



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## LÉTAJÍCÍ ROBOT PRO GEOFYZIKÁLNÍ ÚČELY

FLYING ROBOT FOR GEOPHYSICAL PURPOSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB RŮŽIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. SIMEON SIMEONOV, CSc.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jakub Růžička

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Létající robot pro geofyzikální účely**

v anglickém jazyce:

### **Flying robot for geophysical purposes**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Deskripce speciálních robotů pro geofyzikální účely. Předběžný návrh možných konfigurací.

Cíle bakalářské práce:

Deskripce speciálních robotů pro geofyzikální účely. Předběžný návrh možných konfigurací.

Seznam odborné literatury:

Talácko, J.: Automatizace výrobních zařízení. Praha, ČVUT, 2000.

Matička, R., Talácko, J.: Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů, Praha

Kolíbal, Z.: Průmyslové roboty I.-Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů

Talácko, J.- Matička, R.: Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. ČVUT, Praha 1995

Bělohoubek, P.-Kolibal, Z.: Průmyslové roboty IV. VUT, Brno 1993

<http://roboter.industrienet.de/>

www - Flying robot

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 26.11.2009

L.S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá výběrem vhodné konfigurace bezpilotního prostředku se svislým startem a přistáním a možností visu. Proto se soustředí na zmapování převážně vrtulníkových koncepcí, zejména těch které se u takovýchto bezpilotních prostředků používají nebo se pro toto použití jeví jako vhodné. Dále obsahuje měření tahu. Závěrečná část je zaměřena na návrh čtyř konfigurací vhodných pro UAV a jejich porovnáním pomocí AHP.

## **Abstract**

This work deals with the selection of UAV configurations with vertical take-off and landing and the hovering ability. Therefore it is focused on a mostly helicopter conceptions, especially the ones used UAVs or those which may seem suitable for UAV usage. It also contains the thrust measurement. The final part is aimed at design of four configurations suitable for UAV and their comparison using AHP.

## **Klíčová slova**

Létající robot, autonomní vrtulník, bezpilotní vrtulník, měření tahu

## **Keywords**

Flying robot, UAV, unmanned aerial vehicle, autonomous helicopter, unmanned helicopter, thrust measurement

## **Bibliografická citace**

RŮŽIČKA, J. *Létající robot pro geofyzikální účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.



## **Prohlášení autora o původnosti práce**

*Já, Jakub Růžička, prohlašuji, že tato bakalářská práce je mým dílem, které jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce. Veškerou literaturu a další zdroje, ze kterých jsem čerpal jsem uvedl v seznamu použité literatury.*

*V Brně dne: 20.5.2010*

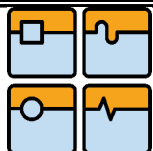
.....



## **Poděkování**

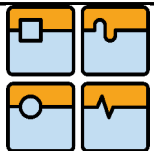
Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Simeonu Simeonovi, CSc., za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce, doc. Ing. Miroslavu Petráskovi, CSc., za cenné rady z oblasti konstrukce vrtulníků, Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana, především Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D., za umožnění měření, Ing. Petru Latinovi za pomoc s řešením zapojení měřících přístrojů a v neposlední řadě rodině za podporu při studiu.





## Obsah

Úvod.....	12
1. Koncepce.....	12
1.1 Vzducholodě.....	12
1.2 Letadla s rotujícími nosnými plochami.....	12
2. Rozdělení letadel s rotujícími nosnými plochami.....	13
2.1 Vírník.....	13
2.2 Kombinovaný vrtulník (konvertaplan).....	14
2.3 Tiltrotor.....	14
2.4 Gyrodyn.....	15
2.5 Vrtulník.....	15
3. Reakční a klonivý moment a způsoby jejich vyrovnávání.....	16
3.1 Reakční moment a jeho eliminace.....	16
3.2 Klonivý moment a způsoby jeho vyrovnávání.....	17
4 Rozdělení vrtulníků podle počtu rotorů a umístění rotorů.....	18
4.1 Jednorotorové vrtulníky.....	18
4.2 Dvourotorové.....	20
4.2.1 Dvourotorový vrtulník s rotory uspořádanými příčně.....	20
4.2.2 Dvourotorový vrtulník s překrývajícími se rotory.....	20
4.2.3 Dvourotorový vrtulník se sousými (koaxiálními) rotory.....	24
4.3 Víceroťorové stroje.....	28
4.3.1 Třírotorové.....	28
4.3.2 Čtyřrotorové (Quadrocoptery, Quadrotory).....	30
4.3.3 Šestiroťorové.....	30
4.3.4 Kryty rotorů.....	31
5. Měření tahu.....	32
5.1 Naměřené hodnoty.....	35
6. Navrhovaná řešení.....	37
6.1 Jeden rotor.....	37
6.2 Tři rotory.....	39
6.3 Čtyři rotory.....	41
6.4 Dva rotory koaxiálně.....	42
7. Porovnání.....	43
7.1 Dostupnost dílů – 0,1.....	43
7.2 Symetričnost – 0,36.....	43
7.3 Mechanická jednoduchost – 0,3.....	43
7.4 Minimální počet motorů – 0,07 a minimální počet servomotorů – 0,04.....	44
7.5 Část výkonu využitá k tahu – 0,1.....	44
7.6 Dostupnost informací – 0,03.....	44
7.7 Autorotace – 0,03.....	44
7.8 Výsledek.....	44
7.9 Výpočet.....	45
Závěr.....	47
Seznam použité literatury.....	48
Seznam použitých zkratk.....	50
Seznam obrázků.....	51



## Úvod

Jako u většiny inovací v letectví, na počátku rozvoje bezpilotních prostředků stály především požadavky armády. Ze cvičných cílů se jejich použití postupně rozšířilo zejména do oblasti průzkumu. V současné době je na pořadu dne bojové nasazení bezpilotních prostředků.

Především s rozvojem výpočetní techniky v posledních 20 letech začaly bezpilotní prostředky pronikat i do civilních oblastí.

Tato práce si bere za úkol zmapovat nejen konfigurace existujících autonomních bezpilotních prostředků, ale i vrtulníkové koncepce, které by mohly být pro autonomní bezpilotní prostředky vhodné.

## 1. Koncepce

Jedněmi z hlavních požadavků kladených na tento projekt je schopnost visení a schopnost svíslého startu a přistání (VTOL). Tyto požadavky nejlépe splňují letadla s rotujícími nosnými plochami a také vzducholodě.

### 1.1 Vzducholodě

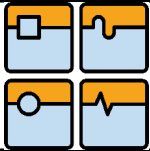
Přes velkou řadu výhod vzducholodí, pro naše použití převažují spíše nevýhody.

Výhodami jsou například výrazně nižší spotřeba paliva ve srovnání s letadly s rotujícími nosnými plochami, navíc možnost využít paliva k nadlehčování vzducholodě. Toto bylo použito u vzducholodí Zeppelin, které byly poháněny nestlačeným plynem. Této vlastnosti ovšem vzhledem k plánovanému použití elektrického pohonu nelze využít.

Hlavní nevýhodou jsou obrovské rozměry. Proto aby byla celková hustota stroje rovna hustotě suchého vzduchu, by bylo při požadovaných deseti kilogramech zátěže nutné použít přibližně devět metrů krychlových helia (cca válec o průměru jeden metr a délce 11 m).

### 1.2 Letadla s rotujícími nosnými plochami

Jsou předmětem následujících kapitol.



## 2. Rozdělení letadel s rotujícími nosnými plochami

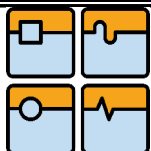
### 2.1 Vírník

Jelikož vírník potřebuje k vyvinutí vztlaku dopředný pohyb (vztlak je vytvářen autorotací), není tedy schopen ani svislého startu a přistání, ani visení. Je proto uváděn zejména pro úplnost přehledu.



**Obr. 2.1 Vírník**

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bensengyrocopter001.jpg>



## 2.2 Kombinovaný vrtulník (konvertaplan)

Trup konvertaplanu je konstrukcí s křídly podobný letadlu. U konvertaplanu je motorem poháněna vrtule a rotor. Vrtule slouží k vyvíjení dopředného tahu. Při přistání, startu, visení a pomalém dopředném letu se využívá vztlaku od rotoru. Kdežto při rychlém dopředném letu se využívá vztlaku od křídel (vztlaku od křídel využívají při vyšších rychlostech i některé vrtulníky, například Mil Mi-24).

Toto uspořádání umožňuje dosáhnout vyšších rychlostí než u klasického vrtulníku [8].



**Obr. 2.2 Kamov Ka-22 Vintokryl**

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/4d/Kamov\\_Ka-22.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/4d/Kamov_Ka-22.jpg)

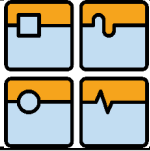
## 2.3 Tiltrotor

Konstrukce tiltrotoru je v principu shodná s konvertaplanem s tím rozdílem, že tiltrotor používá namísto vrtule pro dopředný tah a rotoru pro vztlak jeden natáčecí rotor.



**Obr. 2.3 V-22 Osprey**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:CV-22\\_Formation.jpeg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:CV-22_Formation.jpeg)



## 2.4 Gyrodyn

Je motorové letadlo, vrtulník, který používá k dopřednému letu tahu vyrovnávacího rotoru.



**Obr. 2.4 Fairey FB-1**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fairey\\_FB-1\\_Gyrodyne.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fairey_FB-1_Gyrodyne.jpg)

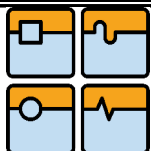
## 2.5 Vrtulník

Motorové letadlo, které se udržuje a pohybuje ve vzduchu účinkem rotujících nosných ploch poháněných motorem.



**Obr. 2.5 Mil Mi-24**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mi-24\\_Desert\\_Rescue.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mi-24_Desert_Rescue.jpg)



### 3. Reakční a klonivý moment a způsoby jejich vyrovnávání

#### 3.1 Reakční moment a jeho eliminace

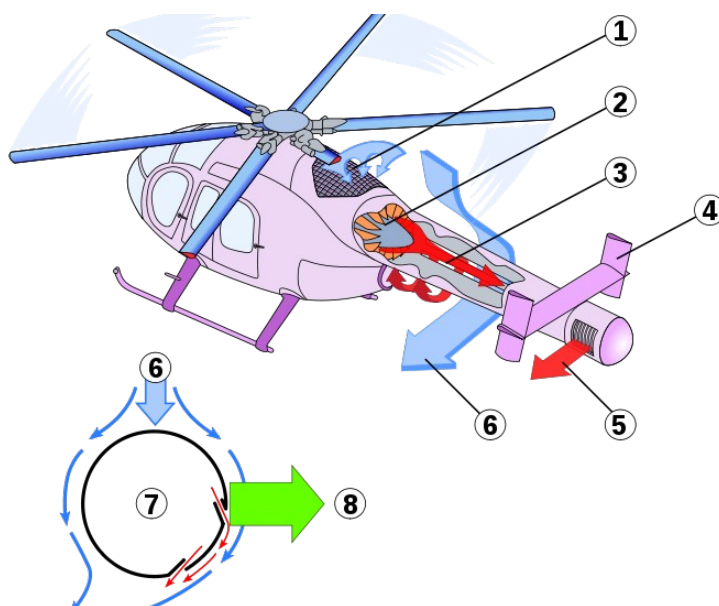
Reakční moment se vyskytuje jen u vrtulníků s mechanickým pohonem, u vrtulníků s reaktivním pohonem se reakční moment nevyskytuje a není ho tedy třeba vyrovnávat.

U jednorotorových vrtulníků je možné ho odstranit: použitím ocasního rotoru [8] nebo dmyhadla (například v ČR rozšířený Eurocopter EC-135), vyfukováním plynů na konci ocasu takovým směrem, aby vytvářely síly proti směru reakčního momentu (systém NOTAR-NO Tail Rotor) [8] [10]. Tohoto systému bylo užito již v roce 1946 na vrtulníku Cierva W9, v současné době je používán například na vrtulnících McDonnell-Douglas.



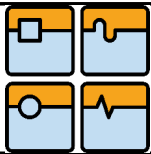
**Obr. 3.1 Eurocopter EC-135**

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:EC135T1.jpg>



**Obr. 3.2 Systém NOTAR**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:NOTAR\\_System.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:NOTAR_System.svg)



U strojů se sudým počtem rotorů, z nichž polovina je protiběžná, se reakční momenty rotorů při stejném úhlu nastavení navzájem nulují.

U třírotorových strojů, kdy se dva rotory otáčejí jedním směrem a třetí směrem opačným, je moment vyrovnáván nakloněným třetím rotorem (jeho tahem).

U čtyřrotorových strojů, u kterých se všechny rotory otáčejí stejným směrem, je moment eliminován nakloněním několika rotorů tak, aby část tahu rotoru směřovala proti reakčnímu momentu. Tato konfigurace je užívána v případech, kdy protiběžné vrtule v potřebné velikosti nejsou dostupné.



**Obr. 3.3 Nakloněný rotor**

<http://www.diydrones.com/photo/arduimu-quadcopter-3/prev?context=user>

### 3.2 Klonivý moment a způsoby jeho vyrovnávání

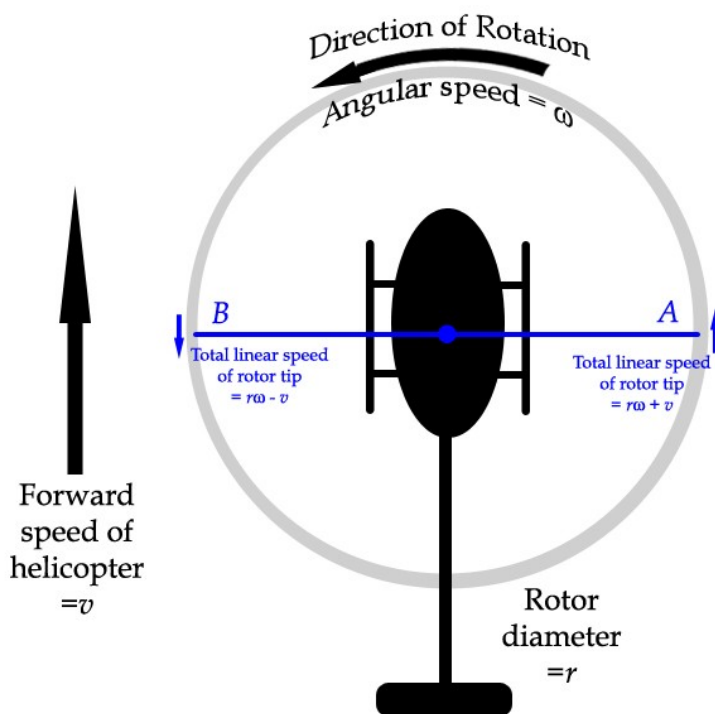
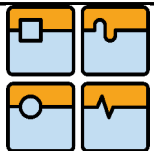
Ustupující listy rotoru jsou obtékány menší rychlostí než listy postupující, výsledný tlak tedy nepůsobí v ose rotoru. To může způsobit kymácení vrtulníku.

„Listy pohybující se v rozmezí úhlů  $y = 0^\circ$  až  $180^\circ$  nazýváme listy postupující, kdežto v druhé polovině otáčky pro  $y = 180^\circ$  až  $360^\circ$  nazýváme listy ustupujícími. Na listech vzniká při tom nesouměrnost relativních rychlostí, takže postupující listy jsou obtékány proudem vzduchu o větší rychlosti (vznik většího vztlaku), ustupující o menší rychlosti (menší vztlak). Výsledný vztlak L rotoru nepůsobí tedy v ose rotoru, ale je vyosen o rameno c.

Tím vznikne klonivý moment k těžišti vrtulníku  $M_x = L \cdot c$ , který má snahu naklánět vrtulník na stranu ustupujících listů“ [10]

Klonivý moment se odstraňuje pomocí mávání listů. Postupující list mává nahoru, čímž se snižuje jeho vztlak, zatímco ustupující list mává dolů a jeho vztlak vzrůstá.

U vrtulníků se sudým počtem protiběžných a vůči dopředné ose symetrických rotorů, které jsou vzájemně synchronizovány, se při stejném úhlu nastavení moment vyroší.



**Obr. 3.4 Klonivý moment – rozdíl rychlostí konců rotorů v bodech A a B**  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dissymmetry\\_Of\\_Lift.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dissymmetry_Of_Lift.jpg)

## 4 Rozdělení vrtulníků podle počtu rotorů a umístění rotorů

### 4.1 Jednorotorové vrtulníky

Jednorotorové vrtulníky mají jeden hlavní rotor a jeden ocasní rotor sloužící k vyrovnávání reakčního momentu a tím také k otáčení okolo svislé osy vrtulníku.

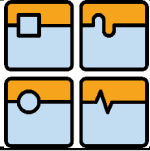
Výhodou je jednoduchá transmise, konstrukčně jednoduché řízení a poměrně nízké pořizovací a provozní náklady. [8]

Mezi nevýhody patří malý přípustný rozsah těžiště [17], zhoršená říditelnost v některých přechodových režimech letu a ztráta výkonu pohonem ocasního rotoru, která se pohybuje v rozsahu šesti až osmi procent.

Ocasní rotor je zpravidla poháněn hřídelí od hlavního reduktoru, ale u některých elektricky poháněných RC vrtulníků je poháněn vlastním elektromotorem. Pěkným příkladem je mikrovrtulník Blade mSR vyráběný společností E-Flite. Tento vrtulník má zjednodušenou šikmou desku, která umožňuje pouze cyklické řízení.

Změna tahu rotoru není zajišťována kolektivním řízením, ale změnou otáček motoru.

Vrtulník je vybaven Hillerovým stabilizátorem.

**Obr. 4.1 E-flite Blade mSR**

<http://www.bladehelis.com/ProdInfo/Gallery/EFLH3000-GAL4.jpg>

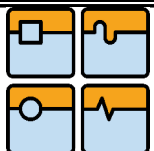
Jednorotorová konfigurace je použita například na projektu RAMA Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Jako základ byl použit vrtulník HIROBO sst-eagle Freya Koncept. Jedná se o jednorotorový vrtulník, jehož hlavní i vyrovnávací rotor jsou poháněny jedním spalovacím motorem o objemu 10 ccm. Hlavní rotor o průměru 1600 mm je tvořen dvěma listy. Celková hmotnost vrtulníku je přibližně 7kg. [5] Rotorová hlava ovládaná 4 servy je doplněna Bell-Hillerovým stabilizátorem. Dvoulístý ocasní rotor je poháněn hřídelem. [5]

Řídicí systém vrtulníku se skládá z pozemní stanice a vrtulníkové části. [22]

Pozemní část je tvořena počítačem a RC vysílačem. V projektu RAMA funguje strana přijímače jako u běžné RC soupravy, ale vysílač je řízen pozemním PC [22]. Data o poloze jsou pozemní stanici přenášena pomocí WiFi [22].

**Obr. 4.2 RAMA**

[http://rtime.felk.cvut.cz/helicopter/\\_media/start.jpg?w=640&h=&cache=cache](http://rtime.felk.cvut.cz/helicopter/_media/start.jpg?w=640&h=&cache=cache)



## 4.2 Dvourotorové vrtulníky

### 4.2.1 Dvourotorový vrtulník s rotory uspořádanými příčně

Rotory jsou umístěné ve stejné výšce a jejich osy otáčení jsou kolmé na osu kolmou na dopředný pohyb vrtulníku.

Tento typ uspořádání patří mezi koncepce používané na prvních funkčních vrtulnících (Focke-Achgelis Fa 223, Focke-Wulf Fw 61).

Mezi hlavní výhody patří dobrá říditelnost a dobrá příčná stabilita a stejně tak jako u následujících dvourotorových vrtulníků to, že není třeba reakční moment kompenzovat ocasním rotorem. [8]

Nevýhodou je složitější konstrukce ovládání a s tím spojená vyšší cena. Na realizaci by bylo nutné použít, při uvažování nejjednoduššího systému řízení (ovšem samozřejmě umožňujícího použití kolektivního i cyklického řízení), šest servomotorů. U jednorotorového vrtulníku by, při užití stejného systému řízení, stačily servomotoru čtyři. Další nevýhoda je prostorová náročnost.



**Obr. 4.3 Mil Mi-12**

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:MI-12.JPG>

### 4.2.2 Dvourotorový vrtulník s překrývajícími se rotory

Rotory jsou umístěné ve stejné výšce a jejich osy otáčení se nacházejí v rovině kolmé na dopředný pohyb vrtulníku. Osy otáčení nejsou vzájemně zcela rovnoběžné (svírají ostrý úhel) a jejich vzájemná vzdálenost je blízká šířce trupu vrtulníku.

Výhodou jsou kompaktní rozměry a ve srovnání s příčným (za předpokladu, že jsou oba rotory poháněny jedním motorem) a tandemovým uspořádáním výrazně kratší transmise.

Nevýhodou je nutnost synchronizace rotorů, možnost použití pouze dvoulistých rotorů (teoreticky by bylo možné i použití jednolistého rotoru), a větší stavební výšce vrtulníku [8]. Jednolistý rotor byl v praxi použit na trenažéru Bölkow Bo-102 a prototypu Bölkow Bo-103.

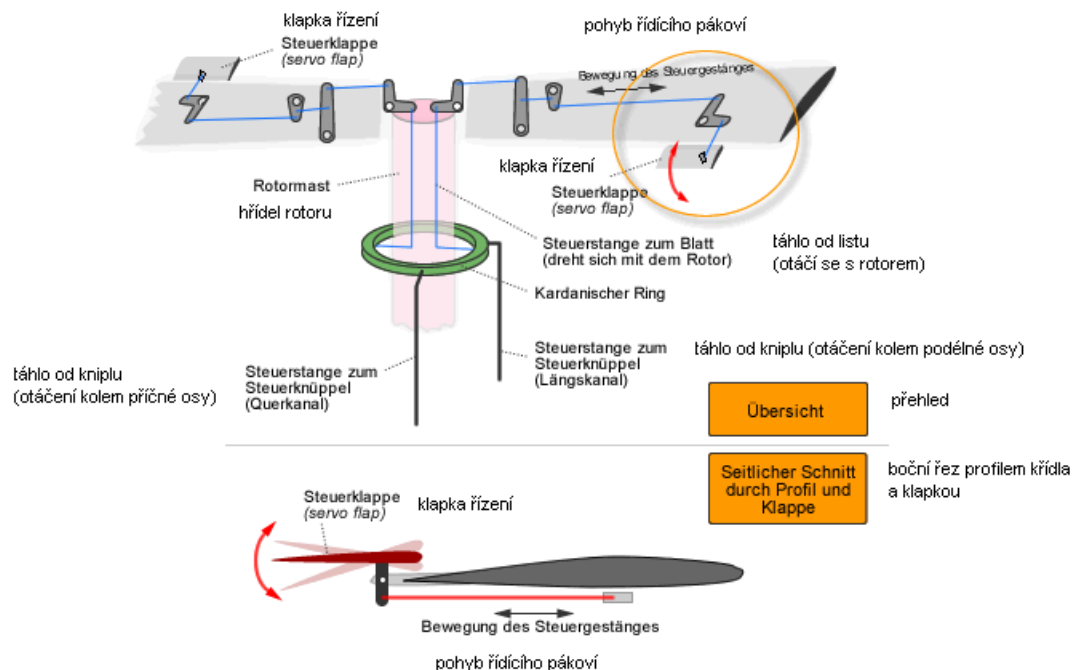


## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přestože vrtulníky s překrývajícími se rotory patří k vůbec prvním vrtulníkům schopným úspěšného letu, po druhé světové válce se jim nedostalo velkého rozšíření.

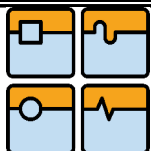
Dnes jediným sériově vyráběným vrtulníkem této koncepce je Kaman K-MAX. Za zmínku stojí fakt, že je nabízen i v bezpilotní verzi. [7]

Kaman K-MAX mimo nezvyklého uspořádání pohonu má také originální způsob ovládní, vyvinutý ve čtyřicátých letech 20. století Charlesem Kamanem a byl a je používán na všech vrtulnicích vyráběných jeho firmou. Liší se zejména část převádějící náklon šikmé desky na úhel natočení listu. Namísto přímého silového natáčení celého listu jsou natáčeny pouze klapky umístěné na odtokové hraně rotoru a změna natočení listu se děje působením aerodynamických sil, způsobených natočením klapky. Síla potřebná na natočení klapky je výrazně menší než síla potřebná na natočení celého listu a na řízení je tedy třeba mnohem menších sil. Celá soustava řízení může tedy být subtilnější a vrtulník může být ovládán přímo, bez potřeby posilovače. [20] [15]



**Obr. 4.4 Schéma ovládní vrtulniců Kaman**  
[www.nva-flieger.de/ images/hsk/servo-flap1.gif](http://www.nva-flieger.de/images/hsk/servo-flap1.gif)

K-MAX byl navržen a primárně určen ke zvedání externích břemen. Což odpovídá našim požadavkům. [7]



**Obr. 4.5 Kaman K-MAX**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:N265ka\\_krj.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:N265ka_krj.JPG)

Ač tato konfigurace není mezi RC modely běžná v Německu, odkud tato dvourotorová koncepce pochází, existuje několik RC modelů – maket vrtulníků Kaman K-MAX a Flettner FI 282 Kolibri. [23]



**Obr. 4.6 Makety Kamanu K-MAX**

<http://www.twincopter.de/index.php?id=46>

Firma Modelltechnik Jung nabízí dvourotorový vrtulník s překrývajícími se rotory poháněný benzínovým motorem o výkonu 4,1 kW nebo turbínou. Hmotnost 15 kg lehce převyšuje naše požadavky. Použitých 6 kusů servomotorů HITEC 5745 MG



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

potvrzuje naši hypotézu o minimálním počtu servomotorů, potřebných pro ovládání dvourotorových vrtulníků.

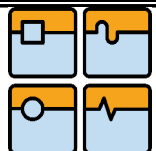
Ani u jednoho ze zkoumaných vrtulníků s překrývajícími se rotory nebylo použito ovládání za pomoci klapky na koncích listů.

Z dostupných fotografií je zřejmé, že konstrukce použitých šikmých desek je až na malé rozdíly blízka konstrukci běžně používané na jednorotorových RC vrtulnících. Délka ovládacích táhel a umístění serv se ovšem liší. Řešení reduktoru není z dostupných údajů zřejmé.

Průměr rotoru	2000 – 3000 mm [13]
Otáčky rotoru	900 – 1050 v závislosti na použitém průměru rotoru [13]
Úhel sevřený mezi osami rotorů	24° [13]
Celková délka	3200 mm [13]
Celková výška	870 mm [13]
Délka trupu	2640 mm [13]
Šířka trupu	780 mm [13]
Výška trupu	800 mm [13]
Nabízené možnosti pohonu	Jakadofsky PJW-Turbine Pro Edition Pahl-Turbine GPH70 Spalovací motor ZG62 SL [13]
Vzletová hmotnost	Přibližně 15kg [13]



**Obr. 4.7 Dvourotorový vrtulník firmy Modelltechnik Jung**  
[http://www.cad-modelltechnik-jung.de/images/Kamax-Trainer\\_12.jpg](http://www.cad-modelltechnik-jung.de/images/Kamax-Trainer_12.jpg)



#### 4.2.3 Dvourotorový vrtulník se sousými (koaxiálními) rotory

Dva rotory s opačným smyslem otáčení jsou umístěné nad sebou ve stejné ose.

Toto uspořádání přináší menší půdorysné rozměry a je navíc zcela symetrické. Nevýhodou se jeví možnost střetu obou rotorů při prudkém stoupání či klesání. Komplikovaný je přenos momentu do horního rotoru a jeho řízení.

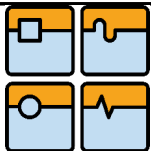
Existují RC vrtulníky se sousou konfigurací, u kterých je použito velmi zjednodušené ovládání s absencí kolektivního řízení. (Například Esky Big Lama nebo Blade mCX). Spodní rotor je ovládán zjednodušenou šikmou deskou, která zajišťuje cyklické řízení (podobně jako u Blade mSR). Horní rotor je vybaven pouze Bellovým stabilizátorem a cyklické řízení mu chybí. Kolektivní řízení je nahrazeno zvyšováním a snižováním otáček rotorů. Oba rotory jsou tedy poháněny nezávisle, každý svým vlastním motorem. Hnací hřídel spodního rotoru je dutý a prochází jím hnací hřídel horního rotoru.

Toto uspořádání je vhodné pouze pro použití uvnitř budov, kde se chová velmi stabilně. Venkovní použití není možné, protože poryv větru může způsobit takové vychýlení horního rotoru, které vede ke střetu s rotorem spodním a následnému pádu. [4]



**Obr. 4.8 Esky Big Lama**

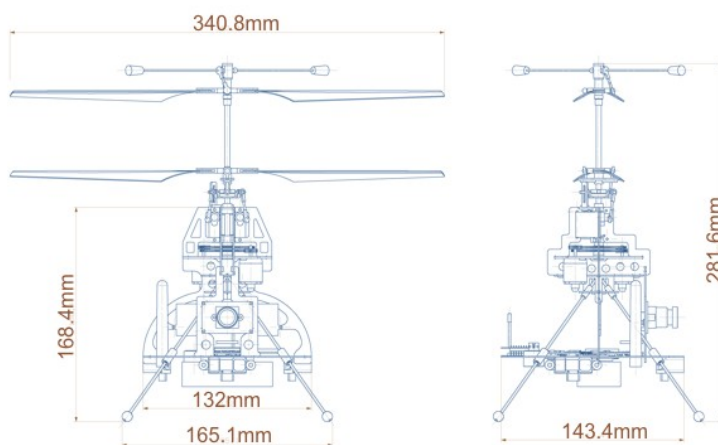
<http://www.esky-heli.com/esky-big-lama-4ch-coaxial-rc-helicopter-rtf-000054-p-4962.html>



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

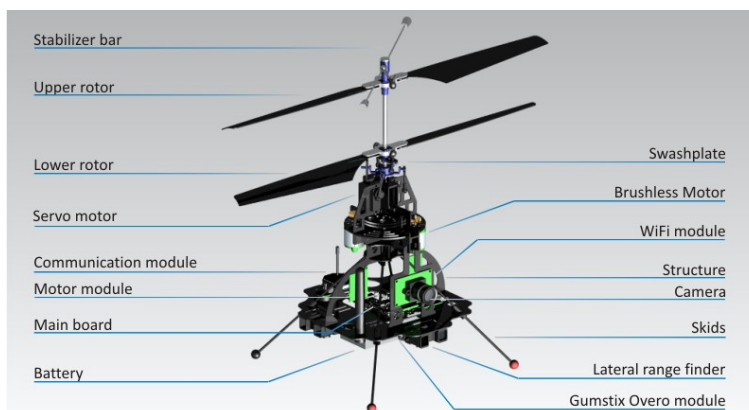
Výše zmíněného zjednodušeného uspořádání užívá robot CoaX od firmy Skybotix. Jeho základem je počítač Gumstick Overo, o velmi malých rozměrech, 17 mm x 58 mm x 4.2 mm a hmotnosti jen 6 g, s operačním systémem Linux, umožňující připojení USB kamery. Video z kamery je možné odesílat pomocí WiFi (připojené pomocí USB). Gumstick Overo je doplněno dvěma mikrokontrolery. WiFi společně se ZigBee (2.4GHz XBee XB24-BWIT-004 s maximálním dosah 120 m a maximální datový přenos 250 kb/s) nebo Bluetooth je také možné použít k komunikaci s robotem. Robot lze alternativně ovládat pomocí RC soupravy. Co se senzorů týče, základem je IMU skládající se z dvouosého gyroskopu pro osy x a y, jednoosého gyroskopu pro osu z, trojosého akcelerometru a 3D magnetometru. Tyto jsou doplněny tlakovým senzorem a sonarem pro určování výšky. Lze doplnit i IR senzory měřící vzdálenost od okolí až do 1,2 m.

Celkové rozměry jsou patrné z obrázku. Hmotnost se pohybuje okolo 300 g. Pohon zajišťují dva bezkomutátorové motory. Kolektivní řízení je zajišťováno pomocí dvou servomotorů.



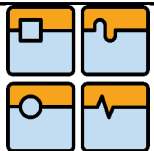
**Obr. 4.9 Skybotix CoaX – rozměry**

[http://www.skybotix.com/support/wiki/index.php/File:Coax\\_dimensions.png](http://www.skybotix.com/support/wiki/index.php/File:Coax_dimensions.png)



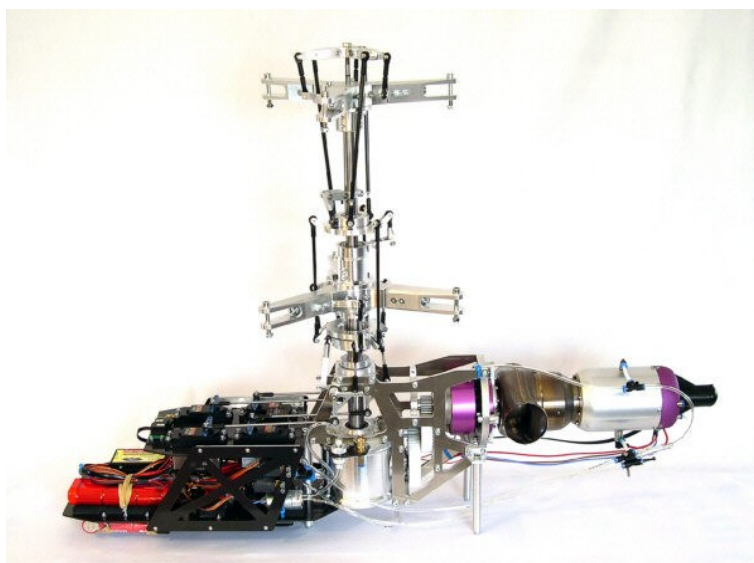
**Obr. 4.10 Skybotix CoaX**

[http://www.skybotix.com/support/wiki/images/6/69/Coax\\_elements.png](http://www.skybotix.com/support/wiki/images/6/69/Coax_elements.png)



U plnohodnotných koaxiálních vrtulníků hnací hřídel horního rotoru taktéž prochází dutou hnací hřídelí rotoru spodního. Ovšem oba rotory mají shodné a téměř konstantní otáčky. U obou rotorů je možné kolektivní i cyklické řízení. Obě šikmé desky se pohybují společně, ale pro zajištění otáčení kolem svislé osy je možné měnit kolektivní nastavení listů horního rotoru tak, aby rozdíl kolektivního nastavení vůči spodním listům způsoboval nenulový rozdíl reakčních momentů obou rotorů (a tím otáčení okolo svislé osy).

RC modely této koncepce vycházející z vrtulníků Ka-50/Ka-52 ruské konstrukční kanceláře Kamov vyrábí výše zmíněná firma Modelltechnik Jung. Parametry jsou, až na uspořádání rotorů, podobné jako vrtulníku s překrývajícími se rotory uvedeného výše. Pro ovládání je použito 4 servomotorů. [13]



**Obr. 4.11 skelet koaxiálního vrtulníku CAD+Modelltechnik-Jung**  
[http://www.cad-modelltechnik-jung.de/projekte/Koaxialmechanik\\_SPT5-H.jpg](http://www.cad-modelltechnik-jung.de/projekte/Koaxialmechanik_SPT5-H.jpg)

Tato koncepce je rozšířena převážně mezi vojenskými UAV, zpravidla o velikosti blízké se plnohodnotným vrtulníkům. Příkladem může být bezpilotní vrtulník Ka-137 konstrukční kanceláře Kamov.



**Obr. 4.12 Kamov Ka-137**

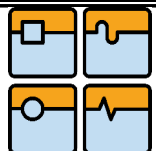
<http://www.sergib.agava.ru/russia/kamov/137/images/ka137.jpg>

Mezi příklady lze také zařadit kanadské UAV Bombardier CL-327 Guardian. Je poháněn turbohřídelovým motorem Williams International WTS-125. Maximální vzletová hmotnost 350 kg, kterou už se blíží ultralehkým vrtulníkům. [11]



**Obr. 4.13 Bombardier CL-327 Guardian**

<http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/row/CL327air.jpg>



### 4.3 Víceroťorové stroje

Rotory jsou umístěné na ramenech ve stejné vzdálenosti od středu otáčení. Konstrukce bývá obdobná, kdy ke středu jsou připevněna ramena, na kterých jsou uchyceny motory. Tato konstrukce je tedy pochopitelně prostorově náročnější, ovšem například DraganFlyer X6 lze složit do velmi prostorově úsporné transportní podoby. [6]

Rotory těchto strojů nejsou tvořeny samostatnými listy, ale zpravidla buď přímo leteckými vrtulemi, případně je jejich tvar podobný tvaru rotorů vrtulníků, které nedisponují kolektivním řízením a nemají tedy konstantní otáčky rotorů. Dalším jejich typickým znakem je absence cyklického řízení.

Jejich použití leží především v oblasti drobných UAV a to ať už dálkově řízených operátorem nebo zcela samostatných. Jsou využívány zejména civilními subjekty.

Pokud není vyžadován přenos a především zpracování obrazu, jejich elektronika se výrazně neliší. Za příklad může posloužit ArduIMU v2. Opensourcový projekt, jehož základem je mikrokontroler Atmel ATmega 328, jež vyhodnocuje signály z dvouosého gyroskopu LPR530AL pro osy x a y od společnosti STMicroelectronics, jednoosého gyroskopu LY530ALH rovněž od STMicroelectronics pro osu z a akcelerometru ADXL335 od výrobce Analog Devices. [2]

Zpravidla bývají použity i další senzory, jako jsou magnetometry, tlaková čidla a GPS moduly.

#### 4.3.1 Třírotorové

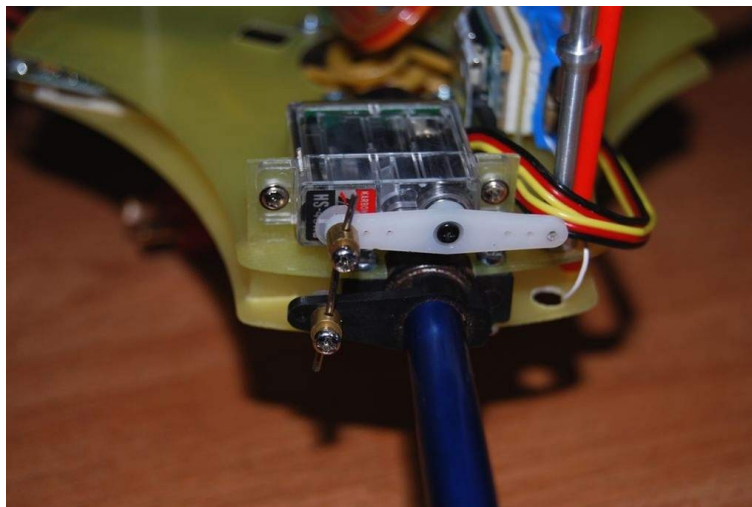
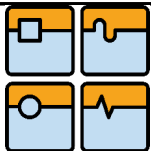
Ovládání je zajišťováno pomocí zvyšování a snižování otáček rotorů. Ovšem otáčení kolem svislé osy je zajišťováno pomocí naklápění protiběžného rotoru pomocí serva, což je specifikem tohoto uspořádání. Jednotlivé konstrukce se různí především způsobem řešení naklápění.

Příkladem může být Shrediquette DLX nebo Laheli Y-UFO.



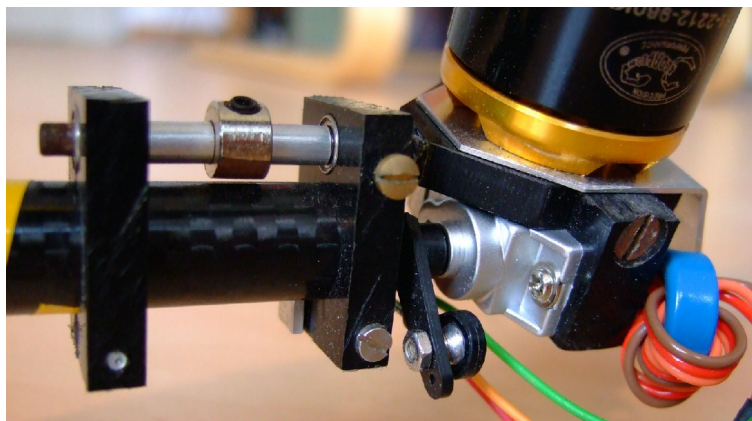
**Obr. 4.14 Shrediquette DLX**

[http://www.villalachouette.de/william/krimstricopter/websitepics/tricopter\\_dlx\\_detail0.jpg](http://www.villalachouette.de/william/krimstricopter/websitepics/tricopter_dlx_detail0.jpg)



**Obr. 4.15 Y-UFO – Naklápění rotoru**

[http://static.rcgroups.com/forums/attachments/3/6/5/7/7/a3195139-162-Y-UFO\\_RudderServo.jpg](http://static.rcgroups.com/forums/attachments/3/6/5/7/7/a3195139-162-Y-UFO_RudderServo.jpg)



**Obr. 4.16 Shrediquette DLX – Naklápění rotoru**

[http://www.villalachouette.de/william/krimstricopter/websitpics/tricopter\\_dlx\\_detail7.jpg](http://www.villalachouette.de/william/krimstricopter/websitpics/tricopter_dlx_detail7.jpg)



#### 4.3.2 Čtyřrotorové (Quadcoptery, Quadrotory)

Řízení je zajišťováno pomocí zvyšování a snižování otáček motoru. Používané konstrukce se liší jen v detailech. Jedná se například o MikroKopter.



**Obr. 4.17 MikroKopter**

<http://gallery.mikrokopter.de/main.php/v/Nachbau/Quadro.JPG.html>

#### 4.3.3 Šestirotorové

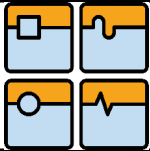
Pro úplnost jsou zmíněny šestirotorové vrtulníky. Kdy řízení i způsob vyrovnávání momentu jsou v principu stejné jako u čtyřrotorového vrtulníku. Je možných více uspořádání rotorů.

Příkladem mohou být DraganFlyer X6 nebo MikroKopter – HexaKopter.



**Obr. 4.18 DraganFlyer X6**

<http://www.draganfly.com/images/overview/DF-X6/Draganflyer-X6.jpg>



Obr. 4.19 MikroKopter – HexaKopter

<http://gallery.mikrokopter.de/main.php/v/Nachbau/HexaFliegt7b.jpg.html>

#### 4.3.4 Kryty rotorů

Víceroťorové UAV navrhované pro venkovní užití zpravidla nebývají vybaveny kryty rotorů, ovšem v případě havárie, zvláště pak ve fázi testování vrtulníku, mohou tyto zabránit kontaktu rotoru s překážkou a tak zabránit nejen poškození rotoru, ale hlavně motoru.

V případě užití uvnitř budov se stává vzhledem k velké koncentraci překážek ochrana rotorů nutností.

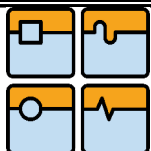
Příkladem čtyřrotorového UAV s chráněnými rotory může být x-ufo od firmy Silverit, jehož rotory byly mimo jiné použity na německém čtyřrotorovém robotu. [3]



Obr. 4.20 x-ufo

<http://www.thegreenhead.com/imgs/x-ufo-remote-control-ufo-1.jpg>

Nebo AR.Drone od firmy Parrot, jehož kryt je demontovatelný. Za zmínku stojí, že tento vrtulník je ovládán pomocí mobilního telefonu do něhož je rovněž přenášén obraz ze dvou palubních kamer. Vrtulník je v současné době (duben 2010) před uvedením na trh [16]

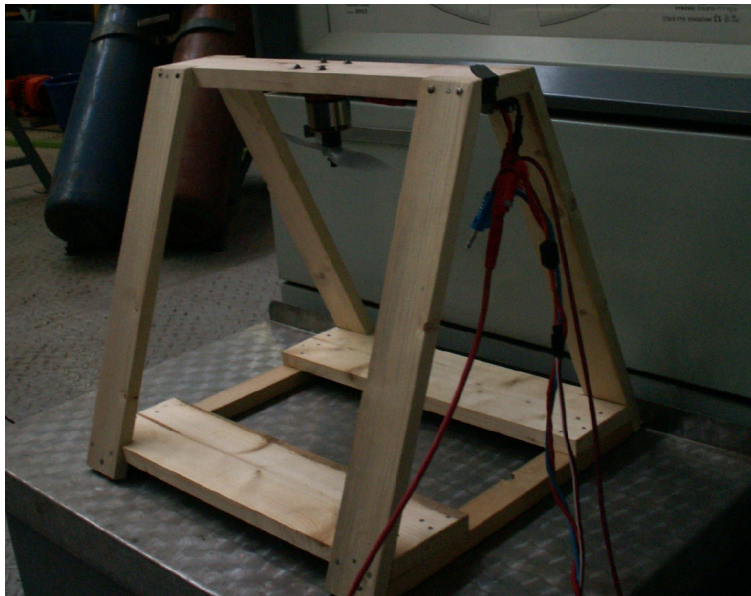
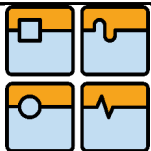
**Obr. 4.21 Parrot AR.Drone**

[http://ardrone.parrot.com/parrot-ardrone/en/project/texte\\_fck/image/projet\\_en.jpg](http://ardrone.parrot.com/parrot-ardrone/en/project/texte_fck/image/projet_en.jpg)

## 5. Měření tahu

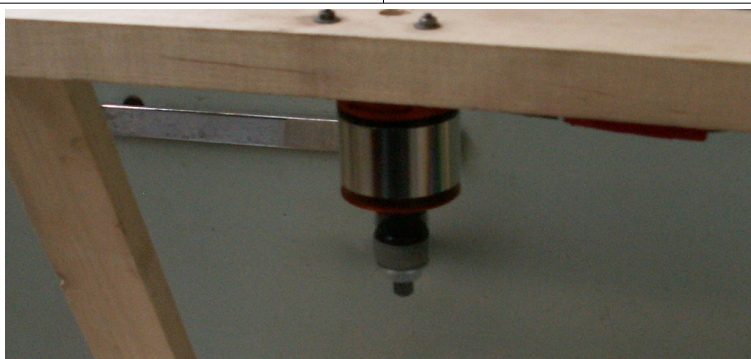
Vzhledem ke snadné dostupnosti bylo rozhodnuto, že skutečný tah bude měřen pomocí váhy. U vrtulníku pochopitelně tah směřuje směrem dolů. V případě, že by tomu tak bylo i v případě měření, mohlo by při odlehčení dojít k převrácení celého zařízení. Pro měření ho tedy bylo třeba obrátit. Toho je možné dosáhnout buď obrácenou montáží celého motoru nebo otočením našeče rotoru (a s tím spojená změna smyslu otáčení motoru). Byl zvolen první způsob.

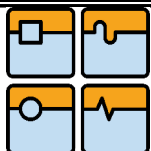
Pro účely měření byl navrhnout jednoduchý stojan. Stojan je tvořen dřevěnými díly spojenými k sobě vruty a hřebíky. Motor je uchycen uprostřed horní příčné části (ta je zhotovena z tvrdého dřeva tak, aby bylo dosaženo co nejmenší šířky a tah byl plochou tohoto dílu ovlivněn co možná nejméně) pomocí čtveřice šroubů o průměru 3 mm. Aby mohl rotor nasávat dostatečné množství vzduchu, byla zvolena výška stojanu 500 mm. Šířka 450 mm umožňuje volné protáčení rotoru. Rozměry základny jsou dimenzovány s ohledem na dostatečnou stabilitu stojanu.

**Obr. 5.1 Stojan**

Bylo použito střídavého elektromotoru 680/8 od výrobce MVVS s následujícími parametry:

ot./volt	680 [14]
Průměr statoru	36 mm [14]
Délka statoru	20 mm [14]
Nominální napětí	16 Voltů [14]
Průměr hřídele	5 mm [14]
Počet pólů	16 [14]
Pracovní napětí	12 - 18 V [14]
Doporučený zatěžovací proud	35 - 45 A [14]
max. možné zatížení	55 A / 60 s [14]
Počet Lixx/NiCd článků	3-5 / 10-15 [14]
Hmotnost	223 g [14]

**Obr. 5.2 Motor MVVS osazený vrtulí AWS za chodu**

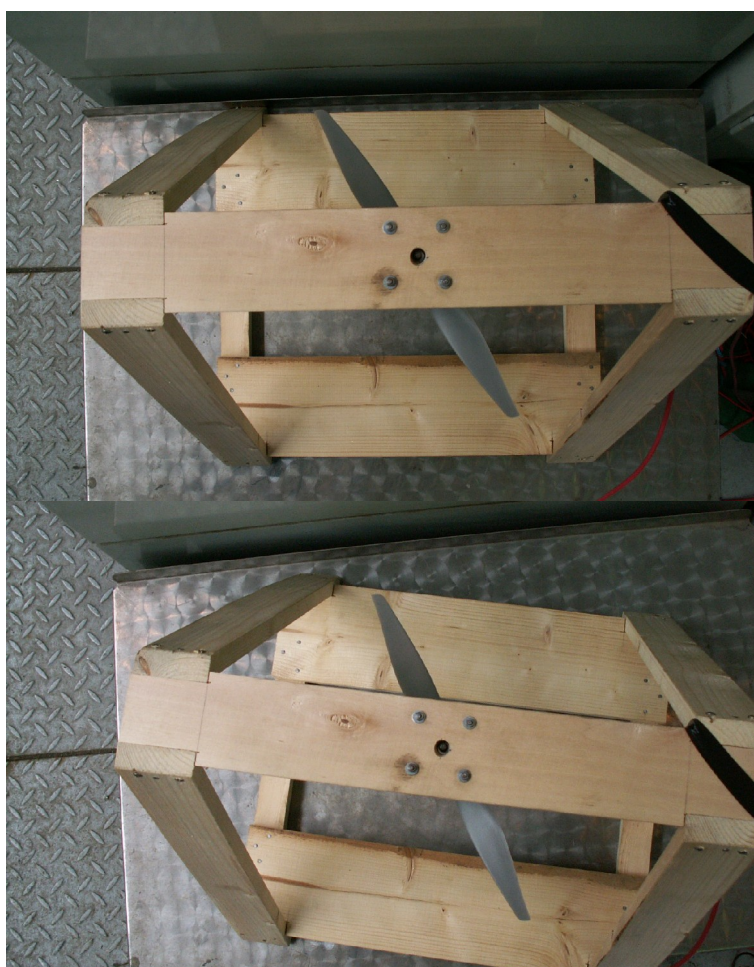


Pro účely testování byl jako zdroj signálu pro regulátor použit GWS MULTI-TESTER MT-1.

Jako zdroj elektrické energie pro motor a regulátor byl použit olověný šestičlánkový akumulátor o napětí 12 V a kapacitě 33 Ah.

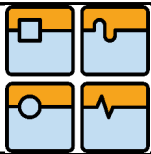
Měření bylo prováděno pro šířku signálu 1000, 1250, 1500, 1750 a 2000  $\mu$ s, přičemž hodnota 1000 odpovídá minimální a hodnota 2000 maximální poloze plynu. Bylo provedeno deset měření. Byly sledovány hodnoty proudu (ampérmetrem), napětí (digitálním multimetrem) a tíhy (pomocí váhy).

Během měření bylo, také zásluhou hladkého povrchu váhy, při vyšších hodnotách pozorováno působení reakčního momentu.



**Obr. 5.3 Natočení stojanu působením reakčního momentu**

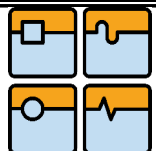
Pomocí lineární regrese byla aproximována závislost tahové síly na příkonu a odhadnuta velikost tahové síly pro vyšší hodnoty zatížení a proudu, zejména pro nominální napětí a maximální hodnotu proudu. Pro aproximaci byly použity průměrné hodnoty všech veličin, které jsou pochopitelně ovlivněny vybíjením akumulátoru. Ovšem je více než pravděpodobné, že vybíjení akumulátoru nastane i při běžném použití robotu. Při předpokládání výkonové rezervy přibližně 50% by tedy bylo pro požadovanou maximální vzletovou hmotnost 10 kg třeba 6 motorů. Druhou možností může případně být přizpůsobení vzletové hmotnosti počtu motorů.



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## 5.1 Naměřené hodnoty

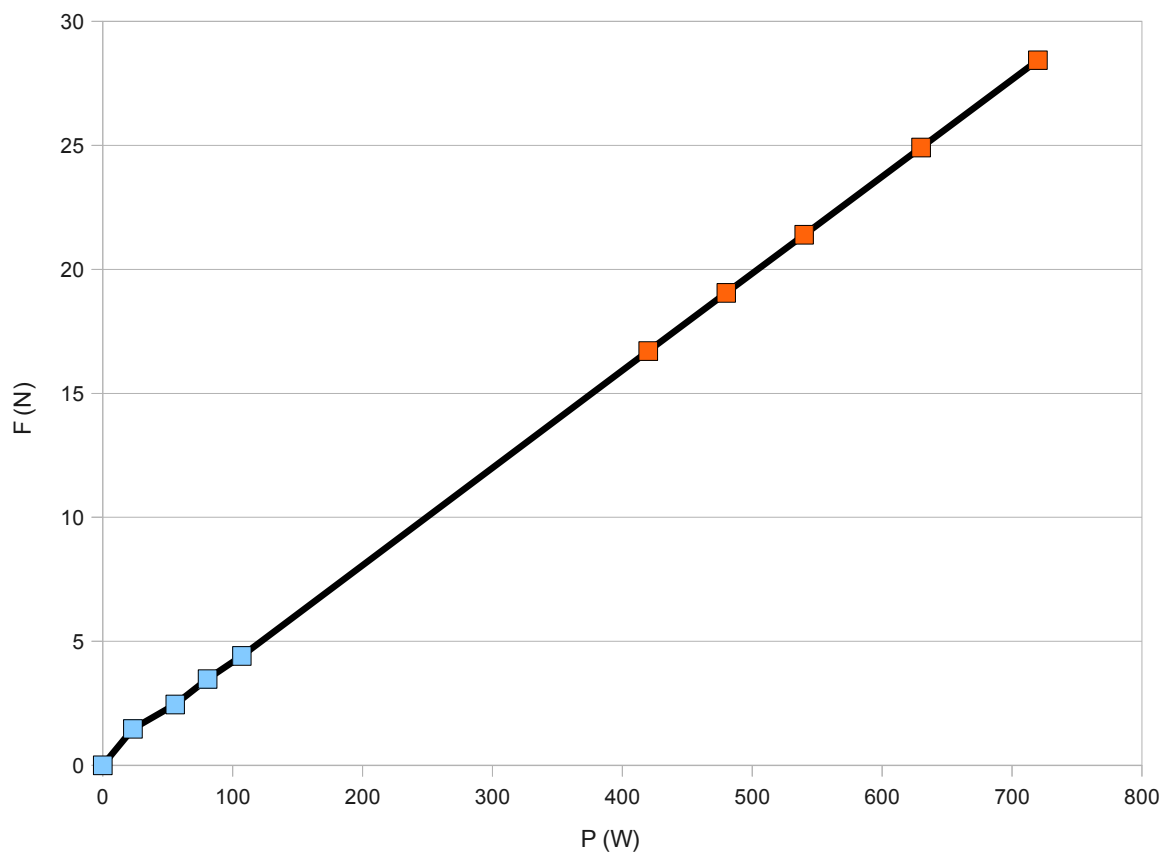
číslo měření	šířka pulzu ( $\mu\text{s}$ )	napětí (V)	proud (A)	tíha (kg)	tahová síla (N)	příkon (W)
1	1000	12,6	0	2,95	0	0
1	1250	12,11	2	3,1	1,47	24,22
1	1500	11,53	5	3,2	2,45	57,65
1	1750	11,07	8	3,35	3,92	88,56
1	2000	10,55	12	3,5	5,4	126,6
2	1000	12,59	0	2,95	0	0
2	1250	12,11	2	3,1	1,47	24,22
2	1500	11,48	5	3,2	2,45	57,4
2	1750	11,03	8	3,35	3,92	88,24
2	2000	10,6	12	3,5	5,4	127,2
3	1000	12,67	0	2,95	0	0
3	1250	12,11	2	3,1	1,47	24,22
3	1500	11,49	5	3,2	2,45	57,45
3	1750	11,01	8	3,35	3,92	88,08
3	2000	10,37	12	3,45	4,91	124,44
4	1000	12,46	0	2,95	0	0
4	1250	12,01	2	3,1	1,47	24,02
4	1500	11,33	5	3,2	2,45	56,65
4	1750	10,9	8	3,3	3,43	87,2
4	2000	10,3	11	3,45	4,91	113,3
5	1000	12,51	0	2,95	0	0
5	1250	11,98	2	3,1	1,47	23,96
5	1500	11,3	5	3,2	2,45	56,5
5	1750	10,8	8	3,3	3,43	86,4
5	2000	10,24	11	3,4	4,41	112,64
6	1000	12,56	0	2,95	0	0
6	1250	11,94	2	3,1	1,47	21,6
6	1500	11,21	5	3,2	2,45	56,05
6	1750	10,71	8	3,3	3,43	85,68
6	2000	10,04	10	3,4	4,41	100,4
7	1000	12,55	0	2,95	0	0
7	1250	11,92	2	3,1	1,47	23,84
7	1500	11,16	5	3,2	2,45	55,8
7	1750	10,59	8	3,3	3,43	84,72
7	2000	9,92	10	3,4	4,41	99,2
8	1000	12,48	0	2,95	0	0
8	1250	11,88	2	3,1	1,47	21,98
8	1500	10,99	5	3,2	2,45	52
8	1750	10,4	7	3,3	3,43	67,2
8	2000	9,6	10	3,35	3,92	125,1
9	1000	12,51	0	2,95	0	0
9	1250	11,74	2	3,1	1,47	21,9
9	1500	10,95	5	3,2	2,45	54,75
9	1750	10,2	7	3,25	2,94	71,4
9	2000	9,5	8	3,3	3,43	76
10	1000	12,42	0	2,95	0	0
10	1250	11,07	2	3,1	1,47	22,14
10	1500	10,66	5	3,2	2,45	53,3
10	1750	9,77	6	3,25	2,94	58,62
10	2000	9,44	7	3,25	2,94	66,08



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

aritmetický průměr	1000	12,54	0	2,95	0	0
aritmetický průměr	1250	11,89	2	3,1	1,47	23,21
aritmetický průměr	1500	11,21	5	3,2	2,45	55,76
aritmetický průměr	1750	10,65	7,6	3,31	3,48	80,61
aritmetický průměr	2000	10,06	10,3	3,4	4,41	107,1
maximum	1000	12,67	0	2,95	0	0
maximum	1001	12,11	2	3,1	1,47	24,22
maximum	1002	11,53	5	3,2	2,45	57,65
maximum	1003	11,07	8	3,35	3,92	88,56
maximum	1004	10,6	12	3,5	5,4	127,2
medián	1000	12,53	0	2,95	0	0
medián	1000	11,96	2	3,1	1,47	23,9
medián	1000	11,26	5	3,2	2,45	56,28
medián	1000	10,76	8	3,3	3,43	86,04
medián	1000	10,14	10,5	3,4	4,41	112,97
směrodatná odchylka	1000	0,07	0	0	0	0
směrodatná odchylka	1250	0,31	0	0	0	1,14
směrodatná odchylka	1500	0,28	0	0	0	1,88
směrodatná odchylka	1750	0,42	0,7	0,04	0,36	10,78
směrodatná odchylka	2000	0,43	1,7	0,08	0,8	21,69
odhad	-	12	35	-	16,7	420
odhad	-	12	40	-	19,05	480
odhad	-	12	45	-	21,39	540
odhad	-	14	45	-	24,91	630
odhad	-	16	45	-	28,43	720

Graf závislosti tahu na příkonu





## 6. Navrhovaná řešení

Z koncepcí uvedených výše byly vybrány čtyři, především z důrazem na jejich používání v konstrukci bezpilotních strojů. Z tohoto důvodu nebyla mezi navrhovaná řešení zahrnuta dvourotorová koncepce s překrývajícími se rotory, jelikož jedinou robotickou aplikací této koncepce je bezpilotní verze Kamanu K-MAX.

Navrhovaná řešení tvoří průřez mezi používanými konfiguracemi. Jsou zastoupeny jak různé počty rotorů (jeden, dva, tři a čtyři), tak rozličné způsoby eliminace reakčního momentu: tahem rotoru (vyrovnávacího, příp. jednoho z hlavních), vzájemným vyrušením i kombinací předchozích.

Všechny návrhy byly zpracovány v programu Autodesk Inventor 2010. Jedinou výjimkou je jednorotorový vrtulník, jehož návrh nebyl zpracován, jelikož se předpokládá použití sériově vyráběného základu.

### 6.1 Jeden rotor

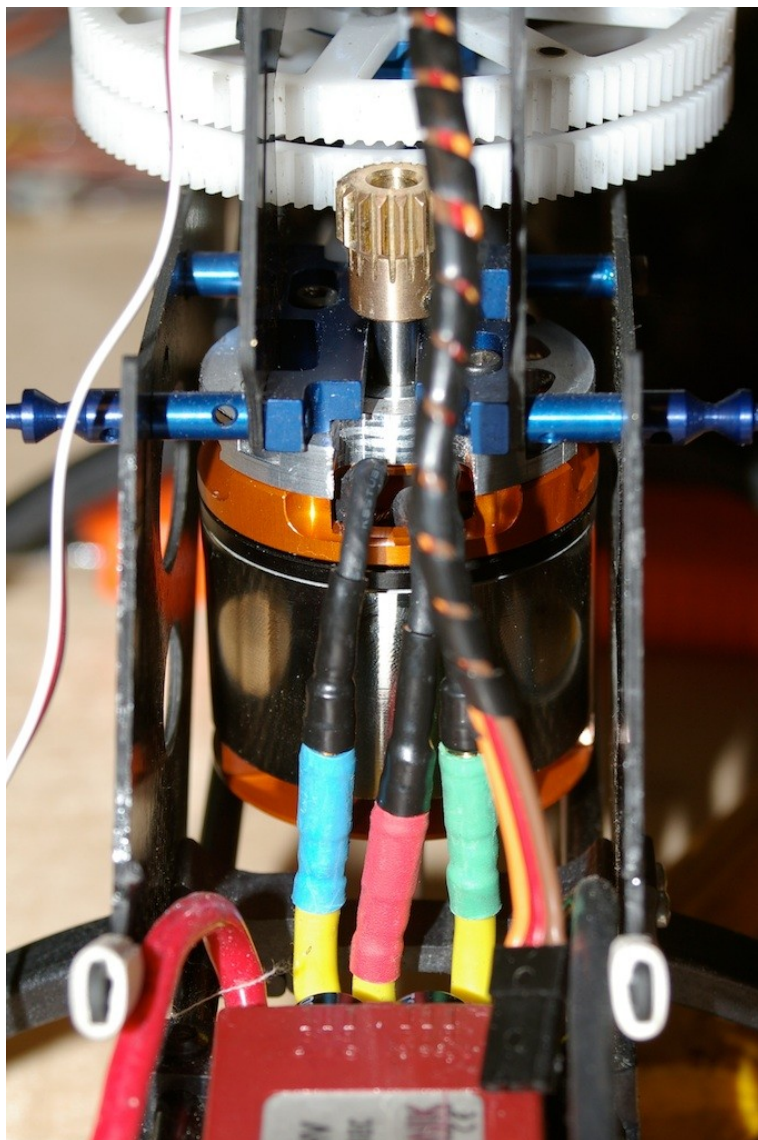
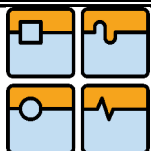
Do dalšího výběru je v první řadě nutné zařadit klasickou jednorotorovou koncepci. A to především kvůli velkému rozšíření. Jednorotorové vrtulníky jsou používány na civilních i vojenských UAV. Tento trend je pravděpodobně způsoben velkým rozšířením mezi vrtulníky obecně, ač se její použití pro tento účel jeví jako méně vhodné.

Jelikož je v současné době na trhu bezpočet kvalitních vrtulníků této koncepce i velikosti, předpokládá se použití, případně úprava sériově vyráběného vrtulníku. Je třeba počítat s náhonem ocasního rotoru pomocí transmise od hlavního rotoru, protože jiné varianty nejsou v této velikosti rozšířené.

Motor MVVS 680/8 je možné zastavět například do českého vrtulníku LAheli Sniper II [18].

Je pochopitelné, že v případě použití jednoho elektromotoru bude vzletová hmotnost výrazně menší. Ovšem na chování vrtulníku nemá velikost vrtulníku výrazný vliv.

Druhou možností je použití většího motoru – pochopitelně ve větším vrtulníku. Použití více motorů by si vyžádalo výrazné úpravy trupu vrtulníku.

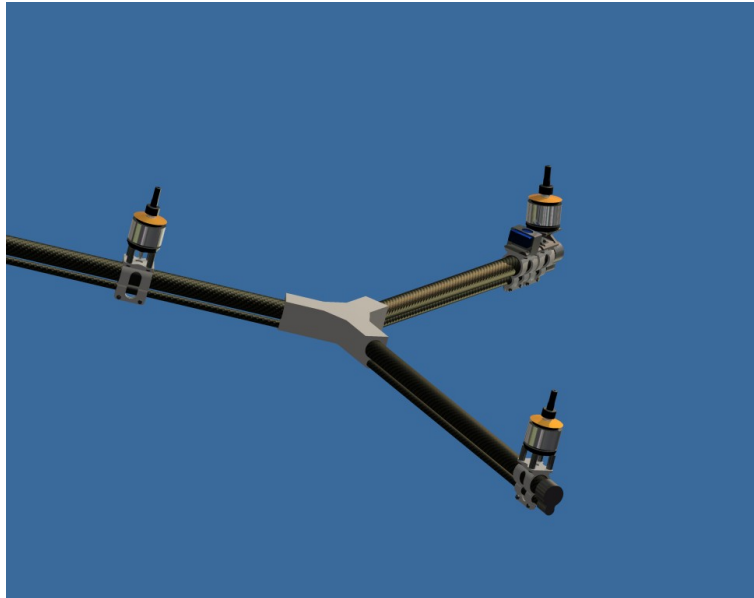


**Obr. 6.1 MVVS 680/8 v LAheli Sniper II**  
[http://nd03.jxs.cz/009/332/3b7ed15259\\_56859341\\_o2.jpg](http://nd03.jxs.cz/009/332/3b7ed15259_56859341_o2.jpg)



## 6.2 Tři rotory

Délka ramena mezi těžištěm a motorem ovlivňuje chování vrtulníku. Krátké rameno znamená rychlejší reakce na řízení, dlouhé větší stabilitu. Z tohoto důvodu bylo navrženo uchycení motorů, které umožňuje vzdálenost mezi těžištěm a motory měnit a tak dosáhnout optimální délky.

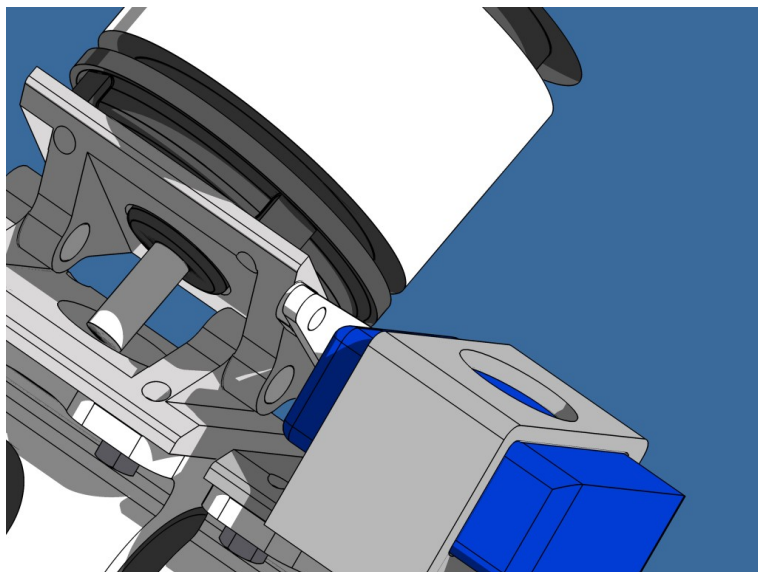


**Obr. 6.2 Celkový pohled**

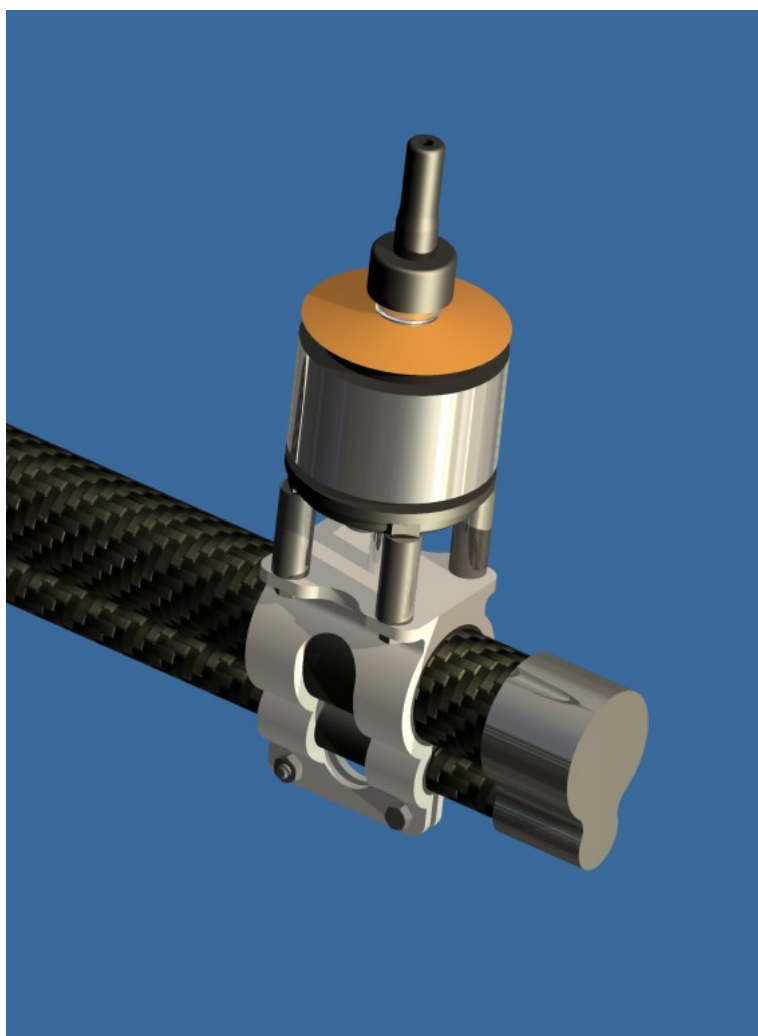
Jak je patrné z obrázků ramena jsou tvořena dvěma uhlíkovými trubkami, přičemž horní přenáší většinu zatížení, zatímco spodní je určena k vymezení polohy.

Po nastavení požadované vzdálenosti se posunu zabrání utažením dvou šroubů ve spodní části držáku. Mezi držák a trubky jsou vloženy pryžové elementy, které jednak brání samovolnému posunutí a jednak tlumí vibrace od motoru (které mají neblahý vliv na funkci senzorů).

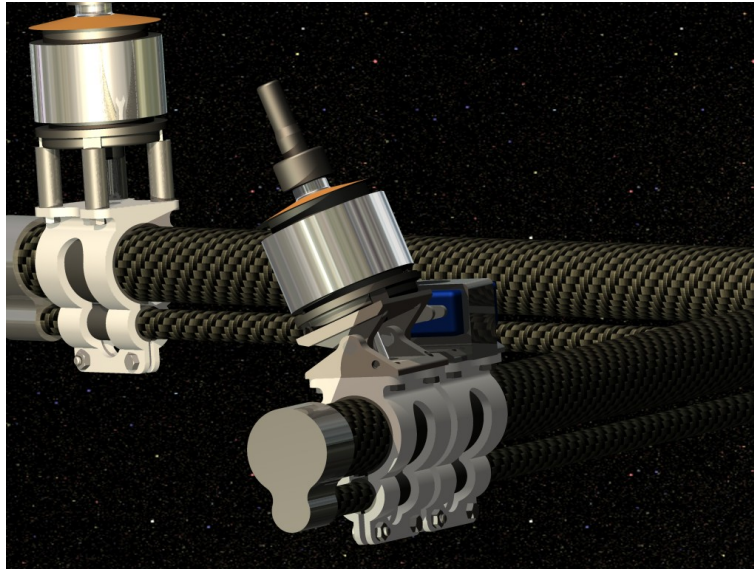
Motor s obráceným směrem otáčení než zbylé dva, je umístěn na naklápěcím mechanismu, který je ovládán pomocí servomotoru. Toto umožňuje měnit reakční moment a tedy ovládat stroj. Servomotor je umístěn na dalším držáku, jehož spodní část je tvořena stejným dílem jako u držáku motoru.



**Obr. 6.3 Detail naklápění**



**Obr. 6.5 Detail uchycení motoru**

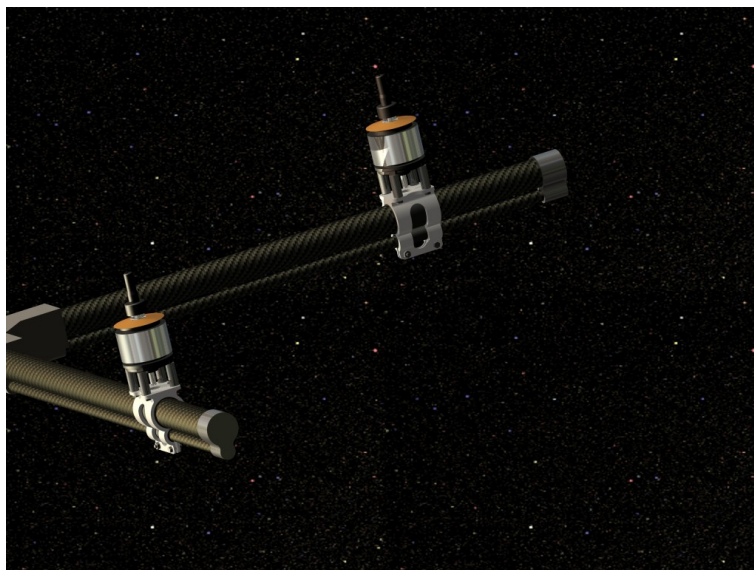


*Obr. 6.6 Dvě ramena třírotorového návrhu*

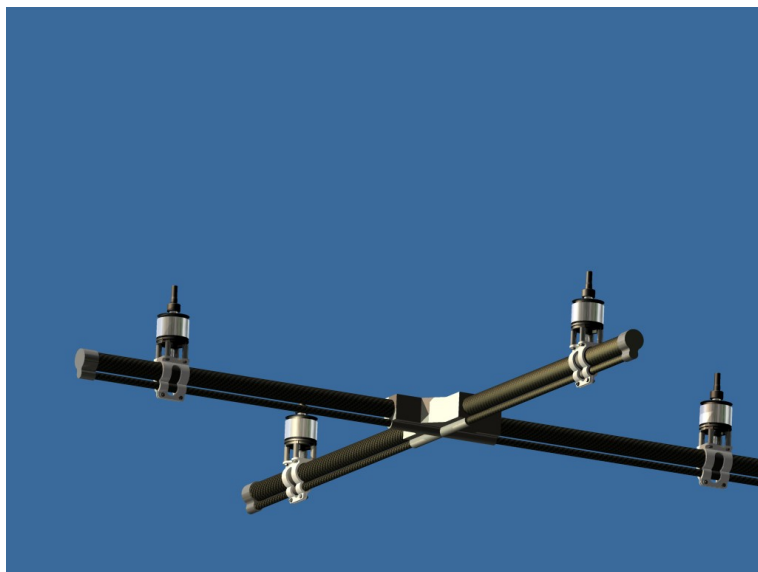
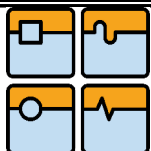
### 6.3 Čtyři rotory

Tato konfigurace patří mezi nejrozšířenější mezi nevojenskými UAV. Vyráběné stroje jsou však zpravidla menší. Navrhovaný čtyřrotorový vrtulník sdílí většinu dílů s přecházejícím třírotorovým strojem. Odlišný je pouze střed. S nevelkými náklady je tedy možné přestavět čtyřrotorové UAV na třírotorové.

Předpokládá se použití dvou párů protiběžných vrtulí, které ovšem v této velikosti nejsou dostupné. Toto pochopitelně platí i pro výše uvedený třírotorový vrtulník. Je tedy nutné předpokládat zakázkovou výrobu vrtulí.



*Obr. 6.7 Dvě ramena čtyřrotorového návrhu*



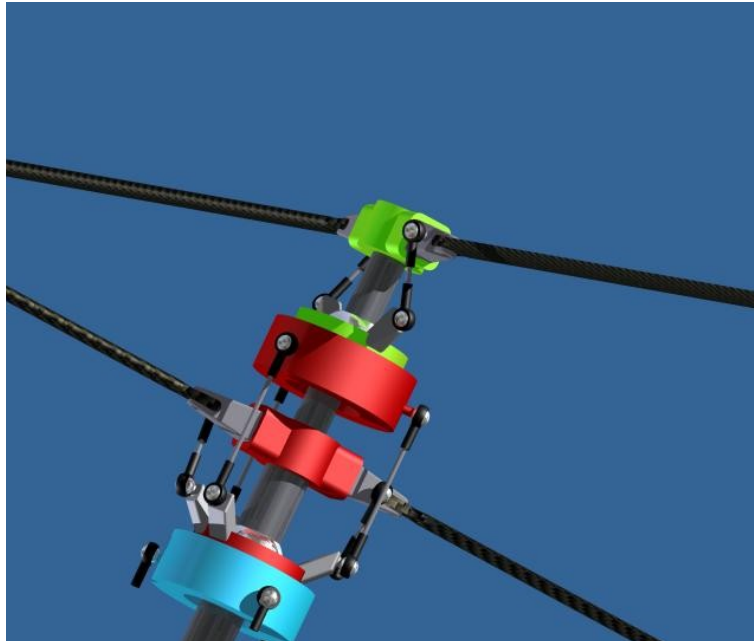
**Obr. 6.8 Celkový pohled na čtyřrotorový návrh**

#### **6.4 Dva rotory koaxiálně**

Jeden z největších konstrukčních problémů u koaxiálních vrtulníků představuje ovládání difference mezi reakčními momenty obou rotorů. Při uvážení, že konstrukce je naprosto symetrická, a že tedy není nutné stroj natáčet (za předpokladu symetrického trupu jaký má například výše zmíněný Bombardier CL-327 Guardian), je možno toto ovládání zcela vynechat. Ostatně MikroKopter v autonomním režimu létá také bez natáčení do směru letu [4]. Nutno potknout, že jeho konstrukce není ani zdaleka natolik symetrická.

Možnost pohánět každý rotor jedním motorem a změnu rozdílu mezi reakčními momenty vyvozovat nezávislým zvyšováním či snižováním otáček motorů byla zavržena, jelikož by nebyla zajištěna vzájemná poloha obou rotorů a nedocházelo by tedy k eliminaci klonivého momentu. To by si vyžádalo komplikovanější konstrukci zavěšení listů. Předpokládá se použití sériově vyráběných dílů jednorotorových vrtulníků a jejich možná lehká modifikace. A to především zavěšení listů, listy, hlavy a šikmé desky.

Konstrukce takového zjednodušeného řízení je naznačena na obrázku.



*Obr. 6.9 Zjednodušené řízení*

## 7. Porovnání

Vybrané konfigurace byly porovnány na základě následujících osmi kritérií. Pro porovnání byla zvolena multikriteriální metoda AHP, přičemž Saatyho postup byl aproximován geometrickým průměrem, se kterým lze dosáhnout poměrně vysoké přesnosti [19]. Celý výpočet je uveden na konci kapitoly.

### 7.1 Dostupnost dílů – 0,1

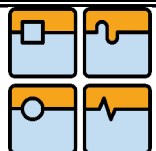
Tímto je především myšlena dostupnost potřebných mechanických podskupin v dané velikostní kategorii.

### 7.2 Symetričnost – 0,36

Jak již bylo naznačeno v popisu koaxiálního návrhu, při autonomním řízení není třeba natáčení UAV do směru dopředného pohybu. Nutnost natáčení komplikuje autonomní řízení. Další nevýhodou symetrické konstrukce, zejména s ocasním rotorem je nutnost natáčet se vůči větru.

### 7.3 Mechanická jednoduchost – 0,3

Mechanická jednoduchost znamená jednodušší výrobu, ale také a zejména menší riziko poruch.



#### **7.4 Minimální počet motorů – 0,07 a minimální počet servomotorů – 0,04**

Aby bylo zajištěno ovládání, minimální součet servomotorů a motorů je přibližně stejný (4-5), přičemž cena servomotoru je oproti ceně motoru a regulátoru výrazně nižší. Tyto dvě kritéria mají za úkol zohlednit zejména tento fakt.

#### **7.5 Část výkonu využitá k tahu – 0,1**

Je žádoucí, aby veškerý výkon na rotoru byl využit k tahu, ovšem u některých koncepcí, jak již bylo zmíněno výše, je část výkonu vyplývána na kompenzaci reakčního momentu, konkrétně u jednorotorových a třírotorových strojů.

Aby se zvýraznil rozdíl mezi jednotlivými koncepcemi, byly hodnoty umocněny na pátou.

#### **7.6 Dostupnost informací – 0,03**

Množství dostupné teorie a podkladů je rovněž faktorem ovlivňujícím výsledný výběr. Toto kritérium bylo zavedeno zejména kvůli koaxiální koncepci, kdy vzhledem k převažujícímu použití ve vojenských aplikacích je informace velmi obtížné získat.

#### **7.7 Autorotace – 0,03**

Vzhledem k hmotnosti vrtulníku a také k jeho ceně je žádoucí, aby bylo možné v případě výpadku motoru, případně i jiných poruch (například poškození transmise ocasního rotoru), s vrtulníkem přistát nebo alespoň zmírnit pád.

Toho je možné dosáhnout právě autorotací, případně použitím více motorů. Tedy u jednorotorových a koaxiálních vrtulníků pohánět reduktor dvěma motory, tak jak je to běžné u velkých vrtulníků. V případě třírotorových a čtyřrotorových variant je možné pohánět každý rotor dvěma motory. Ovšem jako lepší varianta se pro tento účel jeví použití šestirotorového UAV.

Neřízený pád stroje této velikosti do obydlené oblasti by mohl mít nedozírné následky. Proto je nutné dále zvážit oblasti použití UAV a zohlednit je při konstrukci.

V tomto porovnání bylo uvažováno použití v neobydlené oblasti. Autorotace tedy byla do hodnocení zahrnuta především s ohledem na snížení poškození stroje při případné havárii.

#### **7.8 Výsledek**

1. Čtyřrotorový vrtulník 0,35
2. Dvourotorový koaxiální vrtulník 0,33
3. Jednorotorový vrtulník 0,18
3. Třírotorový vrtulník 0,18



# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## 7.9 Výpočet

### Váha jednotlivých kritérií

	Dost. dílů	Symetričnost	Mech. jed.	poč. motorů	poč. servom.	% tah	Informace	Autorotace	geom. prům.	
Dost. dílů	1	0,17	0,5	2	5	0,25	3	4	1,14	0,1
Symetričnost	6	1	1	5	7	4	6	5	4,25	0,36
Mech. jed.	2	1	1	4	7	4	6	5	3,52	0,3
poč. motorů	0,5	0,2	0,25	1	3	0,5	3	3	0,86	0,07
poč. servomot.	0,2	0,14	0,14	0,33	1	1	2	1	0,43	0,04
% tah	4	0,25	0,25	2	1	1	4	2	1,22	0,1
Informace	0,33	0,17	0,17	0,33	0,5	0,25	1	1	0,33	0,03
Autorotace	0,25	0,2	0,2	0,33	1	0,5	1	1	0,4	0,03
	14,03	2,93	3,31	14,67	24,5	11	25	22	11,75	1

### Dost. dílů

	4 rotory	Koaxial	3 rotory	1 rotor	geom. prům.	
4 rotory	1	4	1	0,5	1,19	0,24
Koaxial	0,25	1	0,25	0,14	0,31	0,06
3 rotory	1	4	1	0,5	1,19	0,24
1 rotor	2	7	2	1	2,3	0,46
					4,99	1

### Symetričnost

	4 rotory	Koaxial	3 rotory	1 rotor	geom. prům.	
4 rotory	1	0,25	4	5	1,5	0,25
Koaxial	4	1	6	7	3,6	0,6
3 rotory	0,25	0,17	1	2	0,54	0,09
1 rotor	0,2	0,14	0,5	1	0,35	0,06
	5,45	1,56	11,5	15	5,98	1

### Mech. jed.

	4 rotory	Koaxial	3 rotory	1 rotor	geom. prům.	
4 rotory	1	7	4	6	3,6	0,61
Koaxial	0,14	1	0,2	0,5	0,35	0,06
3 rotory	0,25	5	1	3	1,39	0,24
1 rotor	0,17	2	0,33	1	0,58	0,1
	1,56	15	5,53	10,5	5,91	1

### poč. motorů

4 rotory	4	0	0
Koaxial	1	3	0,43
3 rotory	3	1	0,14
1 rotor	1	3	0,43
		7	1

### poč. servomot.

4 rotory	0	4	0,5
Koaxial	3	1	0,13
3 rotory	1	3	0,38
1 rotor	4	0	0
		8	1

### % tah

4 rotory	1	1	0,3
Koaxial	1	1	0,3
3 rotory	0,95	0,77	0,23
1 rotor	0,9	0,59	0,18
		3,36	1



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Informace**

	4 rotory	Koaxial	3 rotory	1 rotor	geom. prům.	
4 rotory	1	3	2	0,2	1,05	0,18
Koaxial	0,33	1	0,5	0,14	0,39	0,07
3 rotory	0,5	2	1	0,17	0,64	0,11
1 rotor	5	7	6	1	3,81	0,65
	6,83	13	9,5	1,51	5,89	1

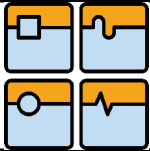
**Autorotace**

4 rotory	ne	0		0
Koaxial	ano	1		0,5
3 rotory	ne	0		0
1 rotor	ano	1		0,5
		2		1

	Dost. dílů	Symetrično	Mech. jed.	poč. motorů	poč. servor	% tah	Informace	Autorotace
4 rotory	0,24	0,25	0,61	0	0,5	0,3	0,18	0
Koaxial	0,06	0,6	0,06	0,43	0,13	0,3	0,07	0,5
3 rotory	0,24	0,09	0,24	0,14	0,38	0,23	0,11	0
1 rotor	0,46	0,06	0,1	0,43	0	0,18	0,65	0,5

Dost. dílů	0,1
Symetričnost	0,36
Mech. jed.	0,3
poč. motorů	0,07
poč. servomot.	0,04
% tah	0,1
Informace	0,03
Autorotace	0,03

<b>Výsledek</b>	
<b>4 rotory</b>	<b>0,35</b>
<b>Koaxial</b>	<b>0,33</b>
<b>3 rotory</b>	<b>0,18</b>
<b>1 rotor</b>	<b>0,18</b>



## Závěr

Vzhledem k nevýhodám uvedeným v první kapitole se vzducholodě nejeví pro plánové použití jako vhodné. Z koncepcí shrnutých v druhé, třetí a čtvrté kapitole byly vybrány čtyři, které byly následně porovnány pomocí metody AHP.

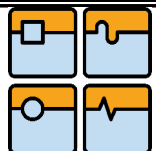
V porovnání nejlepšího výsledku dosáhl čtyřrotorový stroj, ovšem rozdíl vůči koaxiálnímu robotu je nevelký. Nelze tedy jednoznačně doporučit ani jednu z koncepcí. Výsledná volba mezi těmito dvěma koncepcemi by měla reflektovat plánované konkrétní použití.

Výrazně lepší letové vlastnosti koaxiální koncepce se dají očekávat při dopředném letu. Tedy oblast užití koaxiálního UAV může být například snímkování velké plochy a obecně činnost, při které je třeba zdolávat větší vzdálenosti. Naopak pro činnosti vyžadující spíše visení nebo pomalý pohyb je vhodnější užití čtyřrotorového UAV.

Konečné rozhodnutí by mělo také v neposlední řadě zohlednit i předpokládaný počet vyrobených kusů a výrobní možnosti.

Vzhledem k naměřenému tahu je nutno zvážit, zda je možné snížit plánovanou vzletovou hmotnost. V případě, že to možné nebude, bude nutné zvážit možnosti zástavby šesti motorů do vybrané koncepce, respektive v případě čtyř rotorů spíše nahrazení čtyř rotorů šesti.

Schodné výsledky třírotorové a jednorotorové koncepce ukazují na malou vhodnost těchto konfigurací pro použití na UAV. A to zejména z důvodu nutnosti natáčení trupu do směru letu.



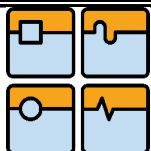
## Seznam použité literatury

- [1] *AeroQuad Forums* [online]. © 2010 [cit. 2010-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://aeroquad.com/>>.
- [2] DIY drones [online]. © 2009 [cit. 2010-04-08]. ArduIMU+ V2 (Flat). Dostupné z WWW: <[http://store.diydrones.com/product\\_p/kt-arduimu-20.htm](http://store.diydrones.com/product_p/kt-arduimu-20.htm)>.
- [3] GURDAN, Daniel, et al. Energy-efficient Autonomous Four-rotor Flying Robot Controlled. *ICRA 2007*. 2007, 1, s. 361-366. ISSN 1-4244-0602-1.
- [4] HERBERT, Dave. YouTube [online]. 2009-05-19 [cit. 2010-05-19]. Esky Big Lama product review with blade strike examples. Dostupné z WWW: <[http://www.youtube.com/watch?v=ZYB-5iNI\\_L4](http://www.youtube.com/watch?v=ZYB-5iNI_L4)>.
- [5] HERM, Ota. *Návrh a realizace řídicí jednotky servomotor pro model vrtulníku*. Praha, 2006. 60 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická.
- [6] Innovative UAV Aircraft & Aerial Video Systems [online]. © 2010 [cit. 2010-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.draganfly.com>>.
- [7] Kaman Aero [online]. ©2010 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.kamanaero.com/>>.
- [8] KOPŘIVA, Zdeněk. *Konstrukce vrtulníků*. Vyd. 1. Brno : VA AZ, 1971. 266 s.
- [9] LAŠTŮVKA, Antonín. LAheli - výrobce mikrovrtulníků [online]. © 2006 – 2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://laheli.com>>.
- [10] *Letecký ústav* [online]. 2009 [cit. 2009-11-7]. Pevnost. Dostupné z WWW: <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/stress.php>>.
- [11] Military Analysis Network [online]. 2000-01-08 [cit. 2010-04-30]. CL-227 / CL-327. Dostupné z WWW: <<http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/row/cl-327.htm>>.
- [12] *MikroKopter* [online]. 2010 [cit. 2010-04-20]. Dostupné z WWW: <<http://mikrokopter.com>>.
- [13] Modelltechnik-Jung [online]. nezjištěno [cit. 2010-04-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.modelltechnik-jung.de>>.
- [14] MVVS [online]. 2010 [cit. 2010-03-17]. Elektromotory. Dostupné z WWW: <<http://www.mvvs.cz/elektromotory.html>>.
- [15] NVA Flieger [online]. nezjištěno [cit. 2010-01-13]. Zellebaugruppen und Hubschraubersteuerung. Dostupné z WWW: <[http://www.nva-flieger.de/\\_tl/index.php/technik/zelle/steuerung.html](http://www.nva-flieger.de/_tl/index.php/technik/zelle/steuerung.html)>.
- [16] *Parrot AR.Drone* [online]. ©2010 [cit. 2010-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/en>>
- [17] PETRÁSEK, Miroslav. *Základy letu - vrtulník*. Vyd. 1. Brno : CERM, 2008. 98 s. ISBN 978-80-7204-588-4.
- [18] POSKOČIL, Milan. Mipo blog [online]. 2009-24-11 [cit. 2010-05-10]. Elektromotory MVVS 6,5 a MVVS 8. Dostupné z WWW: <<http://mipo.blog.cz/0911/elektromotory-mvvs-6-5-a-mvvs-8>>.



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

- [19] SCHEJBAL, Jaroslav. Realizace metody AHP v prostředí tabulkového kalkulátoru [online]. [s.l.], 2006. 36 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta ekonomicko-správní. Dostupné z WWW: <[dspace.upce.cz/.../Shejbal\\_Realizace%20metody\\_Cast%201\\_PP\\_2006.pdf](http://dspace.upce.cz/.../Shejbal_Realizace%20metody_Cast%201_PP_2006.pdf)>.
- [20] SINGH, Kiran. Helicopter History Site [online]. nezjištěno [cit. 2010-04-26]. The Servo Flap Controlled Rotor. Dostupné z WWW: <<http://www.helis.com/howflies/servo.php>>.
- [21] Skybotix Technologies [online]. ©2010 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: <<http://skybotix.com>>.
- [22] ŠPINKA, Ondřej, et al. RAMA UAV Control System [online]. Last modified: 07/01/2010 09:26 [cit. 2010-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://rtime.felk.cvut.cz/helicopter/>>.
- [23] The World of Twincopter [online]. ©2005-2009 [cit. 2010-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.twincopter.de/>>.
- [24] THEILICKE, William. Shrediquette - a tricopter by W. Thielicke [online]. 2010-05-09 [cit. 2010-05-14]. Shrediquette DLX. Dostupné z WWW: <<http://shrediquette.blogspot.com/p/shrediquette-dlx.html>>.



## Seznam použitých zkratk

AHP – Analytic Hierarchy Process

IMU – Inertial measurement unit

Obr. – Obrázek

UAV – Unmanned aerial vehicle

VTOL – Vertical take-off and landing



## Seznam obrázků

**Obr. 2.1 Vírník**

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bensengyrocopter001.jpg>

**Obr. 2.2 Kamov Ka-22 Vintokryl**

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/4d/Kamov\\_Ka-22.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/4d/Kamov_Ka-22.jpg)

**Obr. 2.3 V-22 Osprey**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:CV-22\\_Formation.jpeg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:CV-22_Formation.jpeg)

**Obr. 2.4 Fairey FB-1**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fairey\\_FB-1\\_Gyrodyne.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fairey_FB-1_Gyrodyne.jpg)

**Obr. 2.5 Mil Mi-24**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mi-24\\_Desert\\_Rescue.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mi-24_Desert_Rescue.jpg)

**Obr. 3.1 Eurocopter EC-135**

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:EC135T1.jpg>

**Obr. 3.2 Systém NOTAR**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:NOTAR\\_System.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:NOTAR_System.svg)

**Obr. 3.3 Nakloněný rotor**

<http://www.diydrones.com/photo/arduimu-quadcopter-3/prev?context=user>

**Obr. 3.4 Klonivý moment – rozdíl rychlostí konců rotorů v bodech A a B**

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dissymetry\\_Of\\_Lift.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dissymetry_Of_Lift.jpg)

**Obr. 4.1 E-flite Blade mSR**

<http://www.bladehelis.com/ProdInfo/Gallery/EFLH3000-GAL4.jpg>

**Obr. 4.2 RAMA**

[http://rtime.felk.cvut.cz/helicopter/\\_media/start.jpg?w=640&h=&cache=cache](http://rtime.felk.cvut.cz/helicopter/_media/start.jpg?w=640&h=&cache=cache)

**Obr. 4.3 Mil Mi-12**

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:MI-12.JPG>

**Obr. 4.4 Schéma ovládání vrtulníků Kaman**

[www.nva-flieger.de/images/hsk/servo-flap1.gif](http://www.nva-flieger.de/images/hsk/servo-flap1.gif)

**Obr. 4.5 Kaman K-MAX**

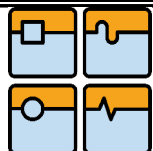
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:N265ka\\_krj.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:N265ka_krj.JPG)

**Obr. 4.6 Makety Kamanu K-MAX**

<http://www.twincopier.de/index.php?id=46>

**Obr. 4.7 Dvourotorový vrtulník firmy Modelltechnik Jung**

[http://www.cad-modelltechnik-jung.de/images/Kamax-Trainer\\_12.jpg](http://www.cad-modelltechnik-jung.de/images/Kamax-Trainer_12.jpg)



**Obr. 4.8 Esky Big Lama**

<http://www.esky-heli.com/esky-big-lama-4ch-coaxial-rc-helicopter-rtf-000054-p-4962.html>

**Obr. 4.9 Skybotix CoaX – rozměry**

[http://www.skybotix.com/support/wiki/index.php/File:Coax\\_dimensions.png](http://www.skybotix.com/support/wiki/index.php/File:Coax_dimensions.png)

**Obr. 4.10 Skybotix CoaX**

[http://www.skybotix.com/support/wiki/images/6/69/Coax\\_elements.png](http://www.skybotix.com/support/wiki/images/6/69/Coax_elements.png)

**Obr. 4.11 skelet koaxiálního vrtulníku CAD+Modelltechnik-Jung**

[http://www.cad-modelltechnik-jung.de/projekte/Koaxialmechanik\\_SPT5-H.jpg](http://www.cad-modelltechnik-jung.de/projekte/Koaxialmechanik_SPT5-H.jpg)

**Obr. 4.12 Kamov Ka-137**

<http://www.sergib.agava.ru/russia/kamov/137/images/ka137.jpg>

**Obr. 4.13 Bombardier CL-327 Guardian**

<http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/row/Cl327air.jpg>

**Obr. 4.14 Shrediquette DLX**

[http://www.villalachouette.de/william/krim/tricopter/websitpics/tricopter\\_dlx\\_detail0.jpg](http://www.villalachouette.de/william/krim/tricopter/websitpics/tricopter_dlx_detail0.jpg)

**Obr. 4.15 Y-UFO – Naklápění rotoru**

[http://static.rcgroups.com/forums/attachments/3/6/5/7/7/a3195139-162-Y-UFO\\_RudderServo.jpg](http://static.rcgroups.com/forums/attachments/3/6/5/7/7/a3195139-162-Y-UFO_RudderServo.jpg)

**Obr. 4.16 Shrediquette DLX – Naklápění rotoru**

[http://www.villalachouette.de/william/krim/tricopter/websitpics/tricopter\\_dlx\\_detail7.jpg](http://www.villalachouette.de/william/krim/tricopter/websitpics/tricopter_dlx_detail7.jpg)

**Obr. 4.17 Mikrokopter**

<http://gallery.mikrokopter.de/main.php/v/Nachbau/Quadro.JPG.html>

**Obr. 4.18 DraganFlyer X6**

<http://www.draganfly.com/images/overview/DF-X6/Draganflyer-X6.jpg>

**Obr. 4.19 MikroKopter – HexaKopter**

<http://gallery.mikrokopter.de/main.php/v/Nachbau/HexaFliegt7b.jpg.html>

**Obr. 4.20 x-ufo**

<http://www.thegreenhead.com/imgs/x-ufo-remote-control-ufo-1.jpg>

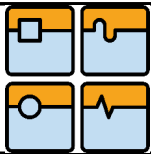
**Obr. 4.21 Parrot AR.Drone**

[http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/en/project/texte\\_fck/image/projet\\_en.jpg](http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/en/project/texte_fck/image/projet_en.jpg)

**Obr. 5.1 Stojan**

**Obr. 5.2 Motor MVVS osazený vrtulí AWS za chodu**

**Obr. 5.3 Natočení stojanu působením reakčního momentu**



**Obr. 6.1 MVVS 680/8 v LAheli Sniper II**

[http://nd03.jxs.cz/009/332/3b7ed15259\\_56859341\\_o2.jpg](http://nd03.jxs.cz/009/332/3b7ed15259_56859341_o2.jpg)

**Obr. 6.2 Celkový pohled**

**Obr. 6.3 Detail naklápění**

**Obr. 6.5 Detail uchycení motoru**

**Obr. 6.6 Dvě ramena třírotorového návrhu**

**Obr. 6.7 Dvě ramena čtyřrotorového návrhu**

**Obr. 6.8 Celkový pohled na čtyřrotorový návrh**

**Obr. 6.9 Zjednodušené řízení**