard

Díky geometrickým vztahům lze z obrázku 4.12 sestavením v softwaru GeoGebra odvodit vztahy pro výpočet kritického úhlu:

$$\alpha_{krit} = \arccos\left(\frac{F_t}{F_{tahmax}}\right) = \left(\frac{F_t}{F_t \cdot q}\right) = \left(\frac{1}{q}\right) \quad (4.11)$$

Pro řešený flyboard je teoretický kritický úhel 50°. Velikost reálného kritického úhlu bude záležet na povětrnostních podmínkách a naklonění pilota. Ideální kritický úhel bude nutné omezit tak, aby byl stroj ovladatelný.

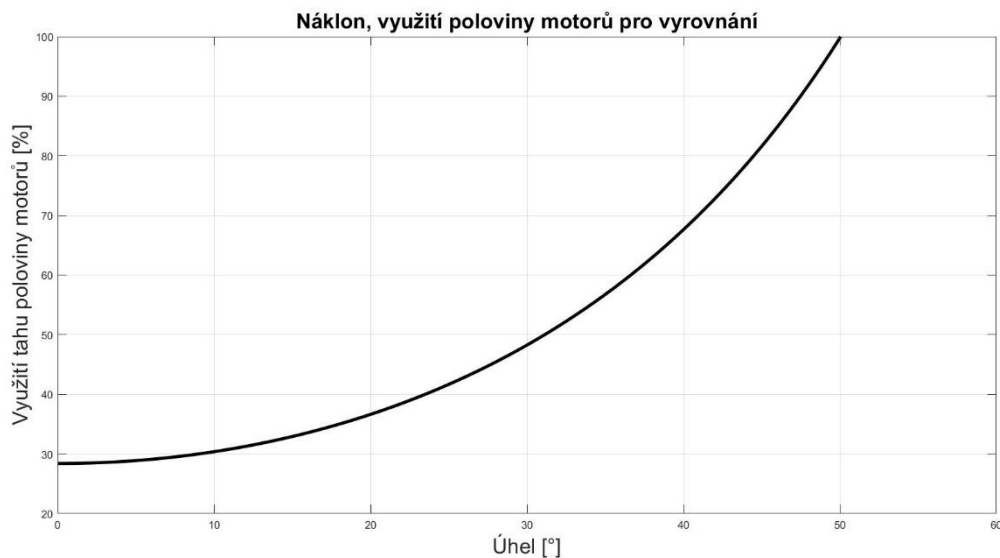
Flyboard se při náklonu vyrovnává způsobem, že u některých motorů omezí výkon. Pro konstrukční symetrie flyboardu lze uvažovat, že se bude omezovat nanejvýše polovina motorů. Lze tak vytvořit veličinu  $q_{stab}$ , která udává poměr potřebného tahu motoru k jeho maximálnímu tahu, který vztáhneme na polovinu motorů. Lze sestavit rovnici:

$$\frac{F_{tahmaxmotoru} \cdot \cos(\alpha) \cdot n_{pohonných\ jednotek} \cdot q_{stab}}{2} + \frac{F_{tahmaxmotoru} \cdot \cos(\alpha) \cdot n_{pohonných\ jednotek}}{2} = F_t \quad (4.12)$$

Po algebraických úpravách lze vyjádřit  $q_{stab}$  na úhlu  $\alpha$ .

$$q_{stab} = \frac{2 \cdot F_t}{(F_{tahmaxmotoru} \cdot n_{pohonných\ jednotek} \cdot \cos(\alpha))} - 1 \quad (4.13)$$

Tato závislost je vidět na grafu (4.13).



Obr. 4.13 Využití poloviny motorů v závislosti na náklonu pro navrhovaný flyboard

Podle teoretického grafu 4.13 lze nastavit řídicí jednotku tak, aby nedošlo k pádu. Na grafu můžeme vidět, že čím více je flyboard nakloněn, tím vyrovnání potrvá déle. Rychlost vyrovnání v této části návrhu nelze teoreticky stanovit, protože bude záviset na konstrukční části návrhu, a to na způsobu, jak bude mít flyboard s pilotem rozloženou hmotu a jak budou motory vzdáleny od těžiště. Proto je vhodné začínat létat nejdříve s nastavením malého kritického úhlu. Zjednodušeně by se dalo říci, že náklon flyboardu odpovídá sklonu svahu u snowboardingu, kritickým úhlem jde tak omezit maximální dopředná rychlost a zrychlení. Pilot proto musí přizpůsobit svůj let, aby zvládl flyboard stabilizovat, aniž by mohlo dojít k čelní srážce s překážkou nebo jiným létajícím objektem.

### 4.3. Ověření energetické zásoby

Jelikož pro bezpečný pohyb flyboardu je nutný nepřetržitý provoz propulzních jednotek, je vhodné stanovit nejmenší dobu, po kterou jsou akumulátory schopny dodávat energii. energii uloženou v akumulátorech pro propulzní jednotku můžeme spočítat za pomoci fyzikální definice napětí.

$$E_{akumulátoru} = Q_{akumulátoru} \cdot U_{akumulátoru} \cdot n_{akumulátoru} \cdot 0,95 \quad (4.13)$$

Li-Po akumulátor nelze vybit do prázdna, hrozilo by jeho nevratné poškození, proto je v rovnici (4.13) na konci konstanta, která zohledňuje vybití jen na 95 %. [21]

Čas určíme za pomoci definice výkonu, kde můžeme jako práci uvažovat nabitou energii v akumulátorech. Elektrický výkon se uvádí jako maximálně možný, a to součinem maximálního proudu motoru a napětí článků.

$$t_{min} = \frac{E_{akumulátoru}}{I_{max} \cdot U_{akumulátoru} \cdot n_{akumulátoru}} \quad (4.14)$$

Pro navrhovaný flyboard vychází doba minimálního letu 7,7 minuty. Reálně však doba letu může být mnohem delší, záleží na režimu letu. Dále je nutné u navržených akumulátorů zkontrolovat, jestli jsou jimi schopné protékat dostatečně velké proudy. Výrobce uvádí maximální proudové zatížení 575 A. Vybraný akumulátor GensAceLiPoTattuSerie - 6S 23000mAh 22,8V 6S1P HV (25C) XT150/AS150 Plug lze použít. Nevýhodou tohoto akumulátoru je jeho vysoká hmotnost. Pro aplikace, kde by flyboard létal kratší dobu, lze na trhu najít akumulátory o podobném napětí s menší kapacitou a hmotností. [22]

#### 4.4. Bilance hmotnosti

Na začátku výpočetního cyklu byla stanovena hmotnost. Tu je potřeba nyní ověřit. Užitečnou hmotnost stroje, tedy hmotnost, kterou může nést, určíme přibližně z následující rovnice:

$$m_{\text{užitečná}} = m - m_{\text{akumulátoru}} \cdot n_{\text{akumulátoru}} \cdot n_{\text{pohonných jednotek}} - m_{\text{motoru}} \cdot n_{\text{akumulátoru}} - 35 \text{ [kg]} \quad (4.15)$$

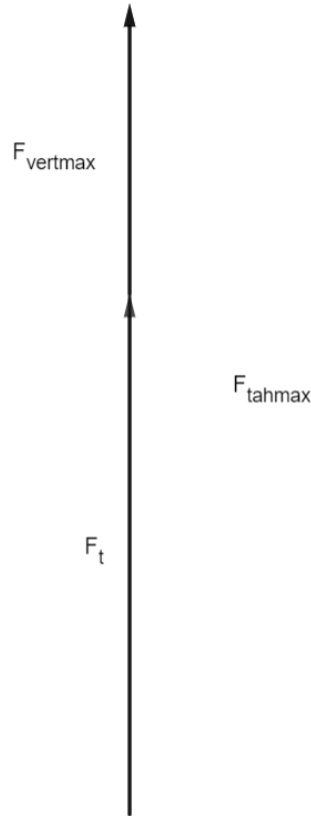
Akumulátory a motory tvoří značnou hmotnost konstrukce. Pokud jsou již známy další komponenty, lze je do rovnice obecně doplnit jako menšitele složeného ze součinu počtu komponent a jejich hmotnosti. Menšitel 35 kg je můj odhad konstanty hmotnosti pro řešený flyboard, která zahrnuje hmotnost rámu, vázání, vrtulí a další elektroniky. Při odhadu se lze inspirovat jinými osobními dopravními prostředky využívajícími rámové konstrukce, například jízdním kolem. Při stanovení tohoto odhadu je lépe uvažovat odhad spíše větší než menší. V případě, že by se konstrukci podařilo vyrobit lehčí, než je zamýšlená, budou letové vlastnosti vylepšeny, v opačném případě by mohla být omezena letuschopnost stroje. Užitečná hmotnost by měla být vyšší než hmotnost pilota a jeho oděvu.

#### 4.5. Stanovení letových parametrů

Z dat podkapitoly 4.1 lze sestavit velmi přibližné výpočty. Ve výpočtech jsou zahrnuty pouze síly tíhové a tahové od vrtulí, které jsou obtékány nulovou rychlostí. Pro stanovení rychlostí je užít vztah pro výpočet odporové aerodynamické síly. V dalších podkapitolách budou vypočítány maximální teoretické veličiny pro různé režimy letů.

##### 4.5.1. Vertikální let

V tomto režimu letu se vektorově odečítá tíhová síla od tahových sil propulzních jednotek. Síla, která bude zrychlovat flyboard, bude jejich rozdílem.



Obr. 4.14 Vektorový rozklad sil při vertikálním letu

Z grafického rozkladu lze vertikální zrychlení určit vztahem:

$$a_{vertmax} = \frac{F_{tahmax} - F_t}{m} = \frac{F_{vertmax}}{m} \quad (4.16)$$

Maximální rychlost lze velmi těžko analyticky stanovit. Maximální rychlost nastává, když odporové síly jsou rovny síle  $F_{vertmax}$ . Pro těleso lze stanovit odporová aerodynamická síla, z které můžeme sestavit rovnici: [23]

$$F_{vertmax} = C_{xvert} \cdot S_{vert} \cdot \frac{\rho_{vzduchu}}{2} \cdot v_{vertmax}^2 \quad (4.17)$$

Po úpravě lze získat vztah pro maximální rychlost:

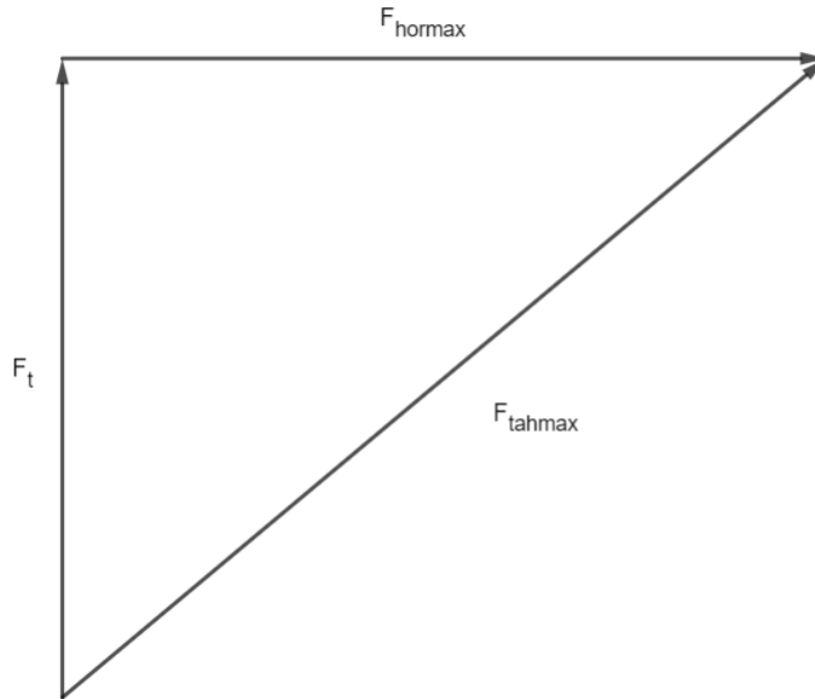
$$v_{vertmax} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{vertmax}}{C_{xvert} \cdot S_{vert} \cdot \rho_{vzduchu}}} \quad (4.18)$$

Nevýhodou tohoto vztahu je nutnost znalosti průřezu  $S$ , který bude záviset na postavě pilota a součinitele odporu, jenž se určuje experimentálně, nebo výpočetně pomocí počítačové mechaniky tekutin, jež by svou náročností překročila rozsah této práce. Maximální rychlost také lze určit podle dat z APC Propellers; každá sada dat pro dané otáčky je zakončena řádkem s rychlostí, kde je

tah záporný. Maximální rychlost je tak nejlépe otestovat experimentálně na již postaveném flyboardu. [19]

#### 4.5.2. Horizontální let

Maximální sílu zrychlující horizontální let lze určit ze stejného vektorového rozkladu jako pro určení kritického úhlu.



Obr. 4.15 Vektorový rozklad sil při horizontálním letu

Z vektorového rozkladu lze vyjádřit horizontální zrychlení:

$$a_{hormax} = \frac{\sqrt{F_{tahmax}^2 - F_t^2}}{m} = \frac{F_{hormax}}{m} \quad (4.19)$$

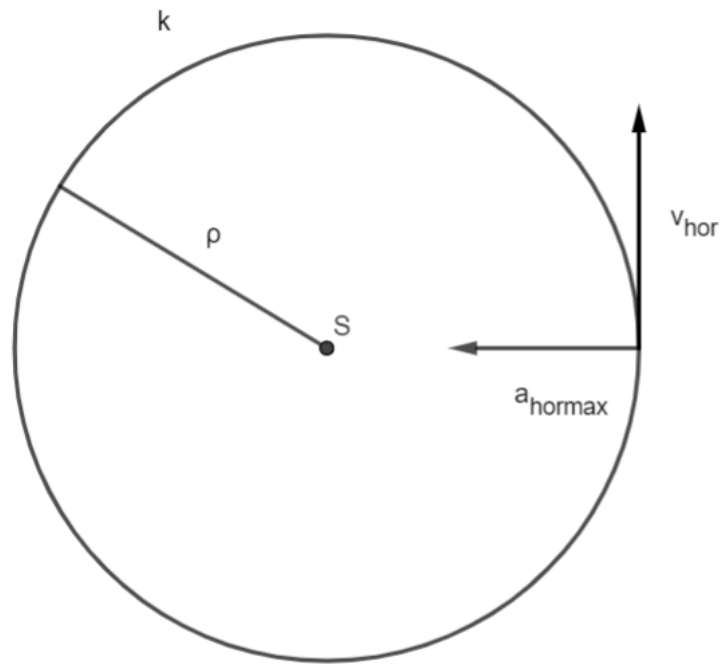
Postupem obdobným jako u předešlé podkapitoly získáváme vztah pro maximální horizontální rychlost:

$$v_{hormax} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{hormax}}{C_{xhor} \cdot S_{hor} \cdot \rho_{vzduchu}}} \quad (4.20)$$

Tento vztah je zatížen podobnými problémy jako vztah pro vertikální rychlost. Navíc zde se u experimentálního měření musí dbát na zvýšenou bezpečnost pilota, pro vysokou rychlost je nutný co možná nejvyšší náklon, který může přivodit flyboardu pád.

### 4.5.3. Let po kruhu

Flyboard, jenž letí nenulovou rychlostí, může letět po oblouku, na který bude mít dostatečné dostředivé zrychlení, jež je pro flyboard speciálním případem horizontálního zrychlení, aniž by ztrácel výšku.

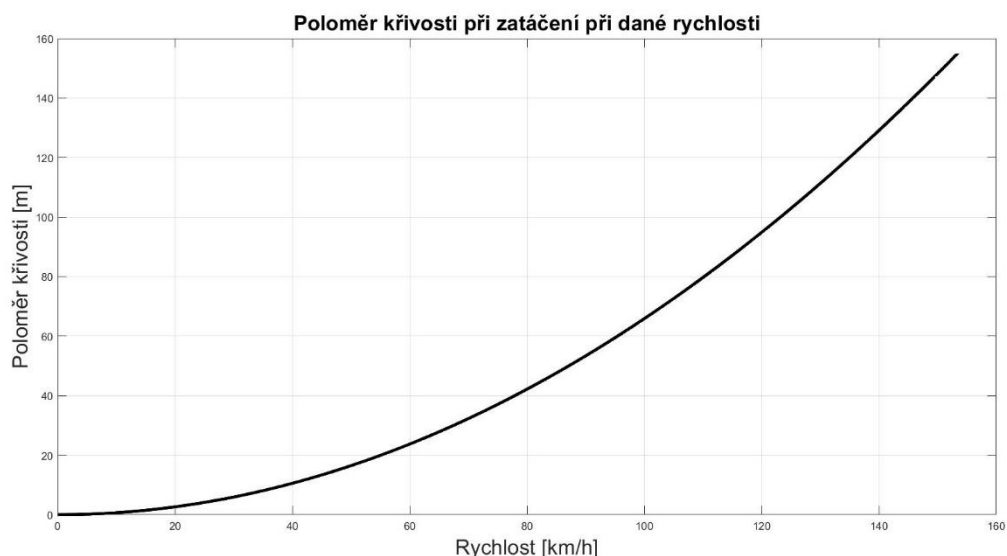


Obr. 4.16 Vektorový rozklad sil při letu po kružnici

Pro dopřednou rychlost flyboardu lze vypočítat minimální poloměr křivosti, po němž je schopen letět:

$$\rho = \frac{v_{hor}^2}{a_{hormax}} \quad (4.21)$$

Na základě rovnice 4.21 lze sestavit závislost nejmenšího poloměru křivosti pro danou rychlost.



Obr. 4.17 Závislost nejmenšího poměru oblouku při dané rychlosti

Vlivem odporových sil se reálná rychlost bude zmenšovat, křivost se tak během letu po oblouku bude též zmenšovat.

#### 4.6. Shrnutí základních technických parametrů

Výpočty se doplní ještě o ukazatele výkonu. Poměr využití maximálního provozního výkonu a výkonu pro visení lze vypočítat podle vztahu:

$$q_P = \frac{P_{\text{hřidel synchron}}}{P_{\text{vrtule vis}}} \quad (4.22)$$

kde  $P_{\text{hřidel synchron}}$  je synchronizovaný výkon na hřídeli podle otáček, nebo kroutícího momentu a  $P_{\text{vrtule vis}}$  je výkon na jednu vrtuli, jenž musí být takový, aby udržela flyboard ve visu.

Výkon, který zbude po výkonu potřebném pro visení, lze určit podle vztahu:

$$P_{\text{zbytkový}} = n_{\text{pohoných jednotek}} \cdot (P_{\text{hřidel synchron}} - P_{\text{vrtule vis}}) \quad (4.23)$$

Celkový výkon lze určit podle vztahu:

$$P_{\text{celkový}} = n_{\text{pohonných jednotek}} \cdot P_{\text{hřidel synchron}} \quad (4.24)$$

Základní technické parametry navrhovaného flyboardu, které jsou vypočítané skriptem v Matlabu, jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Základní technické parametry navrhovaného flyboardu

Celková hmotnost (včetně pilota)	255 kg
Užitečná hmotnost	107 kg
Počet pohonných jednotek	16
Minimální doba letu	7 minut a 42 sekund



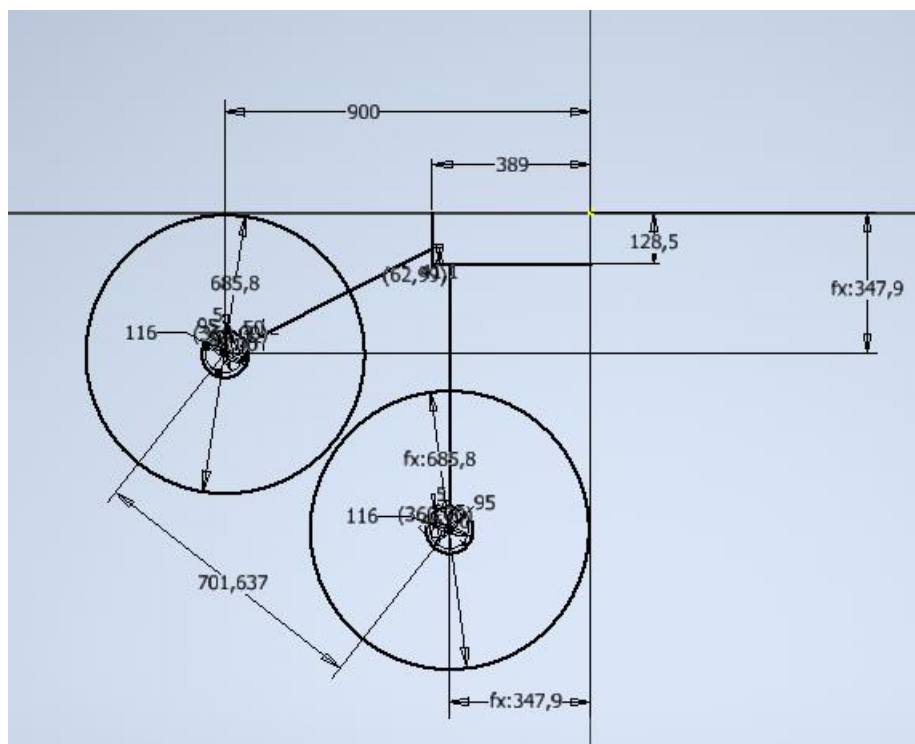
Pádový kritický úhel	50°
Poměr tahu	1,56
Poměr výkonu	1,90
Zbytkový výkon	42 990 W
Celkový výkon	90 950 W
Maximální vertikální zrychlení	5,47 ms <sup>-2</sup>
Maximální vertikální rychlost	96,66 kmh <sup>-1</sup>
Maximální horizontální zrychlení	11,72 ms <sup>-2</sup>
Maximální horizontální rychlost	153,43 kmh <sup>-1</sup>

Z těchto dat lze udělat závěr, že tento flyboard bude letuschopný. Má dostatek výkonu, který zkušený pilot může využít na poměrně pocitově rychlé volné létání. Pilot začátečník má zase dostatek výkonu pro vyrovnání k tomu, aby byl flyboard bezpečný. Energetická zásoba není moc velká pro létání na desítky kilometrů, je však dostačující pro bezpečné sportovní létání, nebo krátký přesun. Maximální rychlosti závisí na mnoha faktorech, které nebylo možné v této fázi návrhu plně zohlednit. Reálné maximální rychlosti můžou být jiné.

## 5. Studie letadla – konstrukční část

Pro navrhovaný flyboard je znám počet pohonných jednotek, kterých je 16. Rozložení 16 vrtulí o průměru 27 palců by zabíralo velkou plochu. Z důvodu kompaktnosti jsem se tak rozhodl vytvořit seskupení 8 pohonných jednotek ve dvou patrech. Další výhodou tohoto konceptu je možnost použití protiběžných vrtulí. Ty při vhodném nastavení můžou mít dokonce vyšší tah než při izolované konfiguraci. Rozměr dvou pohonných jednotek tak definuje základní výšku rámu. [24]

Pro určení šířky a délky rámu flyboardu lze díky 16 pohonných jednotkám řešit jen čtvrtinu rámu. V tomto návrhu je potřeba zohlednit průměry vrtulí. Vrtule rotují, a tak by měly mít od sebe dostatečné rozestupy, aby nedošlo ke kontaktu. Vrtule je vhodné mít co nejbližší myšlenému obdélníku, který je uvažován podle rozměrů akumulátorů a podle postoje pilota. Tento návrh je vidět v níže uvedeném náčrtu:



Obr. 5.1 Pracovní náčrt rozložení vrtulí

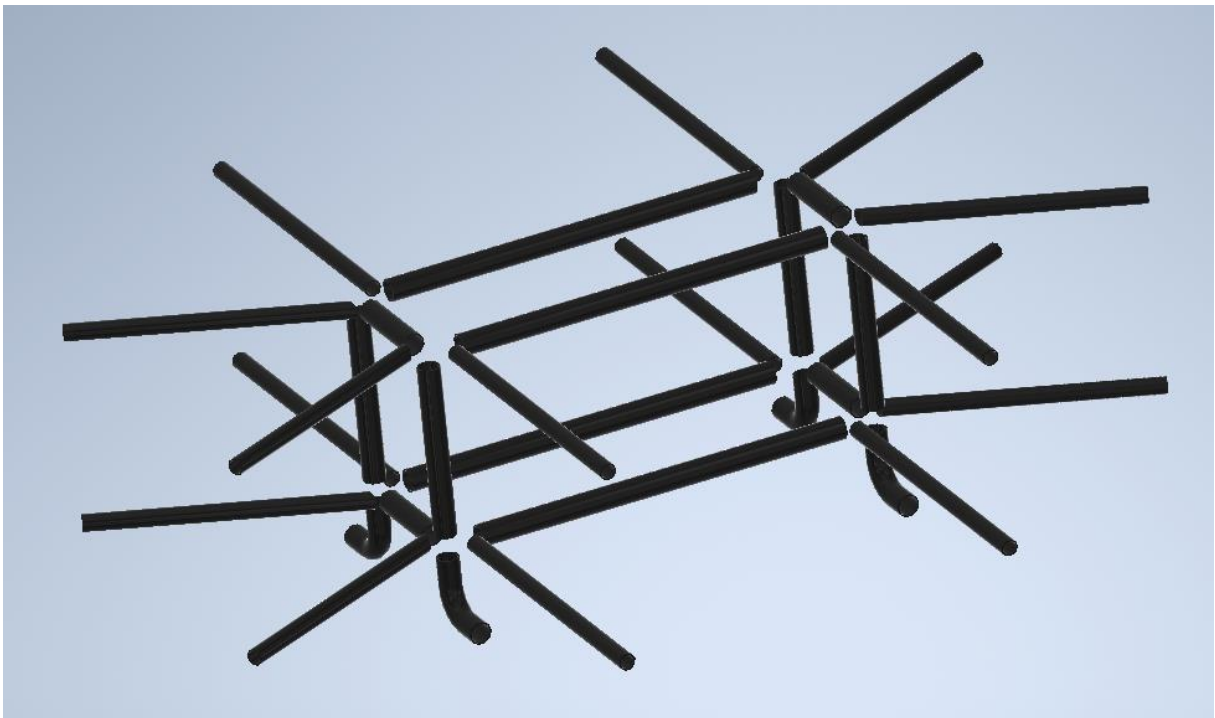
Na základě těchto úvah lze vytvořit komponenty, které budou tvořit konstrukci. Pro konstrukci byl využit software Autodesk Inventor Professional 2022.

### 5.1. Trubky rámu

Z rešerše si lze uvědomit, že nejvhodnějším materiálem je kompozit uhlíku díky svému poměru pevnosti ku hmotnosti. Přestože by rám bylo možné vyrobit pouze z kompozitu, z praktických důvodů se využije jen na spojení jednotlivých konstrukčních uzlů. Díky tomu se nemusí navrhovat složitější geometrie pro integrální spoj a spojení více trubek v rohu rámu. Spoje jednotlivých konstrukčních uzlů budou mít tvar rovné trubky a ohnuté trubky pro přistávací zařízení. Tyto tvary jsou pro technologii namotávání kompozitu výhodné. S ostatními částmi budou spojeny pomocí lepeného spoje, to vylepší opravitelnost oproti rámu zkonstruovanému jen z kompozitu. [12]

Kompozit je anizotropní materiál, záleží tak na skladbě směrů jeho vláken pro stanovení pevnosti. Výpočet je tak poměrně náročný, proto jsem se rozhodl pro návrhové výpočty užít postupů z předmětů Pevnost a pružnost I a II, tedy uvažoval jsem kompozit uhlíku jako ocel. Nepřesnosti těchto výpočtů jsem kompenzoval volbou velkého koeficientu bezpečnosti, a to hodnotou 15. Takto

vysoký koeficient byl zvolen také z důvodu dynamického namáhání konstrukce, které nebylo nijak jinak zohledněno, a především je koeficient bezpečnosti vysoký kvůli lidskému zdraví. Při porušení konstrukce by mohl hrozit pád flyboardu. Po zalétání prvních flyboardů by bylo možné konstrukci celého rámu odlehčit. Trubky rámu tak byly zjednodušeně navrženy podle výpočtů na ohyb, krut, tah, tlak, vzpěr. Jako silové účinky byly uvažované maximální tahové síly od vrtulí, tíhové síly a momenty generované na hřídelích motorů. Sousední vrtule se budou otáčet vždy v různém směru, aby se momenty od vrtulí co nejvíce vyrušily. [12; 25; 26]

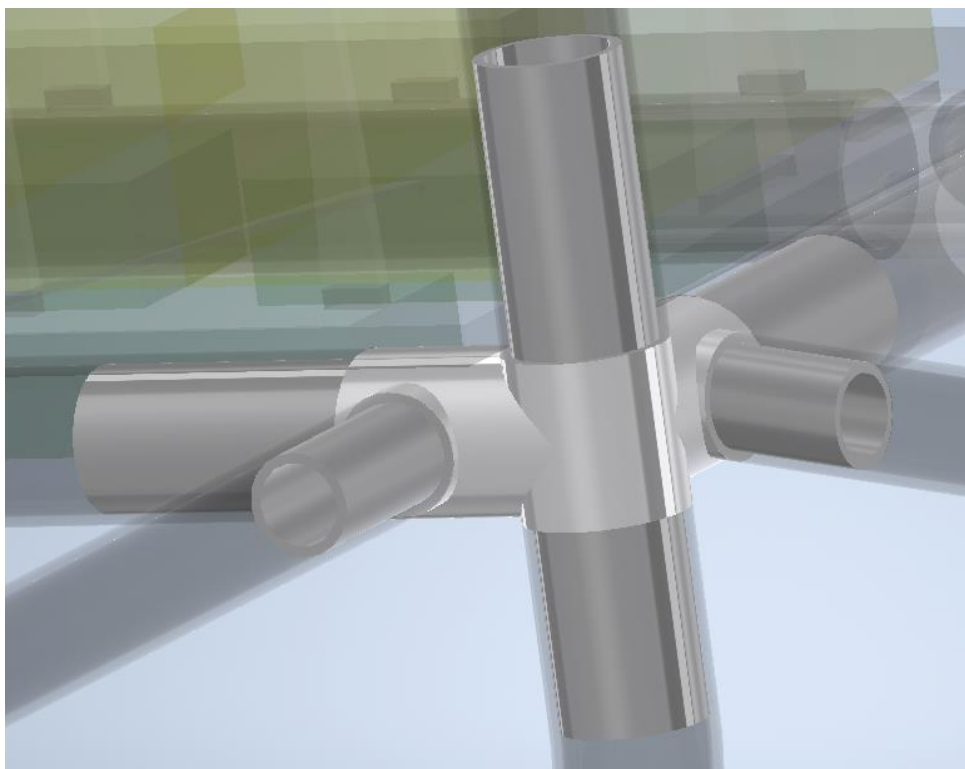


*Obr. 5.2 Trubky rámu*

Průměr trubek mezi motory a hlavní částí rámu byl stanoven jako 30 mm s tloušťkou 2,5 mm. Ostatní trubky mají průměr 40 mm a stejnou tloušťku.

## 5.2. Spojka rámu

Spojka rámu je součást, která spojuje jednotlivé trubky rámu v místech, kde se střetávají. Pro svojí tvarovou složitost bude vyrobena z hliníku, který je dobře obrobitelný a svařitelný a má dobrou pevnost ke své hmotnosti. Popřípadě by mohla být vyrobena obrobením z odlitku. Výstupky spojky jsou navrženy podle výpočtu lepeného spoje tak, aby na ně šly nasadit a nalepit trubky rámu. [27]



*Obr. 5.3 Spojka rámu pohled 1*

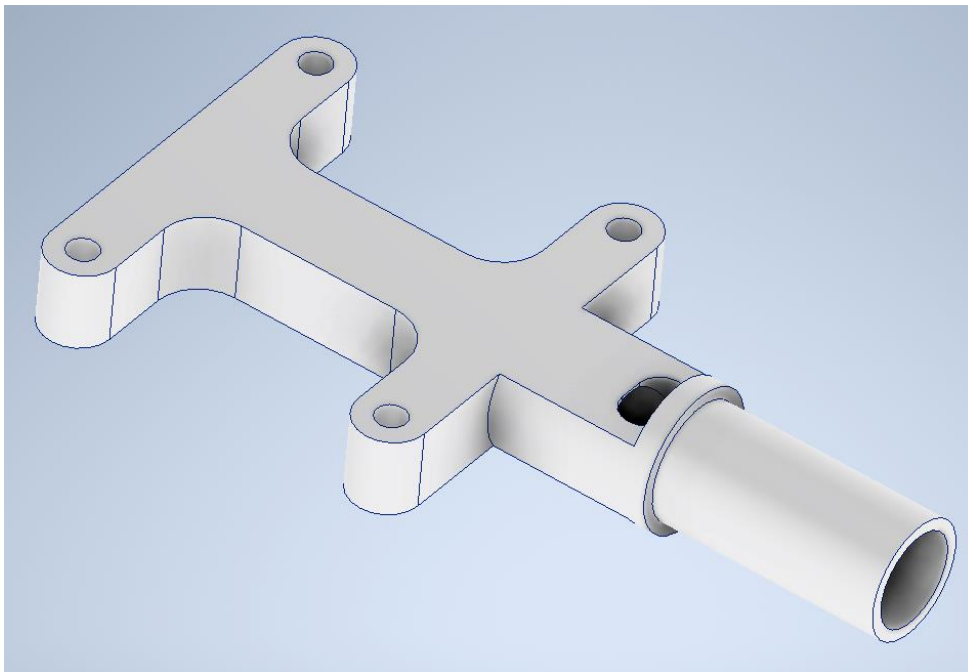
Do spojek jsou vyvrtané dva otvory, které slouží pro vedení tří vodičů k motorům. Na obrázku 5.3 je vidět výstupek pro přistávací zařízení. Tento výstupek má pouze polovina spojek.



*Obr. 5.4 Spojka rámu pohled 2*

### 5.3. Patka motoru

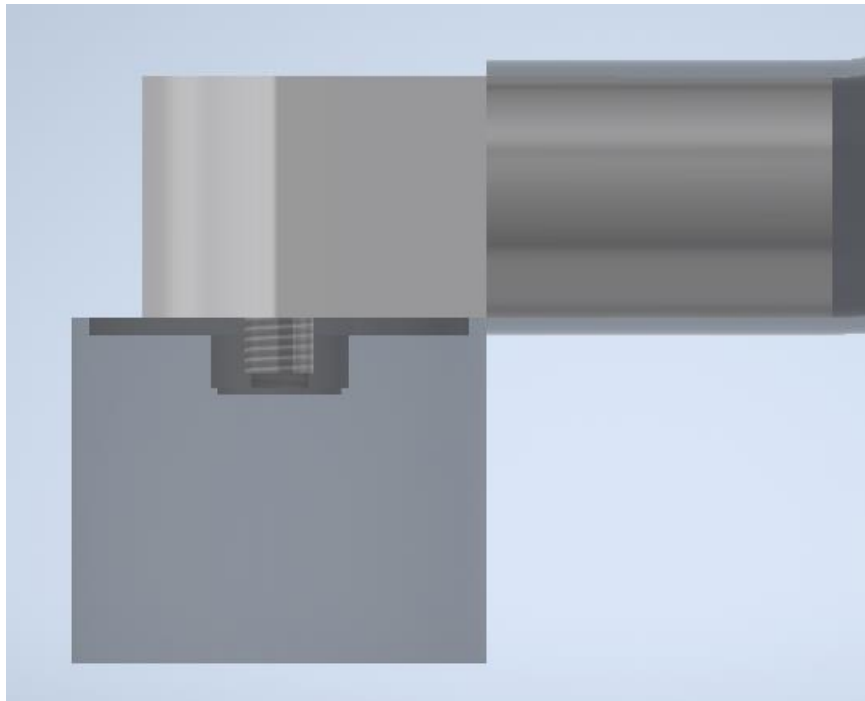
Pro patku motoru byl z podobných důvodů jako u spojky vybrán jako materiál hliník. Jejím úkolem je uchycení motorů s trubkou rámu. Tvar patky motoru definuje podstava motoru a připojená trubka. Do patky je vyvrtán otvor pro kabeláž od motorů. Přes většinu patky je vyvrtána díra souosá s trubkou, která má za úkol odlehčení patky.



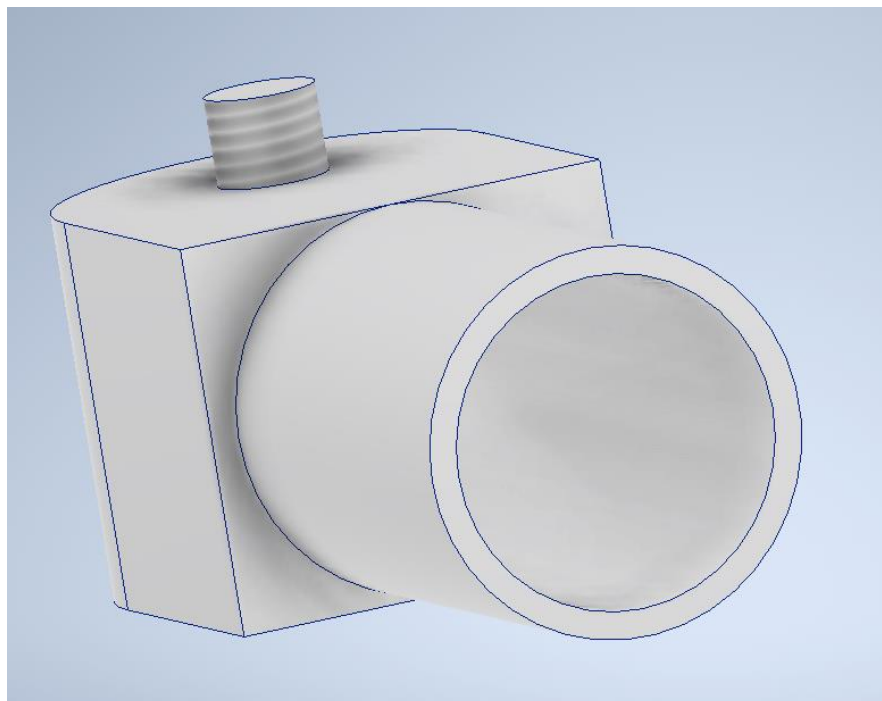
*Obr. 5.5 Patka motoru*

### 5.4. Přistávací patka

Přistávací patka je konstrukčně podobná patce motoru. Úkolem této patky je spojení trubky přistávacího zařízení a pryžového silentbloku, který lze zakoupit. Silentblok se na patku přišroubuje, a bude tak v případě nutnosti lehce měnitelný. Tento silentblok má za úkol tlumit tvrdá přistání. Patka je odlehčena vyvrtaným otvorem. [28]



*Obr. 5.6 Patka motoru s namontovaným silentblokem [28]*



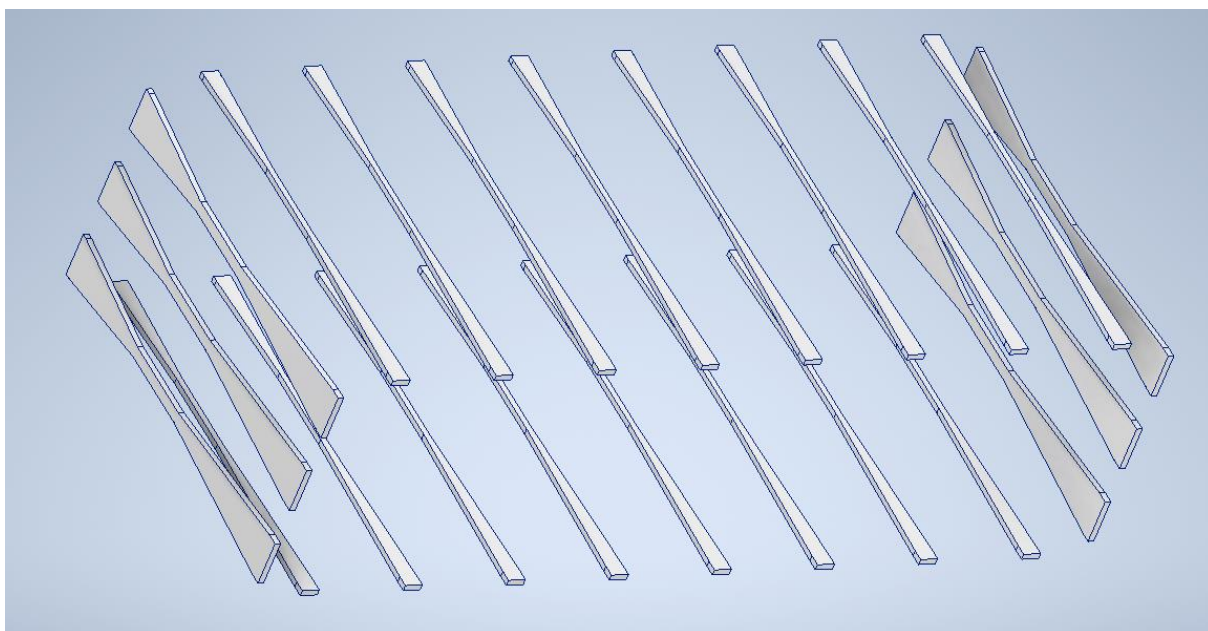
*Obr. 5.7 Patka motoru odlehčovací tvor*

### 5.5. Rám akumulátorů

Úkolem rámu akumulátorů bude rozdělit vertikálně akumulátory od sebe tak, aby mezi nimi mohl proudit vzduch a chladit je. Rám akumulátorů tvoří pro 8 akumulátorů dva trubkové obdélníkové profily z hliníku. Tedy celkem 6 profilů. [27]

## 5.6. Klec akumulátorů

Klec akumulátorů je složena z hliníkových neprizmatických nosníků obdélníkového průřezu. Jejich profil se mění podle zatížení. Nosníky jsou vetknuté do desky a zajištěny montážní páskou (není v modelu). Zatížení je určeno jako tíhová síla na akumulátory, která působí při náklonu na klec. Úkolem klece je udržet akumulátory na svém místě i pro případ, kdy by byl náklon  $90^\circ$ . Klec akumulátorů by se měla dát s deskou poměrně snadno odmontovat, aby byla možná výměna rozbitých nebo opotřebovaných akumulátorů. [27]



Obr. 5.8 Klec akumulátorů

## 5.7. Deska

Dvě desky jsou umístěny na trubkách rámu. Desky jsou sendvičové konstrukce, dolní a horní stranu tvoří pevný materiál, který přenáší tah a tlak, a mezi nimi je lehčí materiál, to umožňuje mít vhodnou průřezovou charakteristiku, jež se dobře brání ohybu. Více namáhaná místa mohou být vyztužena. Úkolem dolní desky je nést akumulátory a elektroniku. Horní deska nese vázání s pilotem a elektroniku. Vázání a elektroniku lze namontovat na vhodné místo podle postoje pilota. Mezi deskami je vetknutá zmíněná klec. Dolní deska je zajištěna proti posunutí vetknutím mezi trubky rámu. Horní desku zajišťuje proti posunutí akumulátorová klec. Další zajištění a spojení s elektronikou je zajištěno pomocí lepení a montážních pásek, které nejsou modelovány.

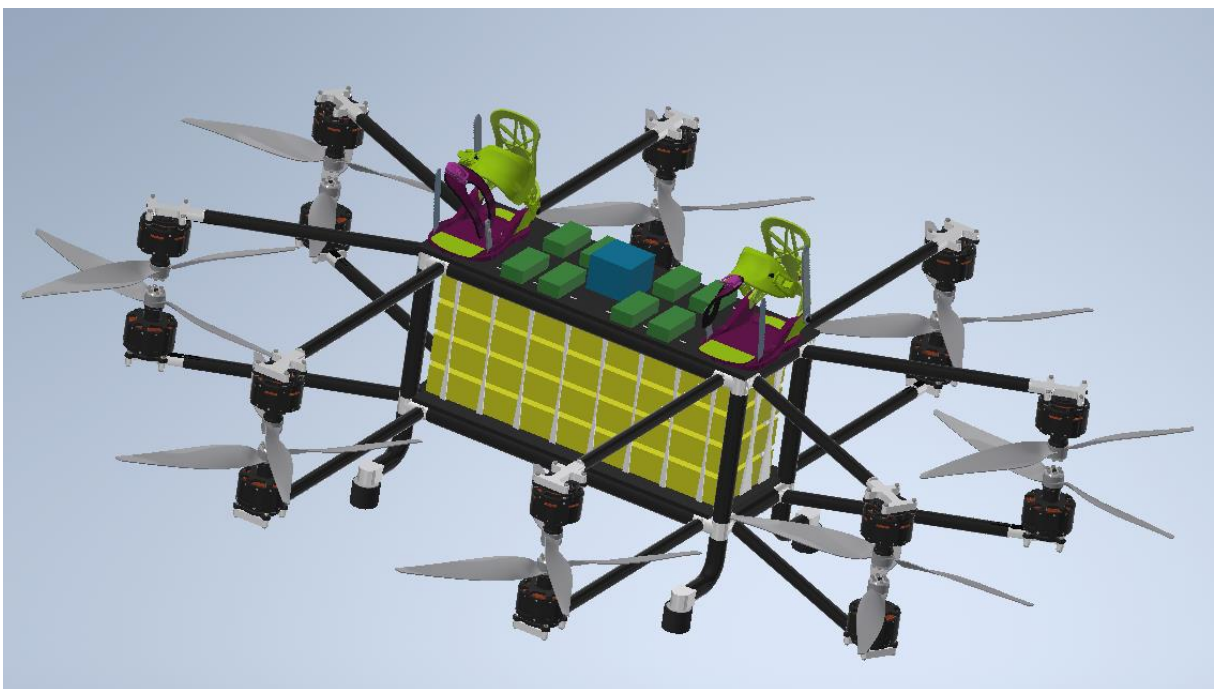




*Obr. 5.9 Pohled zespoda na spodní desku*

### 5.8. Sestava navrhovaného flyboardu

Na obrázku 9.10 lze vidět sestavený navrhovaný flyboard. Žluté bloky představují akumulátory. Zelené bloky představují regulátory. Modrý blok představuje řídicí elektroniku, včetně přijímačů a jejího napájení. Modré bloky jsou zamýšleny dva, protože se nepodařilo najít řídicí počítač, který by měl výstupy pro 16 řídicích jednotek. Tato práce se více elektronickým řízením nezabývá. Modely vázání, vrtulí a motorů byly přejaty a upraveny z knihovny modelů.



*Obr. 5.10 Sestavený navrhovaný flyboard [13; 22; 28; 29; 30; 31; 32]*



Hmotnost navržené konstrukce je 143,2 kg, do této hmotnosti není započítána hmotnost kabelových rozvodů, lepení a hmotnost montážních pásek. Lze tedy tvrdit, že limit 150 kg pro konstrukci není přesažen, a flyboard tak bude mít vypočítané technické parametry.

Vrtule jsou pod úrovní pilota, to přispívá k bezpečnosti užívání. Vrtule jsou jedinou rotující částí flyboardu. Uvázaný pilot musí udělat velký předklon, aby se do této oblasti dostal, a dále je chráněn před letícími předměty, které by mohly vrtule urychlit jeho směrem.

## 6. Závěr – navazující aktivity

Podařilo se splnit pokyny pro vypracování a cíle práce. Skript v Matlabu dokáže vypočítat z navržené hmotnosti, počtu propulzních a zadaných parametrů komponent základní technické charakteristiky flyboardu. Tento postup je poměrně rychlý, a nabízí tak konstruktérovi možnost vyzkoušet více kombinací komponent propulzní jednotky. V konstrukční části bylo naznačeno, jak lze z vypočtených dat sestavit flyboard. Flyboard je svým způsobem velmi jednoduché zařízení. U již postaveného flyboardu lze modulárně měnit zásadní komponenty, jako jsou vrtule, akumulátory, motory a regulátory. Díky tomu lze flyboard poměrně rychle obměnit na různé verze s jinými technickými parametry a výpočtem předpovědět nové letové parametry. Výpočetní skript lze aplikovat i na jiné multikoptéry.

Podařilo se navrhnout konkrétní letuschopný flyboard, který by mohl technickými parametry konkurovat již létajícím flyboardům. Navrhovaný flyboard je dostatečně výkonný, aby dokázal napomáhat začínajícím pilotům a poskytl radost z letu zkušenějším pilotům. Minimálně sedm minut letu je dost dlouho, aby si člověk užil létání. Dále je navrhovaný flyboard při svých letových parametrech schopen přeletět za sedm minut vzdálenost v řádu jednotek kilometrů. Souhra motoru a vrtule by mohla být daleko lepší, kvůli synchronizaci se nevyužije skoro přes tisíc wattů motoru.

Hlavní konstrukční inovací navrhovaného flyboardu je užití protiběžných vrtulí, které mohou mít vyšší tah než separátní vrtule. Protiběžné vrtule šetří plochu potřebnou pro umístění vrtulí a vytváří prostor pro uložení akumulátorů a elektroniky. Konstrukce je prakticky navržená tak, aby šla dobře měnit a opravovat, po záletu a získání empirických dat by šla konstrukce vylepšit.

Konstrukce bere v potaz tvrdá přistání díky měnitelným silentblokům. Nevýhodou je vysoká hmotnost konstrukce, jen akumulátory mají hmotnost okolo 80 kg. K manipulaci s navrhovaným flyboardem bude potřeba více lidí. Na větší vzdálenosti by se k přepravě využil upravený přívěs tažený osobním automobilem.

Pokud by vznikl požadavek na vylepšení výpočtů, tak pro zpřesnění získávání letových technických parametrů lze využít počítačové mechaniky tekutin, která by měla být vhodně doplněna experimentem. Pro vylepšení pevnostních výpočtů lze využít metodu konečných prvků. Důležité je samotné létání s měřicí technikou, které může přinést nové znalosti, a stanovit tak nové zjednodušené empirické vztahy.

Další kontroly a výpočty, které by u flyboardů mohly být provedeny, jsou kontroly na oteplení motorů a akumulátorů, na jejichž základě by šel navrhnout aerodynamičtější kryt akumulátorů, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám výkonu celého stroje. Vhodné by bylo stanovit, kolik propulzních jednotek může selhat, aniž by hrozil pád. Vhodné by bylo ošetření elektrických součástí, aby při pádu do vody neublížily pilotovi.

Během výpočtů se uvažovaly hodnoty udávané výrobcem. Bezkartáčové stejnosměrné motory však jde na krátkou dobu momentově přetížít a dostat se na maximální výkon uváděný výrobcem. Bylo by možné tak ještě o něco krátkodobě zvyšovat výkon flyboardu. Tohoto jevu by bylo vhodné využít pro vyrovnání při překročení kritického úhlu.

Myslím si, že v budoucnu budeme flyboardy potkávat častěji, nikdy však nebudou masově rozšířené kvůli velmi vysokým pořizovacím cenám komponent, z kterých jsou sestaveny. Kromě sportovního létání lze využít flyboard pro umění, např. pro natáčení filmů nebo na rozšíření cirkusových čísel. O flyboard by také mohly mít zájem organizace, které potřebují rychlý přesun bez závislosti na terénu, jedná se např. o složky integrovaného záchranného systému a armádu. Další výhodou je v tomto případě, že kromě ovládacího zařízení může mít pilot volné ruce, a plnit tak za letu další úkoly.

## 7. Zdroje

- [1] Sonnie Bean, on the Flyboard. In: *Flickr* [online]. Chelmsford: Macdonald, 2016 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/ronmacphotos/27521396070/>
- [2] Eleif.net. In: *Eleif.net* [online]. Hamburg, Kayser [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://eleif.net/>
- [3] HUMAN FLYING DRONE. In: *Youtube* [online]. New York: Neistat, 2016 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=At3xcj-pTjg&t=1s>
- [4] ELKINS, Jeff. Control. In: *Youtube* [online]. Elkins, 2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=rEaAbUGADTw>
- [5] VALIANTE, Giuseppe. Montrealer sets world record for farthest flight by hoverboard. In: *CBC* [online]. [Montreal]: The Canadian Press, 2015 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/montrealer-sets-world-record-for-farthest-flight-by-hoverboard-1.3085052>
- [6] Turnigy RotoMax 1.60 Brushless Outrunner Motor. In: *Hobbyking.com* [online]. Hong Kong: Hobbyking.com [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-rotomax-1-60-brushless-outrunner-motor.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-rotomax-1-60-brushless-outrunner-motor.html?__store=en_us)
- [7] Omni Hoverboards Prototype 2. In: *Electric VTOL News* [online]. Fairfax: Vertical Flight Society, 2017 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://evtol.news/omni-hoverboards-prototype-2>
- [8] Canadian Develops Futuristic Hoverboard. In: *Youtube* [online]. [Montreal]: CBC News: The National, 2015 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=AUq3mBuENiw>
- [9] Omni Hoverboard | The Henry Ford's Innovation Nation. In: *Youtube* [online]. Dearborn: The Henry Ford, 2017 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=SqgD9JepYWg&t=55s>
- [10] 'SkySurfer' Aircraft| A Qualified Ultra-Light Hoverboard Aircraft [online]. Los

- Angeles: Manned Aviation Inc., 2020 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://skysurferaircraft.com/>
- [11] STEAM: Meet A Sky Surfer. In: *Youtube* [online]. Los Angeles: CBS Los Angeles, 2021 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QoBNXDKAFYQ>
- [12] *Compotech* [online]. Sušice: Compo Tech PLUS, 2007 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://compotech.com/cs/technologie/proces-firmy-compotech/>
- [13] Cubepilot. In: *Cubepilot* [online]. Geelong: CubePilot, 2021 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.cubepilot.com/>
- [14] AKUMULÁTORY. In: *TEM Electronics komponents* [online]. Ostrava: TME Czech Republic [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/cz/katalog/akumulatory\\_100076/](https://www.tme.eu/cz/katalog/akumulatory_100076/)
- [15] YEDAMALE, Padmaraja. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. In: *ELECTRATHON OF TAMPA BAY* [online]. Chandler: Microchip Technology Inc., 2003 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>
- [16] Aktuální katalog. In: <https://www.modelmotors.cz/> [online]. Hradec Králové: MODEL MOTORS, 2022 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: [https://www.modelmotors.cz/file/wisiwig/files/actual\\_katalog\\_hr.pdf](https://www.modelmotors.cz/file/wisiwig/files/actual_katalog_hr.pdf)
- [17] Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv. In: *Hobbyking.com* [online]. Hong Kong: Hobbyking.com [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: [shorturl.at/ijBTX](https://shorturl.at/ijBTX)
- [18] *Step 5: Motor Selection* [online]. In: . [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://uav.jreyn.net/quadcopter-design/step-5-motor-selection>
- [19] 27x13E. In: *APC Propellers* [online]. Woodland: APC Propellers, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: [https://www.apcprop.com/files/PER3\\_27x13E.dat](https://www.apcprop.com/files/PER3_27x13E.dat)
- [20] BENDA, Josef a Růžena ČERNÁ. *Numerická matematika: doplňkové skriptum*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 97880-01-04037-9.
- [21] Na kolik V vybijet lipol baterie. In: *LipolBaterie.cz* [online]. Škvorec: LipolBaterie, c2014-2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z:

<https://www.lipolbaterie.cz/navody/na-kolik-v-vybijet-lipol-baterie/>

- [22] Gens Ace LiPo Tattu Serie - 6S 23000mAh 22,8V 6S1P HV (25C) XT150/AS150 Plug. In: *PECKA MODELÁŘ* [online]. Praha: PECKA MODELÁŘ, c2011-2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/taa23k6s25asx-gens-ace-lipo-tattu-serie-6s-23000-mah-25c>
- [23] NOŽIČKA, Jiří. *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-2865-8.
- [24] BRADA, Martin. *Experimentální analýza protiběžných vrtulí*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky. Vedoucí práce Ing. Vít Štorch.
- [25] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [26] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2375-3.
- [27] *PROAL* [online]. Ostrava: NPS PROAL, 2019 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://proal.cz/>
- [28] PRYŽOVÉ SILENTBLOKY TYP E. In: *Marek.cz* [online]. Brno: Marek Industrial, c2017-2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: [https://www.marek.eu/norelem-normovane-dily/systemy-a-komponenty-pro-vyrobu-stroju-a-zarizeni/sroubova-tlacne-pruziny-elastomerove-pruziny-pryzove-sientbloky-tlumice-narazu-plynovy-pruziny/pryzokovove-dorazy/25516/pryzove-silentbloky-typ-e.html#\\_technicke-parametry](https://www.marek.eu/norelem-normovane-dily/systemy-a-komponenty-pro-vyrobu-stroju-a-zarizeni/sroubova-tlacne-pruziny-elastomerove-pruziny-pryzove-sientbloky-tlumice-narazu-plynovy-pruziny/pryzokovove-dorazy/25516/pryzove-silentbloky-typ-e.html#_technicke-parametry)
- [29] TANG, Harvick. APC 12x6 EP Prop. In: *GrabCAD* [online]. Orlando: Tang, 2017 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/apc-12x6-ep-prop-1>
- [30] JOSEFSSON, Maria. Snowboardbinding. In: *GrabCAD* [online]. Luleå: Josefsson, 2020 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/snowboardbinding-1>
- [31] MARTENS, Dennis. Turnigy RotoMax 100cc Size Brushless Outrunner Motor 167kv. In: *GrabCAD* [online]. (Nizozemsko): Martens, 2016 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/turnigy-rotomax-100cc-size->

brushless-outrunner-motor-167kv-1

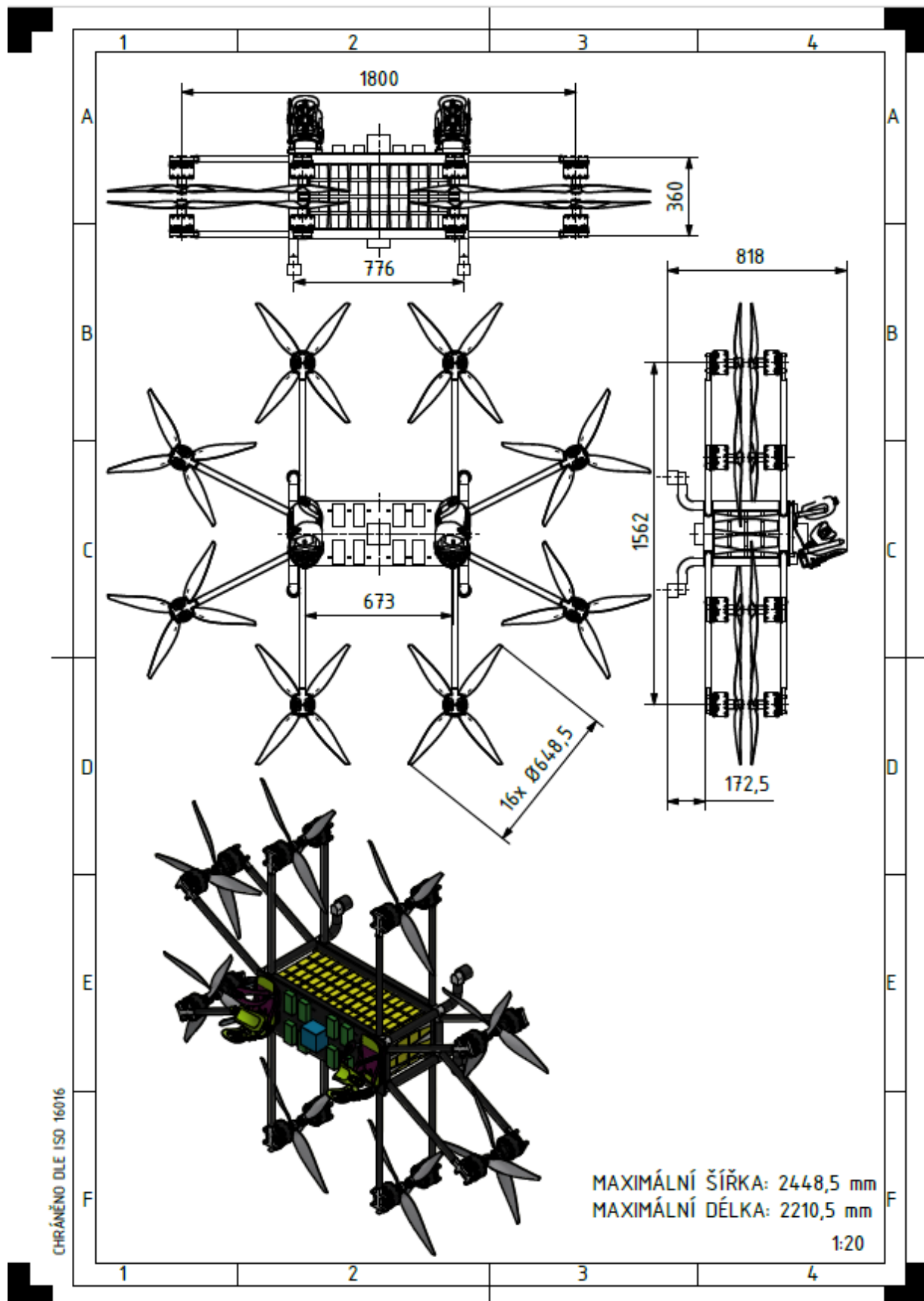
- [32] YEP ESC 180A HV (4~14S) Brushless Speed Controller (OPTO). In: *Hobbyking.com* [online]. Hong Kong: Hobbyking.com [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/en\\_us/yep-180a-hv-4-14s-brushless-speed-controller-opto.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/yep-180a-hv-4-14s-brushless-speed-controller-opto.html?__store=en_us)

## 8. Seznam příloh

Příloha 1 – Výkres navrženého flyboardu

Příloha 2 – Část skriptu Matlabu pro výpočet synchronního výkonu motoru podle otáček

# Příloha 1 - Výkres navrženého flyboardu



## Příloha 2 – Část skriptu Matlabu pro výpočet synchronního výkonu motoru podle otáček

### Výpočet vrtule

Dodání dat od výrobce vrtule

```
xx_F=Ft/n_pohon_jednotek; %dává sílu tíhovou v N hledanou na
jednu vrtuli
xx_P=P_hridel;
xx_RPM=RPM_hridel;
xx_M=M_hridel;

%27x13E
F_vrtule_lbf= [1.475 , 5.980 , 13.747 , 24.442 , 38.777 ,
56.989 , 78.431 , 101.713]';

P_vrtule_hp= [0.036 , 0.328 , 1.388 , 2.630 , 4.568 ,
8.195 , 15.321 , 26.727 ]';

RPM_vrtule= [1000 , 2000 , 3000 , 4000 , 5000 , 6000
, 7000 , 8000 ]';

M_vrtule_in_lbf=[2.298 , 10.332 , 29.170 , 41.440 , 57.580 ,
86.087 , 137.947 , 210.556]';

F_vrtule=F_vrtule_lbf.*4.44822162; % převod na [N]
P_vrtule=P_vrtule_hp.*745.699872; % převod na [W]
M_vrtule=M_vrtule_in_lbf.*0.112985; %převod na [Nm]

if length(F_vrtule)~=length(P_vrtule)
error('Data si neodpovídají.')
end

if length(F_vrtule)~=length(RPM_vrtule)
error('Data si neodpovídají.')
end

if length(F_vrtule)~=length(M_vrtule)
error('Data si neodpovídají.')
end

n_aprox = length(F_vrtule);

%závislost otáček na výkonu-----
st1=2; %stupeň aproximačního polynomu
A1 = ones(n_aprox,st1+1);
for i1= 1:st1
for j1= 1:n_aprox
A1(j1,i1+1)=(P_vrtule(j1,1).^i1);
```



```

    end
end
AA1 = (A1' * A1);
b1 = A1' * RPM_vrtule;
aa1 = AA1\b1;

koe1=zeros(st1+1,1);

for u1 = 1:st1
    koe1(1+u1,1)=u1;
end
koj1=[koe1,aa1]';

yy_RPM1= 0;
for p1 = 0:st1
    yy_RPM1=yy_RPM1 + aa1(p1+1) * xx_P.^(p1);
end
if RPM_hridel>=yy_RPM1
    disp('ok motor poskytne vyšší otáčky než jaké potřebuje vrtule')
    P_hridel_synchron_RPM=P_hridel;
else
    disp('výkon se sníží na výkon o maximálních provozních otáčkách')
    st2=2; %stupeň aproximačního polynomu
    A2 = ones(n_aprox,st2+1);
    for i2= 1:st2
        for j2= 1:n_aprox
            A2(j2,i2+1)=(RPM_vrtule(j2,1).^i2);
        end
    end
    end
    AA2 = (A2' * A2);
    b2 = A2' * P_vrtule;
    aa2 = AA2\b2;

    koe2=zeros(st2+1,1);

    for u2 = 1:st2
        koe2(1+u2,1)=u2;
    end
    koj2=[koe2,aa2]';

    yy_P2= 0;
    for p2 = 0:st2
        yy_P2=yy_P2 + aa2(p2+1) * xx_RPM.^(p2);
    end
    P_hridel_synchron_RPM=yy_P2

```