



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

Karel Hylmar  
**INDOOROVÉ TESTOVÁNÍ LETOVÝCH**  
**CHARAKTERISTIK BEZPILOTNÍHO LETADLA IRIS+**  
Bakalářská práce

**2020**

**K621** .....Ústav letecké dopravy

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Karel Hylmar**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – LED – Letecká doprava**

Název tématu (česky): **Indoorové testování letových charakteristik  
bezpilotního letadla Iris+**

Název tématu (anglicky): Indoor Flight Characteristic Testing of Iris+ Unmanned  
Aerial Vehicle

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je koncepčně navrhnout testovací zařízení bezpilotních prostředků, které umožní vytvoření základní letové obálky testovaného prostředku při indoorových, manuálně řízených letech.
- Vypracujte analýzu současného stavu zaměřenou na testované parametry bezpilotních prostředků a metodiku jejich testování.
- Vhodně rozšiřte senzorickou síť bezpilotního prostředku Iris+ pro indoorové testování.
- Navrhněte vhodnou metodu testování.
- Analyzujte naměřená data a interpretujte výsledky.
- Výsledky diskutujte, stanovte limitace zvoleného přístupu a formulujte závěry práce.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Abdessameud, A., & Tayebi, A. (2013). Motion coordination for VTOL unmanned aerial vehicles: Attitude synchronisation and formation control. Springer Science & Business Media.  
Regtien, P. P., & Dertien, E. (2018). Sensors for mechatronics. Elsevier.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Kušmírek**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2019**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Karel Hylmar  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. října 2019

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Stanislavovi Kušmírkovi, který mi v průběhu tvorby práce poskytl cenné podklady a odborné konzultace. Dále pak Ing. Ladislavu Kellerovi za odborné konzultace a rady k dané problematice. A děkuji také doc. Ing. Bc. Vladimíru Sochovi, Ph.D. za pomoc se zpracováním dat k mé závěrečné práci. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat mé rodině a blízkým, kteří mě po dobu studia podporovali

## **Čestné prohlášení**

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 5. srpna 2020

.....

Podpis

## **Abstrakt**

V poslední letech zažívají bezpilotní letadla rapidní technologický rozvoj a předbíhají současná legislativní nařízení. Vznikla tak nová evropská nařízení upravující provoz bezpilotních letadel na základě letových charakteristik. Nová legislativa však doposud nedefinuje metodiku testování požadovaných parametrů. Tato práce věnuje pozornost možnosti indoorového dynamického testování kvadrokoptér. Klade si výzkumnou otázku možnosti experimentálního testování klopení kvadrokoptéry, jakožto jedné z dílčích letových charakteristik při manuálně pilotem řízených letech proti proudění vzduchu. Proud vzduchu byl generovaný pomocí ventilátoru s lamelovým regulátorem. Celkem byly vykonané tři experimentální lety o rychlostech proudění vzduchu  $v_1=1,44$  m/s,  $v_2=2,39$  m/s a  $v_3=3,41$  m/s. Úkolem pilota bylo udržet kvadrokoptéru pomocí kompenzačních pohybů v ose s ventilátorem. V průběhu manévru byly kompenzační pohyby kvadrokoptéry snímány za pomoci senzorického vybavení a optického MoCap systému Qualisys. Výstupní data, byla převedena do stejného formátu a zpracována pomocí Matlabu. Statistika zpracovaných hodnot poukazuje na vzájemnou lineární závislost mezi úhlem klopení a zrychlením. Tento koncept představuje možnou metodiku testování dílčího aspektu letové charakteristiky a poukazuje na další možné využití.

## **Klíčová slova**

Indoorové testování, letové charakteristiky, bezpilotní letadla, MoCap

## **Abstract**

Nowadays, the unmanned aircraft's technology has been accelerating and it is at the peak of the legislative regulations. This was the reason for developing new rules in Europe about the regulation and operations of unmanned aircraft's. Nonetheless, it still does not allow different testing of unmanned aircraft's due to the required specifications. Nevertheless, this could give a possibility for indoor progressive testing of quadcopters. Moreover, it questions the hypothetical query for possible preliminary testing of quadcopter tilt as manually piloted flight against the direction of the airflow. The airflow was created by a ventilator with a vane regulator. In total there were three experimental flights where the pilot's assignment was to keep the drone with a balance to the fan. There were used sensor equipment and the Qualisys optical MoCap during the movements of the drone. Moreover, the output data was used in Matlab and converted to its format. The result of the statistics showed that there was a linear relationship between the tilt angle and the acceleration. This approach showed that it could be used in the partial aspect of flight characteristics and also in different ways.

## **Key words**

Indoor testing, flight characteristics, unmanned aerial vehicles, MoCap

## Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Úvod	10
1 Legislativa, definice a současný výzkum bezpilotních letadel	11
1.1 Současná legislativa	11
1.1.1 Definice bezpilotních letadel, dle Doplnku X	12
1.2 Nová legislativa	13
1.2.1 Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945	13
1.2.2 Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/947	15
1.3 Charakteristika a zařazení vybraného bezpilotního letadla	16
1.3.1 Letadla lehčí než vzduch	17
1.3.2 Letadla těžší než vzduch	17
1.3.3 Multikoptéry	18
1.4 Analýza současného výzkumu	21
1.4.1 Shrnutí současného stavu	28
2 Použité prostředky a metody	29
2.1 Motion Capture	30
2.2 Qualisys	31
2.3 Inertia ProMove	34
2.4 Iris+	35
2.4.1 Kontrola letu	36
2.4.2 Hardware a technické specifikace	37
2.4.3 Senzorické vybavení	38
2.5 Odroid C2	40
2.6 Robotic Operating system	41
2.7 Průmyslový ventilátor	44
2.8 Experimentální koncept	45
2.9 Nástroje použité ke zpracování a vizualizaci dat	48
2.9.1 Převzorkování	48
2.9.2 Korelace	49
2.9.3 Regrese	49
2.9.4 Krabicový graf	50
3 Zpracování dat a statistika	52
4 Diskuze	60
Závěr	61
Bibliografie	63
Seznam obrázků	68

Seznam tabulek .....	69
Seznam grafů .....	69



## Seznam použitých zkratek

<b>Zkratka</b>	<b>Význam zkratky</b>
GPS	Global Positioning System
UA	Unmanned aircraft
UAS	Unmanned aircraft system
NASA	National Aeronautics and Space Administration
RPM	Revolutions per minute
ROS	Robot Operating System
MoCap	Motion Capture
FTVS	Fakulta tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy
QTM	Qualisys Track Manager
USB	Universal Serial Bus
RC	Radio Control

## Úvod

S bezpilotními letadly se již nesetkáváme pouze v experimentálním a vojenském sektoru, ale tato letadla se stala nedílnou součástí civilního letectví. V mnoha případech nekladou vysoké nároky na výcvik, znalosti a dovednosti pilota. Pořizovací náklady se díky hojnému počtu komerčních výrobců dostaly na své minimum, a jsou tak dostupnějšími pro širokou veřejnost. S rostoucí dostupností však přímou úměrou roste i jejich výskyt a projevují se tak stinné stránky spojené s jejich provozem. Amatérští piloti často přeceňují své možnosti a schopnosti správně odhadnout situaci, a dochází tak k nehodám, které ohrožují bezpečnost veřejnosti či ostatních účastníků vzdušného prostoru. Za účelem zvýšení bezpečnosti a sjednocení pravidel provozu bezpilotních letadel byl v České republice v roce 2012 přijat první legislativní rámec, stanovující jasná pravidla a nařízení, kterými se pilot musí řídit. Současná legislativa je však již zastaralá a přestává odpovídat aktuální situaci. Bepilotních letadel a pilotů nadále přibývá, a přichází proto nová evropská nařízení, nahrazující stávající. Novou legislativu, která vstupuje v letošním roce v platnost, tvoří oproti stávající přísnější nařízení. Nově zohledňující základní letové charakteristiky bezpilotních letadel, na základě kterých spadají bezpilotní letadla do jednotlivých klasifikačních tříd.

Ačkoliv nová legislativní nařízení přesně definují letové charakteristiky bezpilotních letadel, již nedefinují metodiku testování a dávají podnět vědecké komunitě k návrhu a sjednocení metodiky testování. Tato práce neřeší vybrané letové charakteristiky nových nařízení, ale pojednává o obecné metodice dynamického indoorového testování letových charakteristik bezpilotních letadel. V současnosti se v oblasti indoorového testování většina výzkumů zabývá vývoji řídicích systémů, autonomním letům, paralelnímu létání a konstrukčním úpravám. Jen úzká část vědeckých publikací se věnuje problematice dynamického testování a popisu letových charakteristik bezpilotních letadel při manuálně řízených letech. Za tímto účelem vznikl experimentální koncept, doplňující mezeru mezi současnými výzkumy. Koncept se opírá o předpoklad dosažení přesnějších výsledků měření při indoorovém testování oproti outdoorovému testování, díky větší přesnosti použitých polohových systémů oproti GPS a uniformnosti okolní podmínky.

# 1 Legislativa, definice a současný výzkum bezpilotních letadel

Kapitola interpretuje striktní znění legislativních norem, upravujících provoz bezpilotních letadel v České republice a představuje přesný popis definovaných pojmů k nim vztažených. První podkapitola se věnuje v současnosti platné legislativě, která uvádí, co vše musí pilot pro provoz bezpilotních letadel ve vzdušném prostoru splňovat. Druhá podkapitola následně navazuje na plánované změny a rozebírá rozdíly nové a stávající legislativy. Dále kapitola uvádí druhy bezpilotních letadel a zařazení k testování vybraného bezpilotního letadla. Následně vysvětluje jeho skladbu, mechaniku letu a dílčí vlastnosti. V neposlední řadě poukazuje na současný přínos a výzkum v oblasti indoorového testování bezpilotních letadel.

Současná legislativa patří mezi první legislativní rámce v České republice upravující provoz bezpilotních letadel a s jejich rostoucím výskytem, oblibou a dostupností se stává již zastaralou a nedostačující. S ohledem na tyto skutečnosti, vznikla nezbytná nutnost zavedení nových nařízeních a předpisů, aktualizujících a doplňujících stávající. Za tímto účelem vznikla nařízení Evropské komise, která zavádí nový minimální standard všem evropským zemím včetně České republiky. Hlavním cílem těchto nových nařízeních je sjednocení pravidel provozu bezpilotních letadel v evropských zemích, navýšení bezpečnosti leteckého provozu a zpřehlednění výskytu stávajících bezpilotních letadel za pomoci jejich registrace. [1] [2]

## 1.1 Současná legislativa

V současné době v České republice upravuje provoz bezpilotních systémů letecký předpis pravidel létání L2, zejména Doplněk X. Závaznost tohoto předpisu vychází ze zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví, z něhož je pro bezpilotní systémy nejdůležitější §2 a §52. [3] §2 definuje letadlo, kterým se rozumí zařízení schopné vyvozovat síly z reakcí vzduchu nesoucí jej v atmosféře. Dále definuje model letadla, na základě maximální hmotnosti do 25 kg. §52 definuje létání letadel bez pilota na palubě pouze za podmínek stanových Úřadem pro civilní letectví. [4]

Letecké předpisy L pak vychází z příloh Chicagské úmluvy, podle kterých byly upraveny a zpracovány Úřadem civilního letectví a prostřednictvím Ministerstva dopravy vstoupily v platnost dne 1.března 2012. Podoba leteckých předpisů L se však neustále mění a aktualizuje. [3] [4]

Doplněk X v první řadě definuje názvosloví a vysvětluje základní pojmy spojené s bezpilotními letadly, mezi představené pojmy patří autonomní letadlo, bezpilotní letadlo (UA), bezpilotní systém (UAS) a model letadla. Současně tento dokument apeluje na rozsah působnosti od

projektování, výroby, údržby, po změny a provoz bezpilotních systémů. Doplněk X dále klade důraz na bezpečnost, nesmí dojít k újmě na zdraví osob či poškození majetku a životního prostředí. Následně tento letecký předpis zmiňuje povinný přímý vizuální dohled pilota na bezpilotní letoun v průběhu letu a specifikuje postup při ukončení letu a přistání. Také tento legislativní rámec určuje celkovou odpovědnost pilota vznikající při létání a povinnost hlášení vzniklých událostí. Zmiňuje podmínky provozu ve vzdušných prostorech, stanovuje s nimi spojená meteorologická minima a ochranná pásma. V neposlední řadě Doplněk X vyjmenovává zakázané typy nákladu a zakázané druhy možného použitého pohonu bezpilotního letadla. [5]

Povinnost registrace bezpilotních letadel, vzniká dle současné legislativy na základě hmotnosti zařízení od hranice 25 kg či v případě komerčního využití. [5] Oproti nastávající legislativě, která je ve většině ohledech přísnější a povinnost registrace nastává na základě více aspektů, mezi které patří kromě vzletové hmotnosti i další letové charakteristiky. [6]

### **1.1.1 Definice bezpilotních letadel, dle Doplněku X**

Pojmy a názvosloví vycházející z definic Doplněku X o bezpilotních systémech.

#### **Autonomní letadlo**

- *„Bespilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu.“* [5]

#### **Bespilotní letadlo (UA)**

- *„Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě.“* [5]

#### **Bespilotní systém (UAS)**

- *„Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bepilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více.“* [5]

#### **Model letadla**

- *„Letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používáno pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu, není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného*

*modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuálním dohledu.“ [5]*

## **1.2 Nová legislativa**

V roce 2020 přichází v planost nové nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945 o bezpilotních systémech a o provozovateli bezpilotních systémů z třetích zemí, ze dne 12. března 2019. Toto nařízení se vztahuje ke komerčním výrobcům a má v České republice postupně nabýt platnosti v průběhu letošního roku společně s nařízením komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/947 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel ze 24. května 2019, které se v České republice implementuje od 31. 12. 2020 a vztahuje se k provozovatelům bezpilotních systémů. Tato nařízení vyplývají z již platného nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139, které stanovuje společná pravidla civilnímu letectví a jeho VII. oddíl klade požadavky na projektování, výrobu, údržbu a provoz bezpilotních systémů. [6] [7] [8]

### **1.2.1 Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945**

První legislativní nařízení (EU) 2019/945 rozděluje bezpilotní letadla do pěti tříd, C0, C1, C2, C3 a C4, na základě letových charakteristik a dalších důležitých dílčích aspektů, které kladou specifické požadavky na výrobce. [7]

#### **Třída C0**

Pro bezpilotní letadla třídy C0 platí:

- Maximální vzletová hmotnost včetně užitečného zatížení nesmí převýšit 250 g.
- Maximální rychlost při vodorovném letu nesmí přesahovat 19 m/s.
- Maximální výška letu je omezena dostupností do 120 m od hladiny vzletu.
- V případě, že je bezpilotní letoun napájen elektřinou, nesmí napětí stejnosměrného a adekvátního střídavého proudu přesáhnout hodnotu 24 V a žádná z částí bezpilotní letouni nesmí kombinací proudu a napětí způsobit úraz i v případě jeho zničení.

#### **Třída C1**

Pro bezpilotní letadla třídy C1 platí:

- Maximální vzletová hmotnost včetně užitečného zatížení nepřevyšuje 900 g a při pádu s konečnou rychlostí nepřesáhne energie nárazu 80 J.
- Maximální rychlost při vodorovném letu nesmí přesahovat 19 m/s.
- Maximální výška letu je omezena dostupností do 120 m od hladiny vzletu nebo je pomocí dálkového ovládání výška letu pilotem volitelná, avšak pilot je o ní prostřednictvím dálkového ovládání informován.
- V případě, že je bezpilotní letoun napájen elektřinou, nesmí napětí stejnosměrného a adekvátního střídavého proudu přesáhnout hodnotu 24 V a žádná z částí bezpilotního letounu nesmí kombinací proudu a napětí způsobit úraz ani v případě jeho zničení.

## **Třída C2**

Pro bezpilotní letadla třídy C2 platí:

- Maximální vzletová hmotnost bezpilotního letounu včetně užitečného zatížení nesmí přesáhnout 4 kg.
- Maximální výška letu je omezena do 120 m od hladiny vzletu nebo je pomocí dálkového ovládání výška pilotem volitelná, avšak pilot je o ní prostřednictvím dálkového ovládání informován.
- Nejedná-li se o bezpilotní letoun s pevnými křídly, musí být vybaven pilotem volitelným režimem nízké rychlosti do 3 m/s.
- V případě, že je bezpilotní letoun napájen elektřinou, nesmí napětí stejnosměrného a adekvátního střídavého proudu přesáhnout hodnotu 48 V a žádná z částí bezpilotního letounu nesmí kombinací proudu i napětí způsobit úraz i v případě jeho zničení.

## **Třída C3**

Pro bezpilotní letadla třídy C3 platí:

- Maximální vzletová hmotnost včetně užitečného zatížení nesmí převýšit 25 kg a maximální rozměr nesmí převýšit 3 m.

- Maximální výška letu je omezena do 120 m od hladiny vzletu nebo je pomocí dálkového ovládání výška pilotem volitelná, avšak pilot je o ní prostřednictvím dálkového ovládání informován.
- V případě, že je bezpilotní letoun napájen elektřinou, nesmí napětí stejnosměrného a adekvátního střídavého proudu přesáhnout hodnotu 48 V a žádná z částí bezpilotního letounu nesmí kombinací proudu i napětí způsobit úraz i v případě jeho zničení.

#### **Třída C4**

Pro bezpilotní letadla třídy C4 platí:

- Maximální vzletová hmotnost včetně užitečného zatížení nesmí převýšit 25 kg.

Jednotlivé klasifikační třídy dále kladou důraz na konstrukční řešení s ohledem na použité materiály a mechanickou pevnost v rámci bezpečnosti. Další aspekty, které nařízení bere v potaz je řiditelnost, ovladatelnost a výkon datového spoje mezi pilotem a bezpilotním systémem k případnému varování o nízkém stavu baterie. Bepilotní systémy musí být dále vybaveny bezpečnostními režimy, pro obnovení datové spoje či přerušeni letu v závislosti na senzorickém vybavení, či světelným značením z důvodu dobré viditelnosti bezpilotního systému. Výrobek musí mít také jedinečné sériové číslo a na trh musí být uveden s příslušnou příručkou. [7]

#### **1.2.2 Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/947**

Druhé nové legislativní nařízení (EU) 2019/947 má značně přísnější, ale obdobnou strukturu jako současný Doplněk X, hlavním rozdílem jsou tři nové kategorie, otevřená, specifická a certifikovaná, na základě kterých budou provozovatelé bezpilotních systémů registrováni. Kategorie otevřená se dále dělí do podkategorií A1, A2 a A3. [8]

##### **Podkategorie A1**

- Do této podkategorie patří bezpilotní letadla třídy C0 a C1
- Nutná registrace v podobě online výcvikového kurzu a online zkoušky z teoretických otázek s výjimkou bezpilotních letadel třídy C0, které nejsou vybaveny palubní kamerou.

## **Podkategorie A2**

- Do této podkategorie spadají bezpilotní letadla třídy C2
- Nutná registrace v podobě online výcvikového kurzu a online zkoušky z teoretických znalostí, praktického výcviku a rozšířené teorie

## **Podkategorie A3**

- Poslední podkategorie zahrnuje bezpilotní letadla třídy C2, C3 a C4
- Nutná registrace v podobě online výcvikového kurzu a online zkoušky z teoretických znalostí

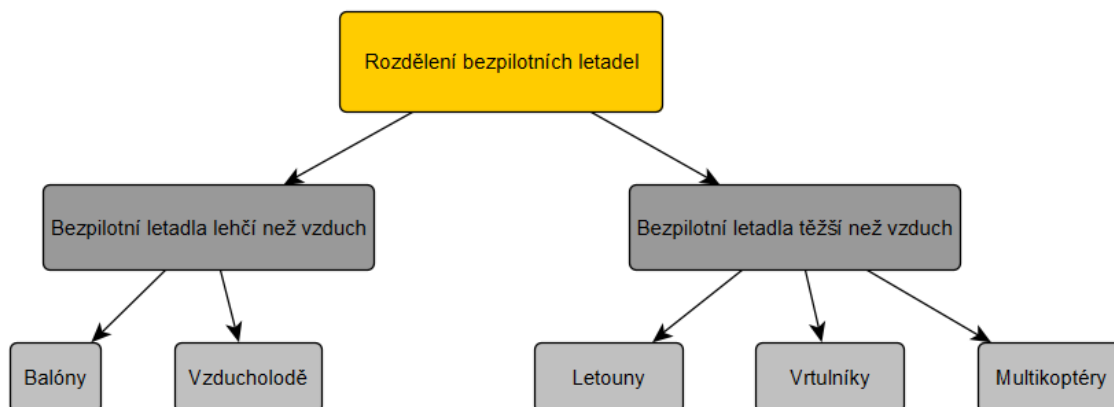
Otevřená kategorie dále specifikuje povinnost přímého dohledu pilota nad bezpilotním systémem v průběhu letu. Stanovuje maximální povolenou výšku letu omezenou 120 m od hladiny vzletu, stanovuje povolenou vzdálenost letu od osob a zakazuje lety nad davem či lety s nebezpečným nákladem. Pro provoz v této kategorii není potřebné povolení. Kategorie specifická je dále určena například pro modeláře, jejichž bezpilotní letadla nesplňují některou ze zmíněných podmínek kategorie otevřené a potřebují udělit výjimku. Pro provoz bezpilotních systémů ve specifické kategorii je již potřebné povolení příslušného úřadu. Kategorie certifikovaná se teprve vytváří a její podoba se bude odvíjet od aktuálních potřeb. Pro provoz je vyžadována certifikace bezpilotního systému spolu s osvědčením způsobilosti dálkově řídicího pilota a povolení příslušným úřadem. [6] [8]

Ačkoli nová legislativní nařízení, upravující provoz bezpilotních letadel, pojednávají o letových charakteristikách bezpilotních letadel, nezmiňují metodický postup při jejich testování. A dávají tak podnět k vzniku indoorového konceptu testovacího zařízení, schopného na základě zmíněných letových charakteristik, jakými je maximální vzletová hmotnost, maximální rychlost při indoorovém letu, velikost kinetické energie při nárazu, jednoznačně klasifikovat bezpilotní letadla do jednotlivých klasifikačních tříd.

### **1.3 Charakteristika a zařazení vybraného bezpilotního letadla**

Žádný ze současných legislativních předpisů, striktně nedefinuje rozdělení bezpilotních letadel. Pouze letecký předpis L7, zmiňuje druhy bezpilotních letadel, které se v současnosti vyskytují. Na dělení bezpilotních letadel, lze hledět stejným způsobem jako na dělení normálních letadel, tedy z hlediska způsobu překonávání zemských sil a vyvozování vztlaku. Rozlišujeme letadla lehčí než vzduch a letadla těžší než vzduch, která se dále dělí na základě mechaniky jejich letu (Obr. 1). [4] [9]





Obrázek 1 – Rozdělení bezpilotních letadel

### 1.3.1 Letadla lehčí než vzduch

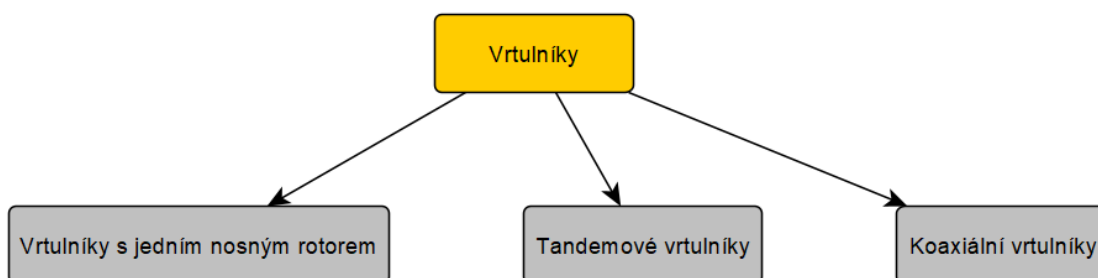
U letadel lehčích než vzduch se jedná o balóny a vzducholoď, které využívají fyzikálního principu aerostatických sil. V případě balonů je těleso v podobě obalu, naplněno hořákem zahřátým vzduchem, který má menší hustotu a je tak lehčí než okolní vzduchu. Vzducholoď tvoří konstrukce, obal a několik balonetů, naplněných plynem lehčím než vzduch. Pod nosným tělesem, bývá umístěn koš či jiné nosné zařízení, vybavené například řídicími systémy. Hlavním rozdílem mezi balónem a vzducholoďí je druh pohonu. Balón je ovládán pouze zmíněným hořákem či plynovou výplní obalu, kdežto vzducholoď je řízena pohonnými jednotkami. [4]

### 1.3.2 Letadla těžší než vzduch

Do této kategorie patří bezpilotní letadla, která vyvozují vztlak jinými způsoby, než využitím aerostatických sil. Prvním zástupcem jsou letouny, které generují vztlak pomocí specifického tvaru profilu pevných ploch křídel. Tvar profilu zapříčiňuje rozdílnou rychlost obtékání vzduchu horní a spodní části profilu křídla, na horní straně profilu tak vzniká menší statický tlak než na spodní části, známý jako vztlak. Bepilotní letouny jsou ve většině případech poháněny elektromotory, a dálkově řízeny pilotem pomocí řídicích orgánů, jako jsou křídélka, klapky, směrové a výškové kormidlo. Bepilotní letouny jsou oblíbené mezi modeláři, kteří nejčastěji sestavují vlastní napodobeniny skutečných letounů ve zmenšeném měřítku.

Dále do této kategorie patří bezpilotní letadla schopná vertikálního vzletu, přistání a visení. Mezi zástupce patří vrtulníky a multikoptéry, které se od sebe v rámci legislativy často chybně nerozlišují a jsou Úřadem civilního letectví a Ministerstvem dopravy označovány jednotným

výrazem za vrtulníky. Vrtulníky se dále dělí na tandemové, koaxiální a vrtulníky s jedním nosným rotorem (Obr. 2). [4]



Obrázek 2 – Rozdělení vrtulníků

Obecný princip letu vrtulníku je založen na rotorových listech, otáčejících se okolo rotorů, generujících tah nasáváním vzduchu a jeho následným vytlačováním pod rovinu rotorových listů. Mechanika letů a ovládání je následně založena na nastavitelných listech, umožňujících změnu úhlu náběhu, a tak provádění klopení a klonění. Při otáčení rotorových listů vzniká moment, který je konstrukčně vyrovnávaný vertikálně umístěným ocasním rotorem, jehož regulací tahu je vrtulník schopen provádět otáčení. Ocasní rotor není však potřebný u tandemových vrtulníků, které tvoří dva nosné rotory, jenž vůči sobě rotují a vznikající moment navzájem vyrušují. Koaxiální vrtulníky využívají stejného principu jako Tandemové vrtulníky, s rozdílem uložení obou nosných rotorů v jedné ose. [10] [11]

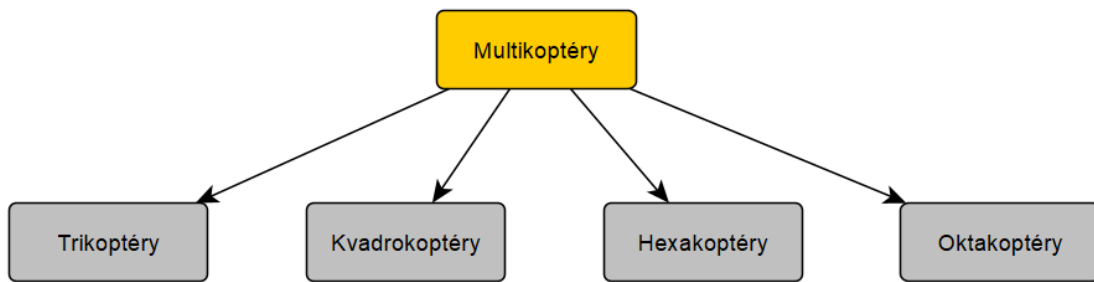
### 1.3.3 Multikoptéry

Nejčastěji se vyskytujícím zástupcem bezpilotních letadel jsou v současnosti bezpochyby multikoptéry, díky svým vlastnostem, výborné manévrovatelnosti a intuitivnímu ovládní, které zvládají amatérští piloti bez znalosti základních principů letu. Další výhodou ovlivňující jejich popularitu je jednoduchá konstrukce oproti ostatním bezpilotním letadlům.

Multikoptéry tvoří rám, ve kterém se nachází veškeré dílčí komponenty, zahrnující baterii, řídicí jednotku a sensorické vybavení s iniciativou, zachování těžiště v geometrickém středu zařízení. Součástí těla jsou ramena, která mohou být k tělu také připevněna s možností jejich složení a dosažení větší skladnosti celého bezpilotního systému. Ramena jsou nejčastěji osazena bezkomutátorovými elektromotory s dvoulístými vrtulemi. Další konstrukční část

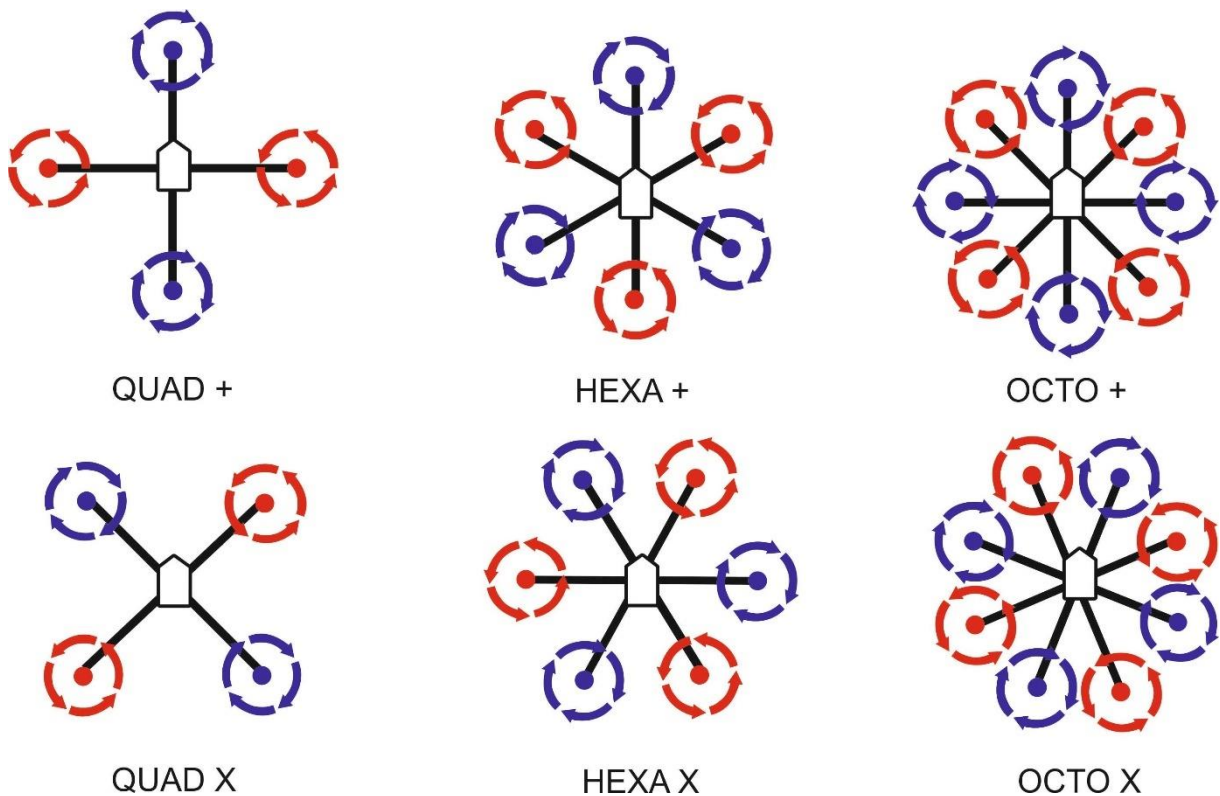
multikoptér tvoří vzletové a přistávací zařízení v podobě ližin či nohou, které nastavují světlostou výšku, vymezující prostor mezi vrtulemi a cizími předměty, které by v opačném případě deformovaly zranitelné vrtule nebo celé zařízení. Většina multikoptér je vybavena kamerou, k zajištění kontroly pilota nad systémem během ztráty vizuálního dohledu či k účelům fotografování. Pilot kontroluje průběh letu prostřednictvím radiového dálkového ovladače, informujícího řídicí jednotku o další příkazech a řídicí jednotka stejným způsobem informuje pilota, například o stavu baterie a signálu. Ovládání pilotovi dále usnadňuje několik režimů letu, kterými jsou multikoptéry vybaveny v závislosti na sensorické vybavení a továrním nastavení výrobce. Některé multikoptéry pilotovi dovolují manuálně řízený let, při kterém jsou všechny stabilizátory vypnuty. Další letové režimy zahrnují poloautomatické režimy v rámci GPS, například prostřednictvím předdefinovaných bodů trasy, které je multikoptéra schopna opisovat, dokud nedostane jiný příkaz, či je schopna viset v konkrétní zeměpisné poloze i přes výchyly způsobené poryvy větru a do polohy se vrátit. Dále některé multikoptéry umožňují automatický režim, který je dopředu naprogramovaný, v tomto režimu je pilot vždy schopný do letu zasáhnout, a nejedná se tak o autonomní let. Dalšími režimy, jsou bezpečnostní režimy, určené pro případy případné ztráty radiového spojení vlivem členitosti terénu, při kterých je multikoptéra schopna navrácení na místo vzletu, díky zaznamenání počáteční pozice vzletu pomocí GPS. Dalším bezpečnostním režimem v případě, že není daná multikoptéra vybavena GPS modulem, je režim, kdy multikoptéra přejde v případě ztráty radiového spojení do režimu automatického visení a postupně přistane. Tyto bezpečnostní režimy může pilot libovolně aktivovat i v případě, že nedojde ke ztrátě spojení. Výrobci neustále přicházejí s novými režimy letu, nejmodernější multikoptéry jsou dnes schopny například automaticky sledovat pilota a vyhýbat se při sledování okolním překážkám. [4] [12]

Multikoptéry se vyrábí v několika konfiguracích rámců, ve tvaru „+“ či „X“ nebo „H“ a „Y“ v kombinaci se třemi, čtyřmi, šesti nebo osmi rameny. Počet ramen, ve většině případů rovný počtu pohonných jednotek, je poznávacím znakem multikoptér a přiděluje jim příslušné označení, například nejčastěji se vyskytující konfigurace multikoptéry s čtyřmi pohonnými jednotkami a čtyřmi rameny ve tvaru X se nazývá kvadroptéra (Obr. 3). [12] [11]



Obrázek 3 – Rozdělení multikoptér

Multikoptéry jsou oproti vrtulníkům mechanicky mnohem jednodušší a své ovladatelnosti dosahují regulací rychlosti otáček jednotlivých elektromotorů pomocí regulátorů, které určují napětí příslušící otáčkám jednotlivých elektromotorů, prostřednictvím příkazů pilota přes řídicí jednotku. Jednotlivé elektromotory se vždy otáčejí v opačném směru oproti přilehlým elektromotorům, k vyrušení při otáčení vznikajících momentů, které by v opačném případě zapříčinily nechtěnou rotaci celého bezpilotního letadla, či by vyžadovaly konstrukční řešení v podobě ocasních rotorů, jako v případě vrtulníků (Obr. 4). [12]



Obrázek 4 – Konfigurace multikoptér

Let multikoptér se skládá z manévrů klesání a stoupání, které se jednoduše ovládají přírůstkem či úbytkem otáček všech motorů. Manévr klopení je prováděn poklesem otáček předních či zadních elektromotorů na základě dopředného letu či couvání. Totožným způsobem je prováděn manévr klonění s rozdílem změny poklesu otáček postranních elektromotorů v závislosti na straně klonění. V průběhu otáčení okolo svislé osy, tedy zatačení, například vpravo, jsou zvyšovány otáčky motorů otáčejícím se po směru hodinových ručiček a snižovány otáčky těm motorům, které se otáčejí v protisměru. [11] [12] [4]

#### **1.4 Analýza současného výzkumu**

V posledních letech zažívají bezpilotní letadla rapidní technologický rozvoj, jsou implementovány v široké oblasti potencionálního využití a díky svým přednostem se stávají užitečným nástrojem v mnoha oborech. A tak za účelem poznání, získání většího množství doposud chybějících kvalitních dat, vznikla řada výzkumů, vědeckých publikací a nových konceptů, podporujících tento vývoj a věnujících se obdobné problematice, popisu chování multikoptér a jejich letových charakteristik.

Mezi tyto výzkumy se řadí experimentální projekty v modelovém prostředí armádního aerodynamického tunelu NASA a aerodynamickém tunelu Univerzity Liège v Belgii. Hlavním cílem výzkumů bylo získání přesných hodnot působících sil a momentů na vybraná bezpilotní letadla a samotné vrtule vlivem rychlosti proudění vzduchu, při rozdílných úhlech náběhu a rozdílných rychlostech otáček elektromotorů. K samotným testům aerodynamického tunelu NASA bylo vybráno pět komerčních multikoptér s původním účelem využití, pořizování fotografických a kamerových záznamů. Mezi zvolené zástupce patřily čtyři kvadrokoptéry, produkční model 3DRobotics Solo a Iris+ stejné společnosti, DJI Phantom 3, SUI Endurance a oktokoptéra Drone America X8.

Z důvodů výzkumu NASA bylo nutné upravit některé stávající komponenty, což především zahrnovalo vytvoření vlastního regulátoru dodávajícího stejnosměrný proud, umožňující připojení vlastního 3000 W zdroje, schopného dodat 20 V až pro 150 A a plně dostačujícího k maximálnímu potencionálnímu výkonu všech užitých multikoptér. Vytvořením vlastního zdroje bylo zároveň docíleno odstranění jedné z nejistot měření v podobě proměnné baterie. Při úpravách byl také odstraněn gyroskopický stabilizátor, jehož primárním účelem bylo stabilizovat kameru v průběhu letu, úchyty byly místo něj nahrazeny a využity k umístění a připevnění multikoptér do prostor aerodynamického tunelu pomocí speciálně navrženého otočného kloubu, umožňujícího měnit v průběhu testu úhel pootočení okolo svislé osy, a nastavení tak úhlu náběhu proudícího vzduchu (Obr. 5). Příprava konceptu testovacího zařízení zahrnovala i klíčový sběr dat zajištěný pomocí softwarového nástroje LabVIEW,

zaznamenávající v průběhu testu data o natočení kolem svislé osy, hodnoty působících sil a momentů či napětí a proud. LabVIEW dále uživateli umožňovalo manuální nastavení rozsahu RPM příslušným jednotlivým motorům.



Obrázek 5 – Kvadroptéra DJI Phantom v prostorách aerodynamického tunelu NASA [13]

V případě druhého výzkumu Univerzity Liège, soustředěného pouze na samostatnou vrtuli Graupner E-prop, byl dodržen obdobný postup experimentu. Výběr vhodného elektromotoru a vytvoření stabilního zdroje, poskytujícího volitelné napětí. Využití otočného kloubu navíc vybaveného šestiosým senzorem snímající působící síly a momenty (Obr. 6). V průběhu příprav byla následně vybraná vrtule ručně opracovaná, k dosažení přesného vyvážení za účelem minimalizace vibrací, které by později měly negativní vliv na naměřené hodnoty.



Obrázek 6 – Umístění vrtule Graupner E-prop v prostorách tunelu Liège [14]

Jednotlivé testování multikoptér probíhalo ve třech separovaných testech, první test byl prováděn bez zásahu do konstrukce, druhý test, zaměřený na zjištění působících sil odporu byl již prováděn se zásahy, spočívajícími v odebrání osazených vrtulí. Třetí konfigurace testů byla navržena pouze pro izolovaný elektromotor osazený vrtulí. U druhého výzkumu byly testy prováděny v jedné konfiguraci při rychlostech větru 0 m/s, 6 m/s a 9 m/s, zaznamenaných Pitotovou trubicí a při natočení vrtule od 0° do 180° po 30° a napětí v rozmezí od 4 V do 12 V odpovídajícím 3000 až 10 000 RPM.

Samotné testy zahrnovaly měření působících sil, vzlaku a odporu, měnících se vlivem různých otáček elektromotorů a různých úhlů náběhu (Obr. 7). První série testů prováděná při klonění vpřed a vzad či klopení ze strany na strany umožňovala změřit vzniklé momenty působící na multikoptéry a předpokládanou základní rychlost elektromotorů potřebnou k letu, porovnání výsledků testů zhotovených pro izolovaný elektromotor a kompletní multikoptéru umožnilo zjistit vznikající interakce mezi jednotlivými elektromotory a mezi elektromotory a tělem multikoptéry.

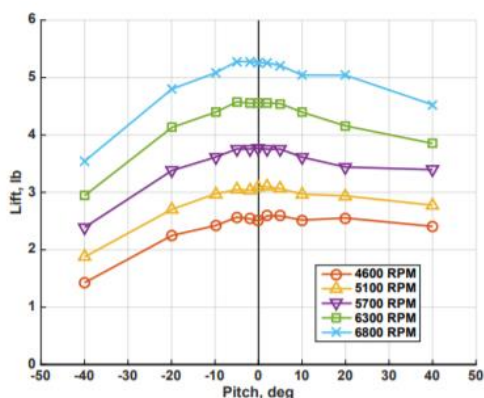


Figure 17. Lift for 3DR SOLO,  $q = 0.48 \text{ lb/ft}^2$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$ .

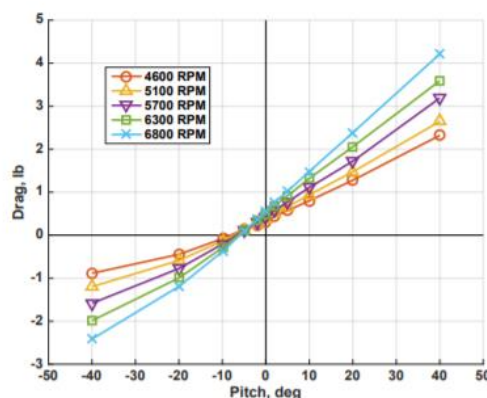


Figure 18. Drag for 3DR SOLO,  $q = 0.48 \text{ lb/ft}^2$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$ .

Obrázek 7 – Výsledné hodnoty vzlaku a odporu měnících se vlivem rozdílných otáček elektromotorů a úhlů natočení [13]

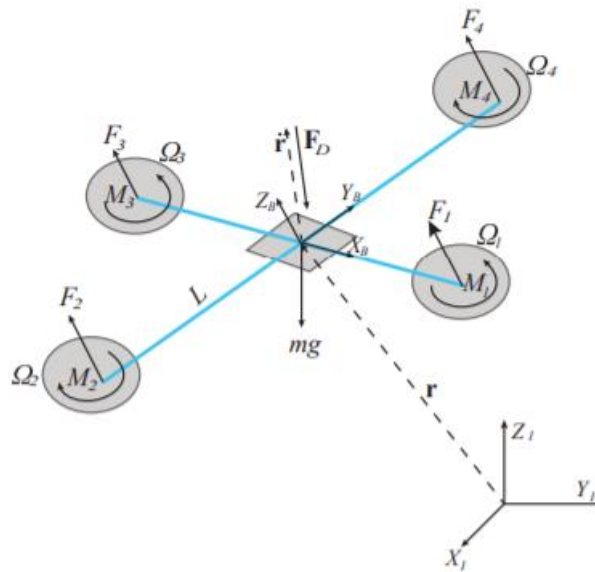
Výsledky provedených měření výzkumu Univerzity Liège ukázaly závislost tahu a momentů na úhlu náběhu a hodnotách RPM. [14] [13]

Další část odborných prací se věnovala vytvoření konceptu testovacího zařízení umožňujícího návrh modelového prostředí pro vývoj nových algoritmů, jejich implementací do reálného prostředí a autonomním letům v indoorových oblastech bez krytí GPS.

Patří sem výzkumy, které zkompletovaly prostředí schopné modelovat fyzické parametry reálných letů bezpilotních letadel za pomoci nástrojů strojového učení, robotické virtuální reality, MoCap technologií, programovacích jazyků a open-source firmwaru autopilotů. [15] Výzkumy sloužily především k pozdějšímu vývoji reálných autonomních letů v indoorových oblastech, jakými jsou například lety po předdefinované trajektorii, lety více bezpilotních letadel v synchronizované formaci, opisování trajektorie pozemních vozidel, detekce a vyhýbání se překážkám.

K dosažení těchto již poměrně komplikovaných operací a manévru bylo nejprve důležité začít s těmi jednoduššími. K nim bylo důležité správně definovat matematický model odpovídající skutečným letovým charakteristikám vybraných bezpilotních letadel (Obr. 8). Nebo vhodně vybrat open-source firmware již existujících autopilotů, jakými jsou v případě indoorových letů kvadrokoptér například ArduPilot či PX4. V případě modelování matematického modelu bylo nutné vytvořit výchozí souřadný systém tvořený třemi ortogonálními osami a následně definovat souřadný systém bezpilotního letadla pomocí šesti stupňů volnosti, reprezentujících posuny a translace okolo hlavních os X, Y a Z, sloužících k určení polohy a orientace v prostoru vůči výchozímu souřadnému systému. Modelování také zahrnovalo definování příkazů pilota v rámci manévru klonění, klopení a otáčení pomocí jednotlivých otáček elektromotorků, prostřednictvím napětí regulátorů k dosažení stabilizovaného letu. [16] Dále k dosažení komplexnějších autonomních úkonů, spočívajících v ovládní bezpilotního letadla, bez manuálního zásahu pilota, dostupů k definovaným bodům trajektorie a vyhýbání se překážkám, bylo také nutné definovat kontrolní vstupy v podobě nastavení úhlů klonění, klopení, zatáčení a napětí určující rychlosti elektromotorů, umožňujících kontrolu bezpilotního letadla, dle požadovaných cílů. [17] [18] [19]



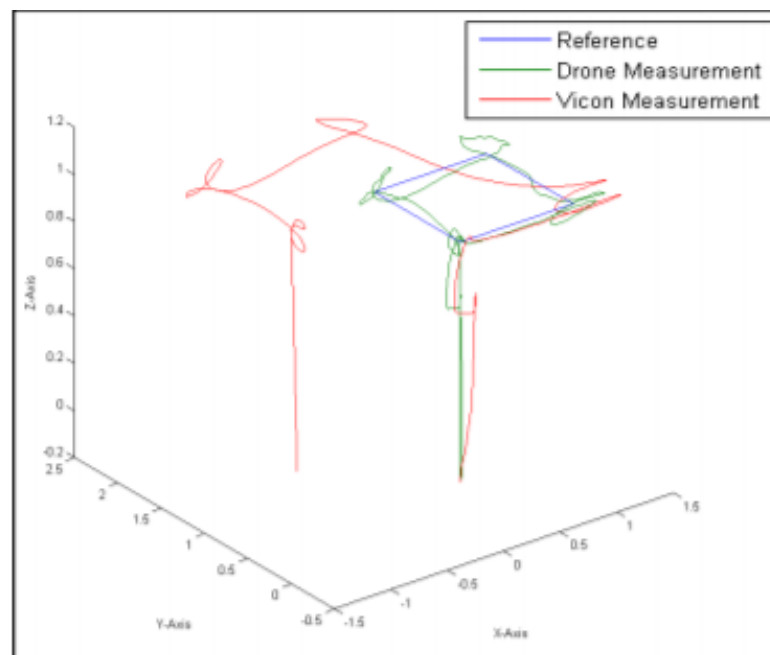


Obrázek 8 – Matematický model kvadroptéry [18]

Nástrojem vhodným pro tyto účely modelování se ukázal být Matlab/Simulink a vysokoúrovňový programovací jazyk Python či C++, které byly dále také užitečné při zpracování výstupních dat. Další důležitou dílčí součástí navržených konceptů byl open-source softwarový nástroj Robotic Operating System, dále jen ROS, podporovaný těmito programovacími jazyky, schopný spouštět více paralelních procesů, zajišťovat komunikační vrstvu mezi jednotlivými komponenty konceptu v reálném čase, zpracovávat dostupné informace získané ze senzorů palubní řídicí jednotky, firmwaru autopilotů a externích senzorů, jako například v případě optických polohových systémů Vicon a Qualisys. ROS je oblíbený nástroj podporující vývoj robotiky a je tvořený velkou komunitou přispívajících členů, kteří přispěli k vytvoření ve výzkumech často používanému balíčku MAVROS, poskytujícího datový přenos MAVLink mezi bezpilotním letadlem a pozemní stanicí či počítačem pomocí radiového spojení. [20] Dále byla většina matematických modelů bezpilotních letadel, vytvořených za pomoci algoritmů, vyzkoušena v prostředí virtuální robotické reality, jakým je ROTORS, Gazebo, V-REC a AirSim k detekci možných chyb, které by v jiném případě mohly před samotnou implementací do reálného prostředí narušit bezpečnost letu či poškodit samotný bezpilotní letoun. [15] [21] [22]

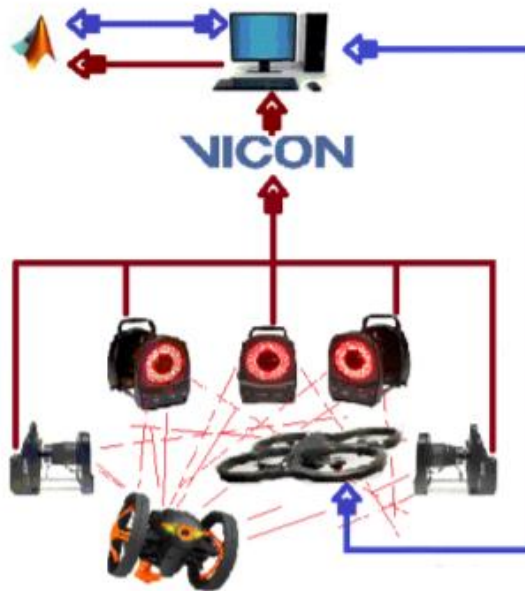
Výše zmíněné nástroje, jakými jsou palubní senzory řídicích jednotek tvořené tříosými akcelerometry a tříosými gyroskopy, open-source firmwary, optickými polohovými systémy a kamerami v kombinaci s programovacími jazyky dále slouží ke komplexnějším autonomním úkonům, jakými jsou lety po předdefinované trajektorii, lety ve formaci, sledování pozemních robotů či vyhýbání se překážkám. [11]

Metodikou často využívanou k dosažení autonomních letů bezpilotních letadel po předdefinované trajektorii v oblastech bez možnosti využití GPS byla metoda vzájemně se doplňujících palubních senzorů, jako například optického senzoru měřícího horizontální a vertikální rychlost, ultrazvukového senzoru měřícího výšku letu vzhledem k zemi a inerciální měřící jednotky skládající se z tříosého gyroskopu, akcelerometru a magnetometru, zaznamenávající polohu a orientaci v prostoru. Výstupní hodnoty všech senzorů byly následně zpracovány třemi nezávislými proporcionálními regulátory palubního počítače, který komunikoval pomocí radiového spojení s pozemní stanicí, vyobrazující data v reálném čase a umožňující uživateli volbu takzvaných bodů trasy, tvořících trajektorii letu. Navržená platforma byla následně rozšířena o další možnost, letů více bezpilotních letadel ve formaci pomocí radiového spojení mezi bezpilotními letadly, vzájemně si sdílejících polohová data o své aktuální poloze. [23] [24] Jiné výzkumy se stejným cílem, ale jinou metodikou využily již existující Simulinkový blokový model AR Drone Software development kit v1.1 vyvinutý Davidem Sanabriaem pro autonomní lety po předdefinované trajektorii bezpilotního letounu Parrot AR Drone, definované pilotem, využívající naměřené hodnoty řídicí jednotkou, tvořenou akcelerometrem, tříosým gyroskopem, magnetometrem a ultrazvukovým výškoměrem. Do konceptu byl implementován také optický polohový systém Vicon snímající bezpilotní letoun pomocí pěti lesklých referenčních značek, díky kterému bylo možné posoudit přesnost opisované trajektorie, která ne zcela přesně, jak bylo zjištěno odpovídala zadané trajektorii, kvůli dvojité integraci výstupních hodnot (Obr. 9). [25]



Obrázek 9 – Porovnání předdefinované trajektorie se skutečně opisovanou trajektorií [25]

Stejná výše popsaná metoda byla dále využita při letech po předdefinované trajektorii ve formaci dvou bezpilotních letadel Parrot AR Drone upravením blokového schématu simulinkového modelu AR Drone Software development kit v1.1 pro dva bezpilotní letouny, kdy vedoucí Parrot poskytoval informace o své poloze pomocí Simulinkového bloku Wi-Fi druhému Parrotu, který jí opisoval a celý let byl zároveň snímán optickým Vicon systémem k porovnání skutečně opisované trajektorie a trajektorie referenční. [26] Optický polohový systém Vicon byl také použit k zaznamenávání trajektorie pozemního vozidla, která byla zpracována pomocí navrženého Matlab/Simulinkového bloku schopného zpracovávat polohová data v reálném čase a informovala bezpilotní letoun Parrot AR o bodech trajektorie, které má sledovat (Obr. 10). [27]



**Obrázek 10 – Koncept opisování trajektorie pozemního vozidla bezpilotním letadlem [27]**

Přestože byl optický polohový systém často využíván jako náhrada GPS, tak je velmi nákladný. Některé výzkumy hledaly i jiné, levnější způsoby dosažení autonomních letů po předdefinované trajektorii. Například využitím několika přesně kalibrovaných pozemních GoPro kamer a několika detekčních algoritmů schopných rekonstruovat a sledovat definovaný matematický model bezpilotního letadla za pomoci matematických metod nejmenších čtverců, Gaussova rozdělení a Kalmanova filtru. [28]

### **1.4.1 Shrnutí současného stavu**

Posouzením současných výzkumů a vědeckých publikací zaměřených na metodiku testování bezpilotních letadel a jejich vývoj v indoorových oblastech, byla získána inspirace k sestavení vlastního testovacího konceptu. Zaměřeného na testování letových charakteristik, využitím implementace současných metod a nástrojů navržených ke snímání polohy objektů za pomoci různorodých technologií polohových systémů v podobě optického systému Qualisys laboratoře Fakulty tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy, externího systému Inertia ProMove a samotných senzorů řídicí jednotky Pixhawk. Dalším získaným podmětem, využitým ke zpracování výstupních hodnot těchto polohových systémů a porovnání hodnot s outdoorovým měřením, bylo využití funkcí Matlabu či uplatnění zmíněného softwarového nástroje ROSu, zajišťujícího vzájemné komunikační vrstvy mezi jednotlivými komponenty v reálném čase. Dále byla využita metodika testování bezpilotních letadel v aerodynamických tunelech k navržení vlastní imitace nízkorychlostního aerodynamického tunelu za účelem vytvoření simulovaného prostředí outdoorových letů.

## 2 Použité prostředky a metody

Při návrhu testovacího zařízení letových charakteristik bezpilotních letadel bylo důležité zvolit správnou metodiku testování a s ní související použití vhodných prostředků. V případě testování letových charakteristik v indoorových oblastech bez krytí a podpory GPS, existuje řada způsobů a technik snímání polohy a letových charakteristik bezpilotních letadel, označovaná jako Motion Capture, dále jen MoCap. V první podkapitole je tedy představen a vysvětlen pojem MoCap, na jehož základě koncept stojí. Uvedeny jsou jednotlivé technologie a druhy snímání, z nichž jsou blíže představeny konkrétně použité metody a jejich zastupující systémy. Prvním blíže popsaným zástupcem je optický MoCap systém Qualisys, na jehož základě byla během prováděného manévru snímána poloha a trajektorie kvadrokoptéry, ze které byla dále dopočtena rychlost a zrychlení v prostoru indoorové laboratoře fakulty tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy. Dalším představeným MoCap systémem použitým k získání polohy, orientace v prostoru a letových charakteristik je inerciální systém zabudovaný v sensorickém vybavení samotného bezpilotního letadla v podobě digitálních senzorů, integrovaných do řídicí jednotky Pixhawk, která byla dále v rámci konceptu rozšířena o Pitotovu trubici, měřící rychlost kontinuálního proudění vzduchu. Za účelem dosažení větších přesností, porovnání výstupních hodnot z více nezávislých systémů a dostatečné duplikaci dat, byl koncept rozšířen o externí inerciální MoCap systém Inertia ProMove.

MoCap Systémy snímaným bezpilotním letadlem byla kvadrokoptéra Iris+ společnosti 3DRobotics. Podrobněji je představena v samostatné podkapitole, kde je popsána její struktura, technické specifikace, finální sensorické vybavení a zvolené hardwarové či softwarové komponenty, mezi které patří například zvolený palubní počítač Odroid C2, zajišťující komunikaci mezi stolním počítačem uživatele a řídicí jednotkou Pixhawk, prostřednictvím softwarového nástroje a experimentální platformy pro vývoj robotiky ROSu, který dále úzce souvisí s časovou synchronizací všech použitých MoCap systému, z důvodu následného zpracování výstupních hodnot.

V neposlední řadě je v kapitole představen průmyslový ventilátor, díky kterému je možné v indoorovém prostředí laboratoře měřit letové charakteristiky ve stálé poloze, tedy v průběhu visení kvadrokoptéry. Vytvořením modelových podmínek, simulujících reálné outdoorové prostředí a reálné manévry. Výběr manévru a využití experimentálních metod aerodynamických tunelů navazuje na poslední segment teoretické části práce, návrhu testovacího zařízení, kde jsou shrnuty jednotlivé úlohy a funkce dílčích komponentů navazujících na metodiku snímání, nahrávání a zpracování dat.

## 2.1 Motion Capture

MoCap je pojem čítající rozsáhlou oblast systémů, které jsou určeny k zaznamenání pohybu, pohybových charakteristik, polohy a orientace reálných objektů v prostoru. A k následnému přenesení nasnímaných hodnot a dat do obrazu digitálního modelu, který umožňuje zpětnou rekonstrukci. Tato digitální projekce, tak dále bude sloužit k vědecké analýze a lepšímu porozumění v různých vědních oborech, zahrnujících oblast robotiky, biomedicínské inženýrství, strojírenství a vojenství. Svě opodstatnění tato metoda nachází i v okruhu zábavního průmyslu současné kinematografie, videoher a v okruhu sportu.

Podle způsobu snímání objektů a použité technologie se tyto systémy dále dělí na optické, optoelektrické, magnetické, mechanické a inerciální. Jelikož však ne všechny výše zmíněné technologie byly implementovány v konceptu testovacího zařízení, nejsou tak předmětem této práce a byl jim věnován pouze stručný popis k základnímu představení. [29]

### Optické

- Optický systém je blíže představen a velmi podrobně vysvětlen na konkrétním příkladu v konceptu použitém systému Qualisys, tato technologie patří mezi nejpřesnější MoCap systémy současnosti a je aplikována ve všech možných oblastech od zábavního průmyslu po komplexní robotiku či biomedicínské inženýrství, avšak zároveň patří mezi systémy cenově nejnákladnější.

### Optoelektrické

- Princip systému je založen na deformaci optického vlákna, ve kterém dochází ke změnám světelnosti. Typickým příkladem využití je datová rukavice, snímající jemnou motoriku ruky a prstů.

### Magnetické

- Systém snímá pohyb na základě měnící se indukce napětí v závislosti na vzájemné orientaci vysílače vůči přijímači, která generují elektromagnetická pole pomocí tří cívek, svírajících úhel 120°. Magnetické systémy jsou starší a levnější obdobou systému optických. Snímání však komplikuje kabeláž vedená ke snímanému objektu a nutnost odstínění okolních prostor, kvůli rušení elektromagnetického pole systému.

## **Mechanické**

- Výhradně slouží ke snímání pohybů postav. Typickým příkladem je robotický exoskelet, pohyby snímající pomocí odchylek gyroskopů, akcelerometru, změn napětí, odporu při ohybu či krutu a stlačení torza.

## **Inerciální**

- Metoda získání pohybových charakteristik využívá řadu senzorů, nejčastěji mezi ně patří gyroskopy, akcelerometry, barometry a magnetometry. K určení polohy a orientace v prostoru je však vždy nutné znát počáteční polohu objektu vůči souřadnému systému. Tyto systémy využívají známých fyzikálních principů a matematických metod v podobě integrací a derivací hodnot k dopočítání dalších dat. Patří mezi nejrozšířenější MoCap systémy, které tvoří stavební kámen navigačním systémům bezpilotních letadel. Tento druh systému je představen a popsán na dvou konkrétních příkladech v podobě řídicí jednotky Pixhawk a systému Inertia ProMove. [30] [29]

Každá ze zmíněných technologií má určité přednosti, které se hodí v určitých případech snímání pohybů objektů a jejich pohybových charakteristik. Na základě těchto vlastností bylo ke zkoumání letových charakteristik bezpilotního letadla, kvadrokoptéry Iris+ v indoorovém prostředí užito dvou technologií, reprezentovaných třemi na sobě vzájemně nezávislými systémy. Byl použit polohový optický MoCap systém Qualisys, kterým disponuje Fakulta tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy, dále jen FTVS. Inerciální MoCap systém v podobě řídicí jednotky Pixhawk a externí inerciální MoCap systém Inertia ProMove nezávisle duplikující hodnoty tohoto sensorického vybavení. Testování za pomoci těchto systémů bylo vybráno z důvodu vysokých kvalit měření, vysoké poskytované přesnosti, a především možnosti získání požadovaných redundancí k duplikaci dat.

## **2.2 Qualisys**

Optický systém Qualisys výzkumné laboratoře FTVS, využívá ke snímání objektu dvanáct vysokorychlostních infračervených kamer s rozlišením 12 MP a s variabilní snímkovací frekvencí do 10 000 Hz (Obr. 11). Kamery byly rozmístěny v prostoru v přesně kalibrovaných a synchronizovaných pozicích tak, aby v ideálním případě pokrýval jejich zorný úhel celý prostor pohybu snímaného objektu. Rozestavení a natočení kamer je tedy variabilní a záleží na požadované velikosti zorného pole snímaného prostoru a vlastnostech snímaných objektů. [31]



**Obrázek 11 - Kamera systému Qualisys [31]**

V navrženém konceptu snímaly kamery bezpilotní letadlo na základě šesti lesklých referenčních značek, označovaných jako markery, umístěných na těle kvadrokoptéry. Tyto markery mají podobu kuliček různých rozměrů a jsou potaženy hladkým reflexním materiálem, který odráží infračervené světlo zpět do objektivu kamery (Obr. 12). Důležitým aspektem přesného snímání je ideální rozmístění markerů a kamer. V obou případech tento aspekt snižuje počet nežádoucích vzájemných překrytí či úplných ztrát markerů. Dojde-li k překrytí či vizuální ztrátě markeru v určitém časovém úseku snímání, musí systém polohu objektu dopočítat. Pokud se jedná o delší časový úsek, musí dojít k zpětné manuální rekonstrukci pomocí softwarového nástroje Qualisys Track Manageru, dále jen QTM.



**Obrázek 12 - Markery [31]**

Digitální model zachycené trajektorie letu kvadrokoptéry Iris+ v reálném čase, vytvořil optický systém za pomoci metod triangulace. Dopočítal průřezy kamer a vzájemné vzdálenosti za pomoci přesně kalibrovaných pozic kamer a známých úhlů. Čím více kamer snímá v danou chvíli jeden marker, tím větší přesnosti je systém schopen dosáhnout a zároveň se zmenšuje pravděpodobnost jeho ztráty či překrytí. Tento aspekt měření dále ovlivňují i takzvané falešné markery, které vznikají v průběhu měření odrazem světla od okolních objektů například při větší intenzitě světla. Optický systém Qualisys je schopný snímat objekty v několika režimech,



ke snímání objektu ve všech šesti stupních volnosti, tedy posunů a rotací podél hlavních os X, Y a Z, je nutné definovat rovinu objektu minimálně třemi markery. Při snímání v tomto režimu je systém také schopný pomocí matematické metody integrací per partes dopočítat z trajektorie zrychlení ve všech třech rovinách souřadného systému objektu.

Výhodou systému Qualisys je především vysoká frekvence snímání objektu, schopná zachytit přesný a plynulý pohyb i při složitých manévrech a vysokých rychlostech. Dále systém svými markery neomezuje v pohybu a je tak možné snímat jakékoliv objekty, jako například bezpilotní letadla. Nevýhodou systému Qualisys je pak prostorové omezení na danou laboratoř či dané rozestavení kamer. Dále při snímání dochází k občasnému překrytí jednotlivých markerů, či nežádoucím odrazům světla od jiných předmětů při vyšší intenzitě světla, a vzniká tak šum nepřesných hodnot, které je k vytvoření dané trajektorie pohybu nutné manuálně dočišťovat. [32] [33]

MoCap systém Qualisys má řadu vlastností, jenž ovlivňují výzkum této práce. Patří mezi ně přesnost, latence, rozptyl a obnovovací frekvence. A v neposlední řadě schopnost zpracování dat ve stejném čase se snímáním objektu nebo po ukončení snímání.

- **Přesnost**

Hodnota maximální možné chyby či odchylky, která může při snímání objektu nastat. Nepatří mezi konstantní hodnoty, ale mezi proměnné ovlivňované velkým množstvím aspektů, například okolním prostředím, samotnou složitostí pohybu či vzdáleností objektu od systému.

- **Latence**

Zpoždění mezi změnou polohy snímaného objektu a schopností systému tuto změnu zaznamenat. Tato vlastnost hraje velkou roli u snímání objektů v reálném čase, kde je zpoždění nežádoucí.

- **Rozptyl**

Znázorňuje hodnotu měnící se velikosti odchylek snímaného objektu v klidovém stavu, která následně narušuje plynulost měřeného pohybu. Projevuje se jako nežádoucí šum v naměřených datech.

- **Obnovovací frekvence**

Jedná se o schopnost systému zaznamenat určitý počet snímků objektu v čase. Veličina se udává v Hz, které přesně odpovídají počtu snímků za jednu sekundu. Čím je tato hodnota větší, tím plynuleji je systém schopen snímat pohyb objektu, ale zároveň je omezen na menší zorné pole kamer.

- **On-line režim/Off-line režim**

Systém je schopný snímat objekty a vytvářet jejich digitální projekci v reálném čase s nepatrnou odezvou, kde může uživatel pozorovat celý průběh snímání objektu. V opačném případě systém nejprve nasnímá objekt, v dalším kroku data uloží, zpracuje a až následně rekonstruuje jeho digitální projekci. [34]

### 2.3 Inertia ProMove

Inerciální MoCap systém Inertia ProMove je vybaven kompletní sadou digitálních senzorů, uživatelům poskytující výstupní data o 10 stupních volnosti, zahrnující akceleraci, úhlovou rychlost, intenzitu magnetického pole, gravitační zrychlení a barometrický tlak. Uživatelům je také k dispozici poloha a orientace objektu v prostoru reprezentovaná matematickými souřadnicemi ve formě kvaternionů. Systém byl vybrán na základě předností, vysoké poskytované přesnosti, vhodné při měření letových charakteristik (Tabulka 1).

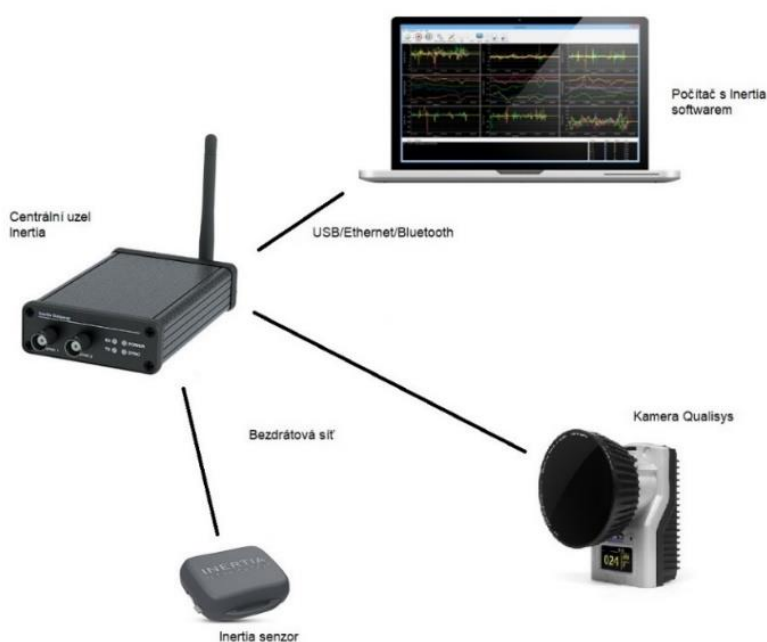
**Tabulka 1 - Parametry senzorů užitých při duplikaci dat**

	<b>Tříosý akcelerometr</b>	<b>Tříosý gyroskop</b>	<b>Barometr</b>
<b>Měřicí rozsah</b>	volitelný: $\pm 2$ , $\pm 4$ , $\pm 8$ , $\pm 16$ g	volitelný: $\pm 250$ , $\pm 500$ , $\pm 1000$ , $\pm 2000$ °/s	260 - 1260 hPa
<b>Přesnost</b>	62 $\mu$ g po $\pm 2$ g	0.007 °/s po $\pm 250$ °/s	0.02 Pa
<b>Vzorkovací frekvence (Hz)</b>	1000	1000	25

Naměřená výstupní data mohou být přenášena vysokorychlostní bezdrátovou sítí do centrálního uzlu, připojenému k počítači pomocí USB nebo Ethernetu. Další možností je přímá

komunikace s počítačem prostřednictvím Bluetooth. Tyto způsoby umožňují vizualizaci dat v reálném čase. Data mohou být také uložena na palubní microSD kartu a načtena později (Obr. 13).

Další předností systému je možnost synchronizace s námi použitým optickým MoCap systémem Qualisys, přes bezdrátovou síť. Což umožňuje porovnání měření ze dvou zdrojů v reálném čase a zpětnou rekonstrukci a zpracování dat v Matlabu. [35]



Obrázek 13 – Varianty spojení systému s počítačem

## 2.4 Iris+

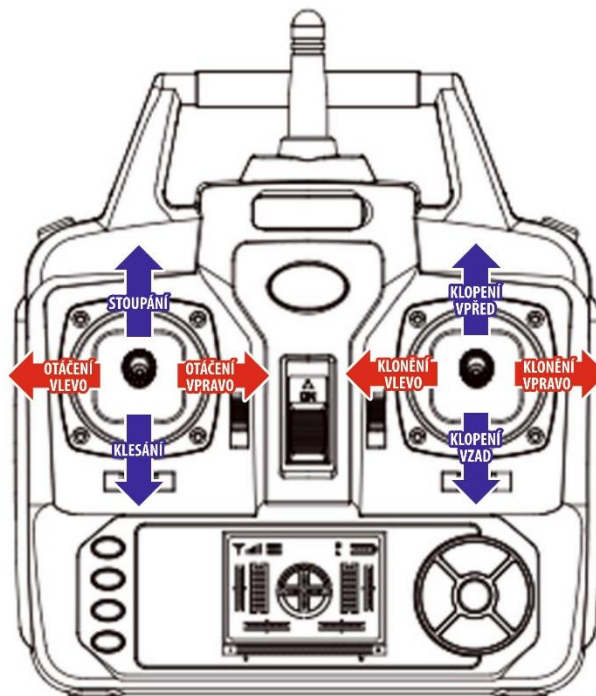
Iris+ je kvadrokoptéra vyvinutá společností 3DRobotics v Kalifornii (Obr. 14). Tato kvadrokoptéra byla vybrána a použita při návrhu konceptu testovacího zařízení letových charakteristik, neboť je postavena na open-source hardwaru, softwaru a firmwaru, umožňující uživateli volbu vhodných komponentů a následné vlastní naprogramování usnadňující samotné testování.



Obrázek 14 – Kvadroptéra IRIS+ od společnosti 3DRobotics [36]

### 2.4.1 Kontrola letu

Manuálně řízený let pilotem je ovládán pomocí dálkového ovladače 3DRobotics, který disponuje volitelnými módy nastavení, dle požadavků pilota. Hlavními ovládacími prvky manuálně řízených letů jsou dvě páčky odpovídající klopení, klonění a zatáčení. V průběhu experimentu byl ovladač nastaven v následující konfiguraci (Obr. 15).

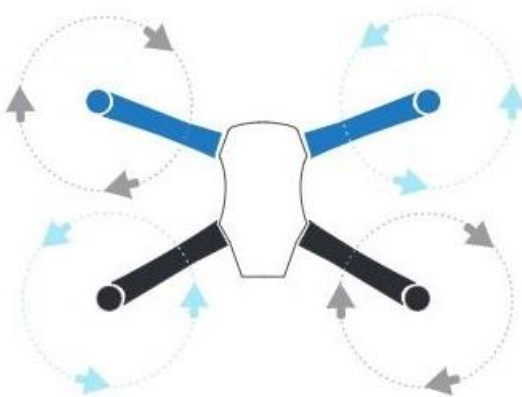


Obrázek 15 – Mód ovladače

## 2.4.2 Hardware a technické specifikace

Základním stavebním prvkem tvořícím kvadrokoptéru je čtyřramenný rám ve tvaru X na konci osazený čtyřmi elektromotory o výkonu 920 kV, vzájemná rozteč mezi protilehlými motory činí 550 mm. Každá ze hřídelí elektromotorů je osazena samoutahovací dvoulistou vrtulí o rozměrech 9,5 x 4,5 palce, tedy o průměru 241,3 mm a stoupání 114,3 mm. Stoupání je hodnota udávající schopnost vrtule posunout se při zavrtání se do vzduchu během jedné otočky.

Dvě protichůdné vrtule rotují po směru hodinových ručiček a dvě v protisměru hodinových ručiček, z důvodu vyrovnaní přirozeně vznikajícího momentu při rotaci vrtulí a zajištění stability celé kvadrokoptéry (Obr. 16).



Obrázek 16 – Směr rotace vrtulí [36]

Celková hmotnost kvadrokoptéry i s baterií je 1282 g a udávaná maximální vzletová hmotnost tedy nosnost je o dalších 400 g vyšší. Plně dostačující v případě potřeby umístění dalšího externího zařízení, jakým je například kamera, pro kterou byla kvadrokoptéra původně navržena. V průběhu testování však byla namísto kamery tato nosnost využita pro externí sensorické vybavení v podobě Inerciálního MoCap systém Inertia ProMove a palubního počítače Odroid C2.

Kapacita plně nabitého lithium-polymerového akumulátoru je 5100 mAh, umožňující dobu letu 16 až 22 minut, v závislosti na povětrnostních podmínkách, režimech letu, prováděných manévrech a v neposlední řadě na schopnostech samotného pilota.

V případě manuálně řízených letů je součástí vybavení kvadrokoptéry telemetrické rádiové dálkové ovládání s dosahem až 1 km v závislosti na členitosti terénu a rušení signálu odrazy

od okolního prostředí. Výrobce stanoví letová omezení však kvadrokoptěře umožní přístup pouze do 100 m výšky od hladiny vzletu a vzdálenosti se do vzdálenosti v okruhu 300 m.

Při outdoorových letech a dostatečném příjmu signálu GPS je kvadrokoptěra schopna setrvávat při manévru visení ve stálé poloze, autonomního letu po pilotem vytyčených bodech a návratu do původního bodu vzletu. [36]

### 2.4.3 Senzorické vybavení

Rozhodujícím zvoleným komponentem kvadrokoptéry je open-source řídicí jednotka Pixhawk ve verzi 2.4.8 (Obr. 17), která je vhodná k implementaci v celé řadě robotických platform, čítající pozemní vozidla, plavidla a různé druhy bezpilotních letadel od modelů letadel zahrnujících samokřídla, vrtulníky až po zmíněné kvadrokoptéry.



Obrázek 17 – Řídicí jednotka Pixhawk 2.4.8 [37]

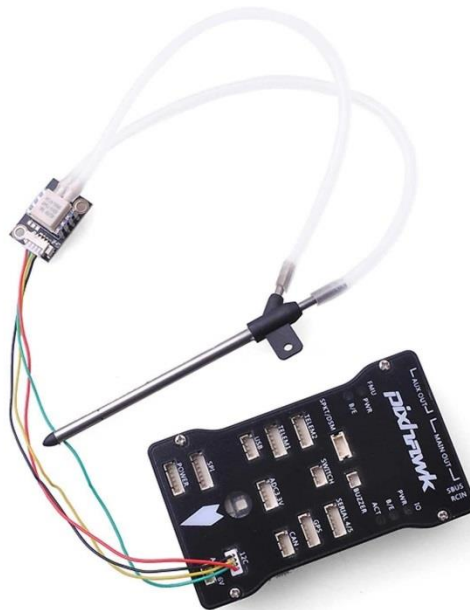
Odůvodněním výběru této řídicí jednotky je v první řadě vlastnost open-source hardwaru, který umožňuje rozšíření senzorického vybavení podle požadavků a open-source softwaru umožňující výběr ideálního firmwaru vyvinutého a vhodného k účelům indoorového létání, jakým je v našem případě firmware QGroundControl. [38]

Dále nám tato řídicí jednotka umožňuje senzorické vybavení rozšířit o námi vybraný palubní počítač Odroid C2, využitím výstupu/vstupu USB. Šesti pinové telemetrické výstupy/vstupy řídicí jednotky umožňují připojení radiové sady 3DR (Obr. 18), pracující v pásmu 915 MHz, zajišťující komunikaci mezi kvadrokoptérou a pozemní stanicí či ovladačem pilota prostřednictvím datového toku jednoduchých zpráv MAVLink protokolu. [39]



Obrázek 18 – Radiová sada 3DR [39]

Výstup/vstup I2C pak umožňuje připojení důležitého digitálního senzoru v zastoupení Pitotovy trubice Powerday PITOT 4525DO (Obr. 19), poskytující výstupní hodnoty rychlosti proudění vstupující tekutiny do plně dostačujících 100 m/s. [40]



Obrázek 19 – Pitotova trubice připojená k řídicí jednotce [40]

Řídicí jednotka také nabízí možnost rozšíření o další sensorické vybavení, například o GPS a kompas, které však postrádají při indoorových letech významu.

Dalším komponentem sensorického vybavení je napájecí modul APM Power Module V1.0 XT60 (Obr. 20), připojený k výstup/vstupu napájení, zajišťující funkci stabilní dodávky elektrického napětí z akumulátoru veškerým dílčím komponentům kvadrokoptéry od elektromotorů po zbylé sensorické vybavení. Současně informuje řídicí jednotku o stávající kapacitě akumulátoru, ze které jednotka dopočítává odhadovanou dobu zbývajících času letu, o které informuje pilota. [41]



Obrázek 20 – Napájecí modul [41]

Řídicí jednotka se již v tovární podobě skládá z řady integrovaných senzorů, kterými jsou tříosý gyroskop, tříosý akcelerometr, magnetometr a barometr. Tvoří samostatný inerciální systém kvadrokoptéry, sloužící ke stabilizaci a letům v prostředí bez signálu GPS, jakým je indoorové prostředí. [37]

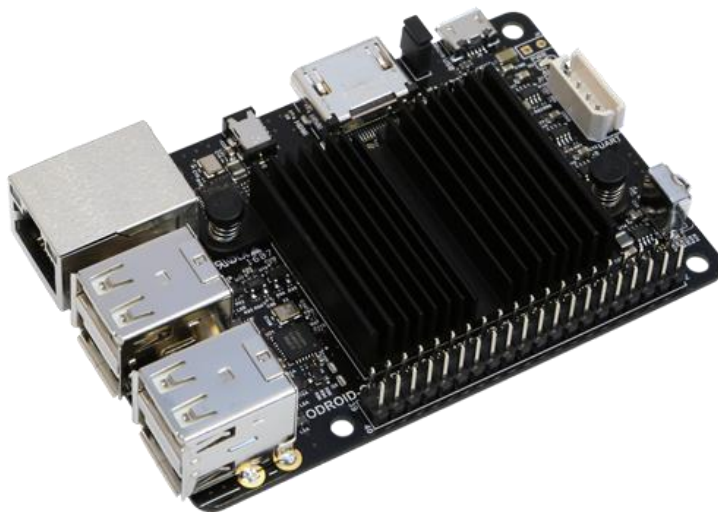
## 2.5 Odroid C2

Je cenově dostupný, výkonný jednodeskový mini počítač, vhodný pro vývoj nového softwarového zařízení (Obr. 21). O jeho výkon se stará 64bitový čtyřjádrový procesor ARM Cortex-A53 s taktom 1,5 GHz, grafický procesor ARM Mali-450 tvořený třemi jádry s taktovací frekvencí 700 MHz a 32bitová operační paměť 2 GB DDR3 o frekvenci 912 MHz. V tomto případě není výkon počítače na úkor velikosti a hmotnosti, a Odroid C2 si zachová miniaturní rozměry 85 x 56 x 18 mm a nepatrnou váhu 40 g. Díky těmto vlastnostem byl bez problému integrován do rámu kvadrokoptéry Iris+, aniž by překročil její nosnost a negativně tak ovlivnil její letové vlastnosti. [42] Kromě vysokého výkonu a malých rozměrů je další silnou stránkou tohoto počítače podpora open-source operačních systémů společnosti Linux, jedním ze známých zástupců je například Android. Tato klíčová vlastnost zajišťuje kompatibilitu mezi jednotlivými komponenty námi navrženého testovacího zařízení. Komunikace mezi



komponenty je umožněna prostřednictvím přímého spojení pinů, výstupních/vstupních portů nebo až gigabitovým Ethernetem či pomocí bezdrátové sítě Wi-Fi po instalaci USB síťové karty. Odroid C2 dále nabízí uložení výstupních dat na externí microSD kartu. [43]

Na základě výše zmíněných přednosti a kvalit byl Odroid C2 vybrán jako palubní počítač kvadrokoptéry Iris+. Jeho primárním úkolem je zprostředkovat komunikaci mezi řídicí jednotkou Pixhawk a stolním počítačem uživatele s operačním systémem Linux. Z důvodu následného nahrání výstupních hodnot senzorů řídicí jednotky Pixhawk vývojovým softwarem ROS.



Obrázek 21 – Palubní počítač Odroid C2 [43]

## 2.6 Robotic Operating system

Definovat Robotic Operating System, neboli ROS není jednoduché a ne vždy jsou všechny definice plně vystihující a srozumitelné. Často se setkáváme s formulacemi, kdy je ROS brán jako operační systém, middleware a framework či je označován jako ekosystém. Ve skutečnosti se však jedná o kombinaci těchto pojmů, kdy ROS není plnohodnotným operačním systémem, jelikož není zcela soběstačný a jeho funkce jsou závislé na jiných operačních systémech, jakými jsou například Linux, Windows či MacOS. Z nichž je plně podporován pouze operačním systémem Ubuntu od společnosti Linux, ostatní operační systémy mohou mít problém s kompatibilitou v závislosti na jednotlivých verzích nebo doposud nejsou podporovány. Za middleware a framework je ROS označován, neboť jeho hlavní úlohou je zprostředkovávat komunikaci a předávat zprávy mezi jednotlivými programy, a tak ulehčit a podpořit programování a vývoj nového robotického softwaru. Zároveň je ROS tvořen neustále rostoucí komunitou, pravidelně přispívající novými programy s open-source

zdrojovým kódem a neomezenou licenci, umožňující volné šíření. Lze jej také demonstrovat jako ekosystém, jenž je díky své oblibě a přístupnosti tvořen celosvětovou komunitou, čítající známé univerzity, firmy i jednotlivce. Hlavní myšlenkou je tedy podpořit vývoj robotiky a vývojáře, kteří nemusí každý projekt vytvářet a programovat od úplného začátku, ale mohou využít již hotový celek, či část programu vytvořeného jinými uživateli. [44] [45] [46]

Základním principem ROSu je provoz velkého množství paralelních procesů, které mezi sebou komunikují a vzájemně sdílí data. Tento koncept se nazývá ROS Computation Graph, jehož struktura se skládá z menších dílčích částí, Nodes, Master, Messages, Services, Topics a Bags (Obr. 22).

- **Uzel (node)**

Uzly představují jednotlivé procesy a jsou nejmenší částí celku, lze je uvést jako účelové programy s konkrétní funkcí. Na jednoduchém případě můžeme říci, že uzel řídí otáčky motorů, další uzel může zpracovávat data ze senzorů, či například monitorovat stav baterie. Uzel tedy přímo představuje zdrojový kód psaný v programovacím jazyce C++, Python nebo Lisp. Uzly jsou dále slučovány do takzvaných balíčků, které tvoří atomární celek, který může být uživatelem publikován a ostatními využit.

- **Master**

Využívá principu Master/Slave, kdy zpravuje a zprostředkovává komunikaci mezi jednotlivými uzly, které jsou jmenovitě registrovány, aby se dokázaly vzájemně ve struktuře najít a předávat si zprávy. Zároveň všechny uzly informuje o případných změnách struktury, jakou může být například přidání nového uzlu, tudíž zaručuje dynamiku systému.

- **Zpráva (message)**

Jak je výše zmíněno uzly vzájemně komunikují zasíláním zpráv, které představují jednoduchou datovou strukturu, skládající se z řetězce znaků, reálných čísel, čísel s plovoucí řadovou čárkou, algebraických zápisů i logických funkcí. Na konkrétním příkladě může být zpráva představena jako hodnota informující o otáčkách motoru, procentech současného stavu akumulátoru, či jako hodnota udávající přehled o výstupních datech senzorů.

- **Téma (topic)**

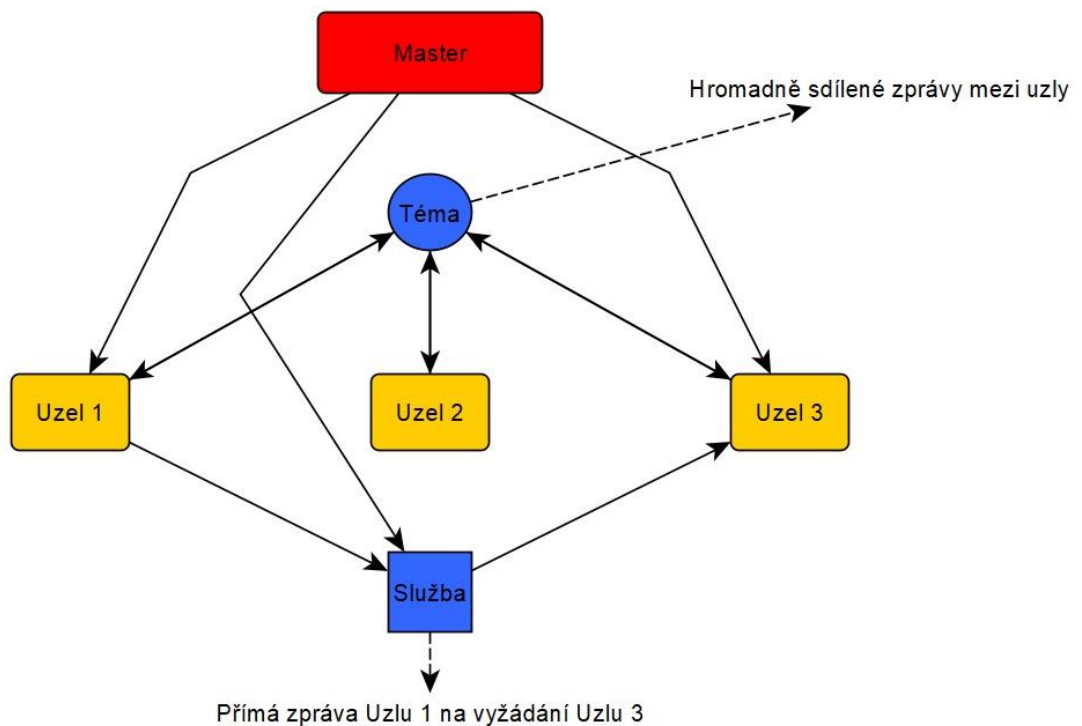
Slouží k identifikaci zasílaných zpráv podle daného názvu či struktury, na základě přiděleného tématu dokáže daný uzel data odesílat či naopak přijímat ta data, o která má zájem. Uzly se tedy dělí na takzvané odesílatele a přijímače, kdy není limitován počet, a může tak existovat více odesílatelů a přijímačů pro jedno téma.

- **Služba (service)**

Jedná se o podobný nástroj jako výše zmíněné téma, má také stejnou funkci identifikace zpráv mezi uzly. Avšak se liší tím, že je zpráva zaslána až na její přímé vyžádání určitým uzlem, na kterou následně odpovídá jiný uzel poskytující žádanou zprávu.

- **Taška (bag)**

Jedná se o nástroj ROSu umožňující ukládání a zpětné nahrávání zasílaných dat prostřednictvím zpráv. Přináší tak možnost nahrání dat například z pozičních senzorů, uživatel má tak přístup k nasnímaným senzorickým hodnotám, se kterými může nadále pracovat. [47]



**Obrázek 22 – Schéma komunikační struktury ROSu**

Z výše uvedeného textu vyplývá, že ROS je velmi užitečný nástroj s širokou škálou využití, který se dá použít například při ovládání různých robotů od jednoduchých RC modelů po velmi komplikované a sofistikované chirurgické roboty asistující při složitých operacích vyžadujících přesnost. Existuje celá řada dalších možných implementací, které jsou omezeny pouze lidskou vynalézavostí.

Využití ROSu při návrhu testovacího zařízení letových charakteristik má tak své opodstatnění při synchronizaci jednotlivých MoCap systémů a nahrání různorodých hodnot. ROS nám umožňuje spuštění více paralelních procesů, a tak zajištění stejného časového intervalu měření. Na základě kterého je možné následné porovnání zaznamenaných polohových hodnot a letových charakteristik, s využitím programovacího nástroje Matlabu. [48]

## 2.7 Průmyslový ventilátor

Za účelem vytvoření letových charakteristik z hodnot palubních senzorů bezpilotního letadla a polohových systémů, zaznamenaných v průběhu vizení kvadrokoptéry v indoorovém prostoru bylo nutné namodelovat outdoorové prostředí s proměnnými podmínkami v podobě

vlastní imitace aerodynamického tunelu, ve kterém bylo možno kontrolovat a volit rychlost proudění umělého toku vzduchu. Z důvodu vysokých nákladů na výstavbu a použití vlastních financí byl k vytvoření napodobeniny nízkorychlostního aerodynamického tunelu využito běžně dostupný průmyslový ventilátor TRISTAR s variabilní rychlostí otáčení lopatek o průměru 40 cm.

Ventilátorem generovaný tok vzduchu bylo dále důležité usměrnit k zabránění vzniku nechtěných turbulencí, pomocí laminárního regulátoru, tvořeného několika navzájem na sobě nahuštěných vertikálně umístěných příček před ventilátorem (Obr. 23). Ventilátor byl umístěn ve výšce 1,5 m nad zemí, která odpovídala letové hladině v průběhu manuálně řízeného manévru.



Obrázek 23 – Ventilátor umístěný v laminárním regulátoru

## 2.8 Experimentální koncept

V této podkapitole je představen návrh a metodika experimentálního indoorového konceptu testovacího zařízení letových charakteristik bezpilotních letadel (Obr. 24). Bepilotním letadlem vybraným k testování byla kvadroptéra Iris+ od společnosti 3DRobotics, jejíž hlavní předností je možná selekce jednotlivých hardwarových komponentů a další vývoj softwaru zařízení, podle požadovaného záměru a účelu využití. V první řadě umožňuje integraci námi

zvoleného senzorického vybavení v podobě řídicí jednotky Pixhawk a Pitotovy trubice, výběr palubního počítače Odroid C2 a přidání externího inerciálního MoCap systému Inertia ProMove, zajišťujícího duplikaci měřených dat.

Další fází návrhu koncepčního zařízení v indoorových oblastech byla volba vhodného měřicího prostoru a prostředí splňující přísná kritéria a požadavky. Prvním kritériem byla vysoká přesnost měření z důvodu prostorových omezení, znemožňujících provádění složitých manévřů a dosažení potenciačních limitů kvadrokoptéry, jako je možné v případě outdoorových letů. Dalším nezanedbatelným požadavkem přímo ovlivňujícím volbu testovacího prostředí byla bezpečnost letu, kdy nesmělo dojít k ohrožení osob, zničení nákladného senzorického vybavení a zařízení společně s kvadrokoptérou. Na základě výše zmíněných požadavků, bylo vybráno indoorové prostředí laboratoře FTVS Univerzity Karlovy, disponující optickým MoCap systémem Qualisys a poskytující možnost namodelování uniformních podmínek při jednotlivých sériích testování.

S volbou indoorového prostředí laboratoře a jejími prostorovými omezeními úzce souvisel výběr prováděného manévru, který by i přes prostorová omezení dovolil měřit letové charakteristiky. Z těchto důvodů byl při manuálně řízeném letu prostřednictvím dálkového ovládání pilota prováděn manévr visení a kvadrokoptéra setrvala v klidovém stavu, vznášející se ve stanovené výšce nad zemí. Z testování byla vyloučena proměnná v podobě vždy plně nabitě baterie, která by v opačném případě měla vliv na výkon motorů a visení kvadrokoptéry, tudíž na velikost naměřených výchylek od původní polohy. Dále se při návrhu manévru postupně dostáváme k metodice experimentálního měření letových charakteristik využitím průmyslového ventilátoru.

Ke kompenzaci omezení indoorových prostor laboratoře vůči outdoorovým, zajištění rovnocenných modelových podmínek a dosažení snímání letových charakteristik v průběhu manévru visení, byla v uzavřeném prostoru laboratoře zkompletována napodobenina nízkorychlostního aerodynamického tunelu se stálým chodem, využitím průmyslového ventilátoru, produkujícího konstantní proud tekutiny, tedy vzduchu o předem známé rychlosti. Měření Pitotovou trubicí, umístěnou na rámu kvadrokoptéry a anemometrem orientovaným vůči proudění vzduchu. Metodika se opírá o známou zkušební metodu, kdy nezáleží, zda se těleso pohybuje vůči prostředí či naopak. Teoretické hypotézy byly ověřeny metodou pokusu, kdy působením aerodynamických sil na kvadrokoptéry vznikal odpor, jakožto jedna z hlavních vektorových složek vztlaku, přímo úměrná proporcím konstrukce. Velikost vznikajícího odporu je také ovlivněná rychlostí proudění vzduchu z důvodu rostoucího tření mezi tekutinou a kvadrokoptérou. V závislosti na rostoucí rychlosti proudu vzduchu a rostoucím odporu se následně výchylka od původní polohy visení zvětšuje a kvadrokoptéra musí vyvinout více

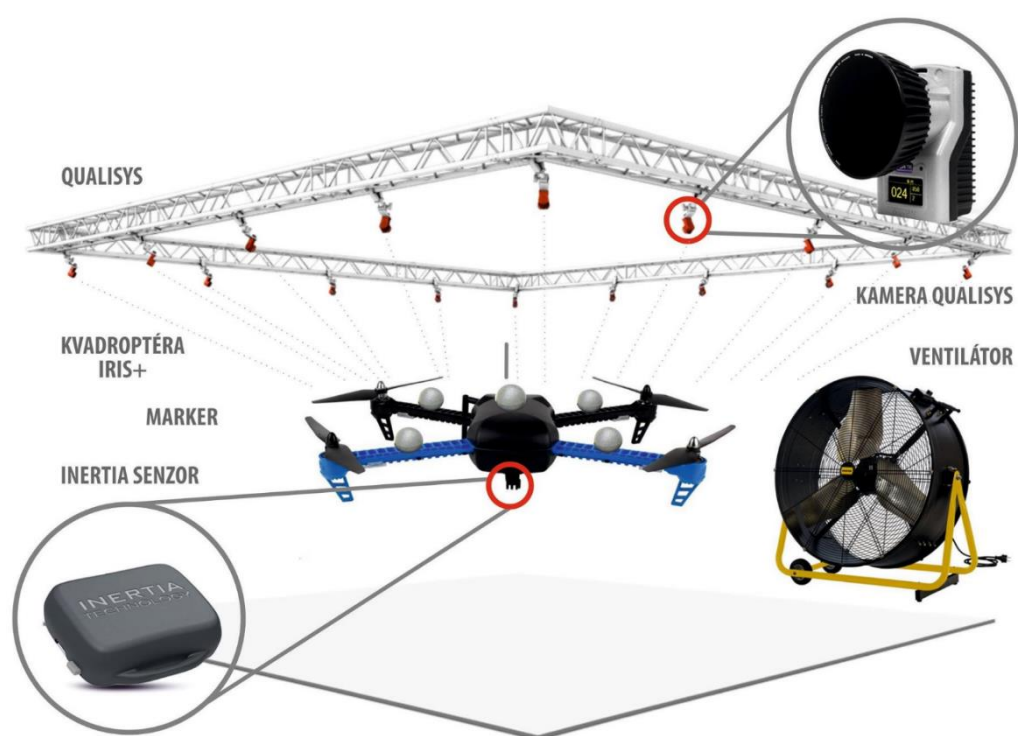
výkonu v podobě většího napětí elektromotorů, zvyšujících rychlost otáčení vrtulí a změnit úhel klonění oproti ventilátoru k setrvání ve stále poloze. [49] [11] Celkem tak bylo uskutečněno deset měření v časovém intervalu osmi minut, nejprve s nulovou počáteční rychlostí proudu vzduchu, která byla v určitém čase postupně zvyšována po třech rychlostních stupních.

Počátkem vzletu po konečné přistání byly v průběhu manévru visení kvadrokoptéry vůči ventilátoru laboratoře vyhodnocovány letové charakteristiky nezávislými polohovými MoCap systémy. Získané výstupní hodnoty řídicí jednotky Pixhawk byly reprezentovány úhlovou rychlostí, zrychlením ve všech třech osách X, Y a Z, polohou a orientací v rovině, letovou výškou a rychlostí ve vodorovné hladině. Ve stejném čase se kvadrokoptéra již nacházela v zorném poli snímajících kamer optického MoCap systému Qualisys a její trajektorie, byla zaznamenávána pomocí šesti, na základě velikosti vybraných markerů, umístěných na ramenech kvadrokoptéry v reálném čase ve formě souřadnic o šesti stupních volnosti, tedy posunů a rotací podél hlavních os X, Y a Z. Zároveň byla její poloha zaznamenávána referenčním MoCap systémem Inertia ProMove, umístěným v rámu kvadrokoptéry na pěnovém podkladu tlumícím vibrace přenášené konstrukcí kvadrokoptéry od rotujících vrtulí a tvořícím zpětnou vazbu naměřeným hodnotám oběma systémům ve formě souřadnic o deseti stupních volnosti, z nichž bylo k duplikaci využito polohových dat, úhlové rychlosti a zrychlení podél os souřadného systému předem synchronizovaného se souřadným systémem ostatních MoCap systémů.

Po úspěšném provedení dané série letů a jejich nasnímání, bylo dalším důležitým krokem při návrhu konceptu testovacího zařízení, nahrání všech naměřených výstupních veličin a polohových dat k následnému zpracování a porovnání výsledných hodnot jednotlivých MoCap systémů. K tomuto účelu byl využit vývojový software a experimentální operační systém ROS, disponující možností paralelního spuštění více procesů, umožňující zmíněné nahrání dat a synchronizaci jednotlivých MoCap systémů k možnosti zpětného porovnání dat. Díky zajištění stejných počátečních a konečných hodnot všech MoCap systémů, za pomoci předem vytvořených knihoven a nástrojů balíčku s názvem MavROS. Tedy balíčku, který zprostředkovává komunikaci mezi tématy ROSu, které si lze představit jako jednotlivé komponenty konceptu a zprávami MAVLink protokolu, zprávami sloužícími ke komunikaci s palubním počítačem kvadrokoptéry a pozemním ovladačem uživatele. [50] [51]

Získaná výstupní data byla dále převedena do Matlabu, který slouží k převedení rozdílných zápisů výstupních dat snímaných při rozdílných frekvencích do jednotné podoby tak, aby bylo možné duplikovaná data porovnat a vytvořit statistiku za pomoci Matlabu, kde slouží naměřené hodnoty jako prostředek k vytvoření letových charakteristik.

Díky použití více nezávislých systémů měření letových charakteristik, opakovanému měření, eliminaci nechtěných proměnných, využití různorodých MoCap technologií a vytvoření modelových podmínek prostřednictvím ventilátoru bylo dosaženo vysoké přesnosti. A prováděný manévr hover byl tak dostačující k vytvoření letových charakteristik, které bylo následně možné porovnat s testy prováděnými v outdoorovém prostředí. Při outdoorovém testování byl prováděn dopředný horizontální let z nulové počáteční rychlosti při visení do maximálního možné rychlosti kvadrokoptéry. V průběhu testu byla Pitotovou trubicí zaznamenána rychlost letu v závislosti na úhlu klonění zaznamenávaným systémem Inertia ProMove.



Obrázek 24 – Schéma testovacího konceptu

## 2.9 Nástroje použité ke zpracování a vizualizaci dat

K vytvoření statistiky a vizualizaci naměřených dat, bylo nutné výstupní hodnoty zpracovat. Ke zpracování byl využit Matlab a následující metody.

### 2.9.1 Převzorkování

Při porovnávání výstupních hodnot z více systémů s rozdílnou vzorkovací frekvencí je vždy nutné výstupní hodnoty převzorkovat a zajistit tak stejný počet porovnávaných vzorků.



Vzorkovací frekvenci můžeme zvyšovat či snižovat. Zvyšování vzorkovací frekvence se nazývá interpolace, při které se mezi sousední prvky vkládají další, tak aby výsledná vzorkovací frekvence odpovídala požadované. Při interpolaci, však dochází k zanesení chyby a snížení kvality dat. Snižování vzorkovací frekvence se nazývá decimace, při které se naopak počet prvků snižuje. Se snižováním vzorků se zároveň snižuje i přesnost měření. [52]

### 2.9.2 Korelace

Cílem korelační analýzy je určit vzájemnou lineární závislost dvou porovnávaných veličin. Tento vztah vyjadřuje korelační koeficient R, který nabývá hodnot v rozmezí uzavřeného intervalu od -1 do 1. Čím více jsou na sobě vzájemné veličiny lineárně závislé, tím více se korelační koeficient blíží -1 či 1. Záporný korelační koeficient vyjadřuje negativní lineární korelaci a kladný koeficient představuje kladou lineární korelaci. V případě, že se koeficient rovná nule, mezi proměnnými neexistuje lineární korelace. Existuje více metod a způsobů korelace v závislosti na porovnávaných veličinách. V této práci byla využita metoda Pearsonova korelačního koeficientu, která je definovaná vztahem (Obr. 25). [53] [54]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

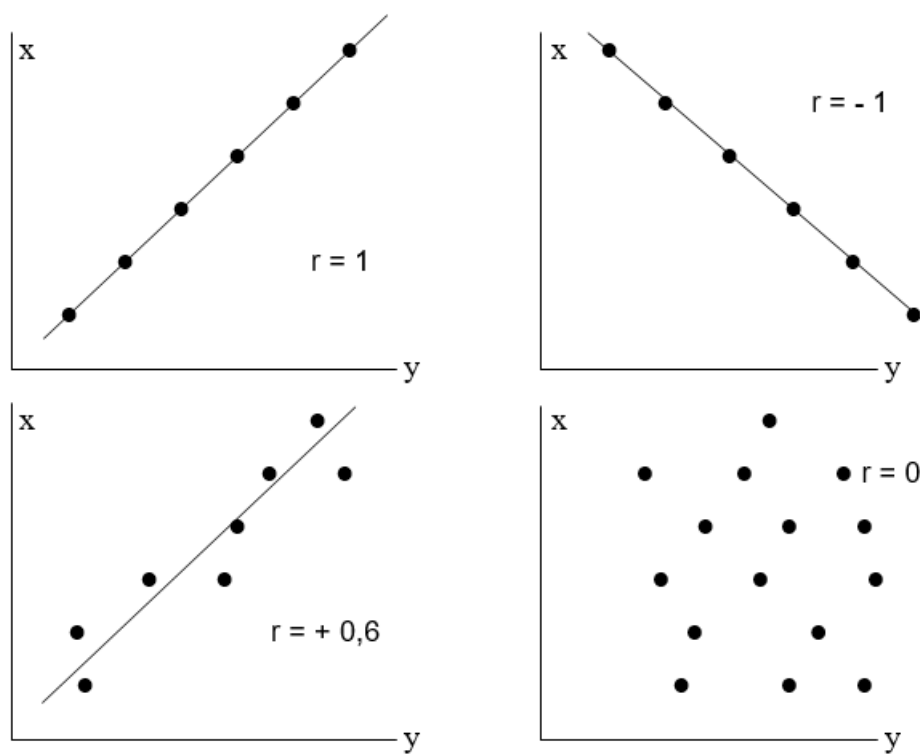
Obrázek 25 – Pearsonův korelační koeficient [53]

Čitatel vzorce tvoří suma z hodnoty výběru x a y a aritmetického průměr  $\bar{x}$  a  $\bar{y}$ . Jmenovatel následně tvoří odmocnina ze sumy směrodatných odchylek.

### 2.9.3 Regrese

Lineární regrese vyjadřuje lineární závislost porovnávaných velič podobně jako v případě korelace, s rozdílem, že dokážeme přesně určit, jaká veličina je závislá a jaká nikoliv. V podstatě nám vyjadřuje, která z veličin je proměnná a mění se v závislosti na druhé a která veličina se v závislosti na druhé nemění. K získání lineární regrese prokládáme bodovým grafem reprezentujícím zkoumané veličiny přímkou, kterou lze vytvořit například metodou nejmenších čtverců (Obr. 26). Metodu nejmenších čtverců lze uplatnit pouze v případě, kdy například díky korelaci víme, že mezi veličinami existuje lineární závislost. Samotnou závislost

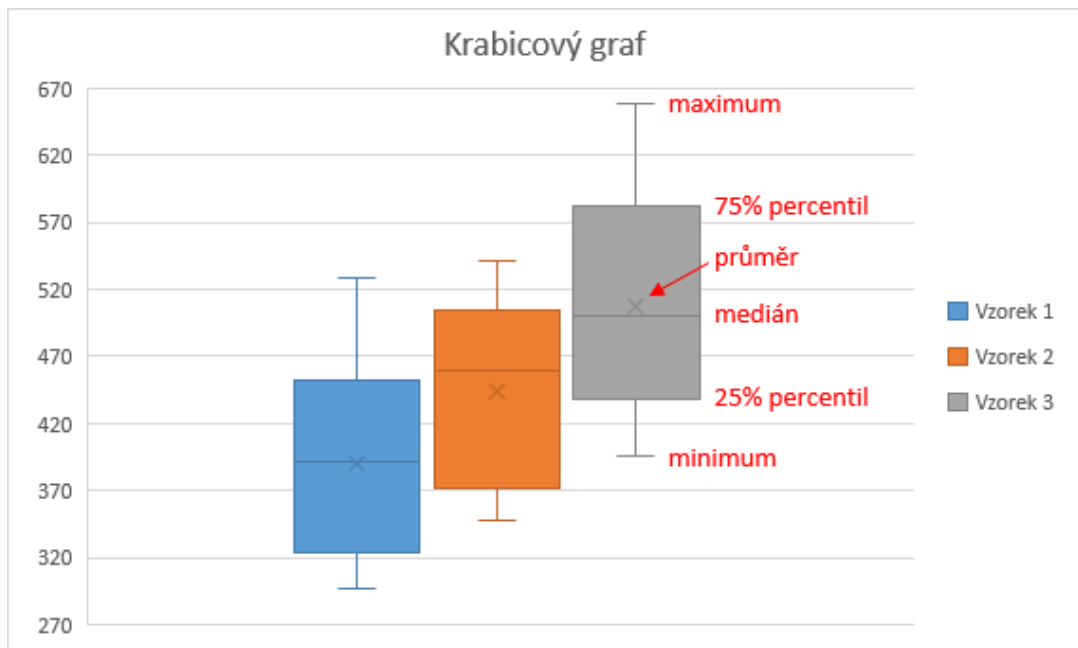
udává regresní koeficient, který určuje o kolik se změní závislá proměnná veličina, jestliže se o jednotku změní nezávislá veličina. [55] Způsobem vizualizace může být například bodový diagram (Obr. 26).



Obrázek 26 – Bodový diagram

#### 2.9.4 Krabicový graf

Při zpracování výstupních hodnot z různorodých pozičních systému pomocí Matlabu, byl k jejich vzájemnému porovnání a vytvoření statistiky použit Krabicový graf, jakožto vhodná metoda ke grafické vizualizaci velkého množství dat. Krabicový graf tvoří oddíly (krabice), které reprezentují jednotlivé vzorky dat z jednotlivých pozičních systémů. Počet oddílů se tedy rovná počtu porovnávaných vzorků dat. Oddíly krabicového grafu tvoří interval ohraničený horním a dolním kvartilem, horní kvartil představuje 75 % všech hodnot a dolní kvartil 25 % hodnot. Ve středu oddílu se nachází vyznačený medián, který symbolizuje 50 % dat a průměr vyznačený bodem. Dále z oddílu vystupují svislé osy, reprezentující rozptyl neboli maximální a minimální hodnotu konkrétního vzorku dat (Obr. 27). [56]



Obrázek 27 – Krabicový graf

### 3 Zpracování dat a statistika

K vzájemnému porovnání dat jednotlivých MoCap systému, bylo nejprve nutné rekonstruovat výstupní hodnoty a převést rozdílné zápisy do stejného formátu. Prvním krokem při rekonstrukci bylo vyčištění dat naměřených optickým MoCap systém Qualisys pomocí příslušného softwarového nástroje QTM, ve kterém byla označením příslušných markerů vytvořena pevná kostra kvadrokoptéry, která dále zjednodušovala rekonstrukci kvadrokoptérou opisované trajektorie. Pevnou kostru tvořily označené markery a uměle vytvořený virtuální bod, umístěný v počátku souřadného systému kostry kvadrokoptéry. K markerům tvořícím kostru kvadrokoptéry byly přiřazeny odpovídající trajektorie. V místech, kde došlo k vzájemnému překrytí markerů a jejich vizuální ztrátě, byla trajektorie dopočtena právě využitím roviny kostry vždy tvořené alespoň třemi viditelnými markery. Zbylé trajektorie vzniklé falešnými odrazy od lesklých povrchů byly vymazány a vyčištěná trajektorie letu kvadrokoptéry byla pomocí QTM exportována do prostředí Matlabu, kde byla její trajektorie reprezentována šesti stupni volnosti, připravená k porovnání s dalšími MoCap systémy. Výstupní hodnoty inerciálního MoCap systému Inertia ProMove a řídicí jednotky Pixhawk byly exportovány do sešitu excelu, ze kterého byly následně exportovány do Matlabu.

K vzájemnému porovnání výstupních hodnot v Matlabu, bylo prvním krokem vytvoření vektorů se stejným počtem prvků, jelikož každý systém snímal nezávisle na druhém s jinou snímkovací frekvencí. Například optický MoCap systém snímal polohu kvadrokoptéry při frekvenci 100 Hz a externí MoCap systém Inertia při frekvenci 200 Hz. Tohoto kroku bylo docíleno decimací jednotlivých hodnot na stejný počet prvků, tedy vynecháním každé druhé hodnoty v případě Inercie. Zároveň bylo ke vzájemnému porovnání dat nutné sjednocení počátečních prvků vektorů v čase. Tento krok měl ulehčit ROS, díky kterému měly jednotlivé systémy zaznamenávat synchronně se stejnou počáteční hodnotou. V průběhu měření však došlo k chybě, kdy se nepodařilo optický MoCap systém Qualisys prostřednictvím ROSu synchronizovat s ostatními systémy.

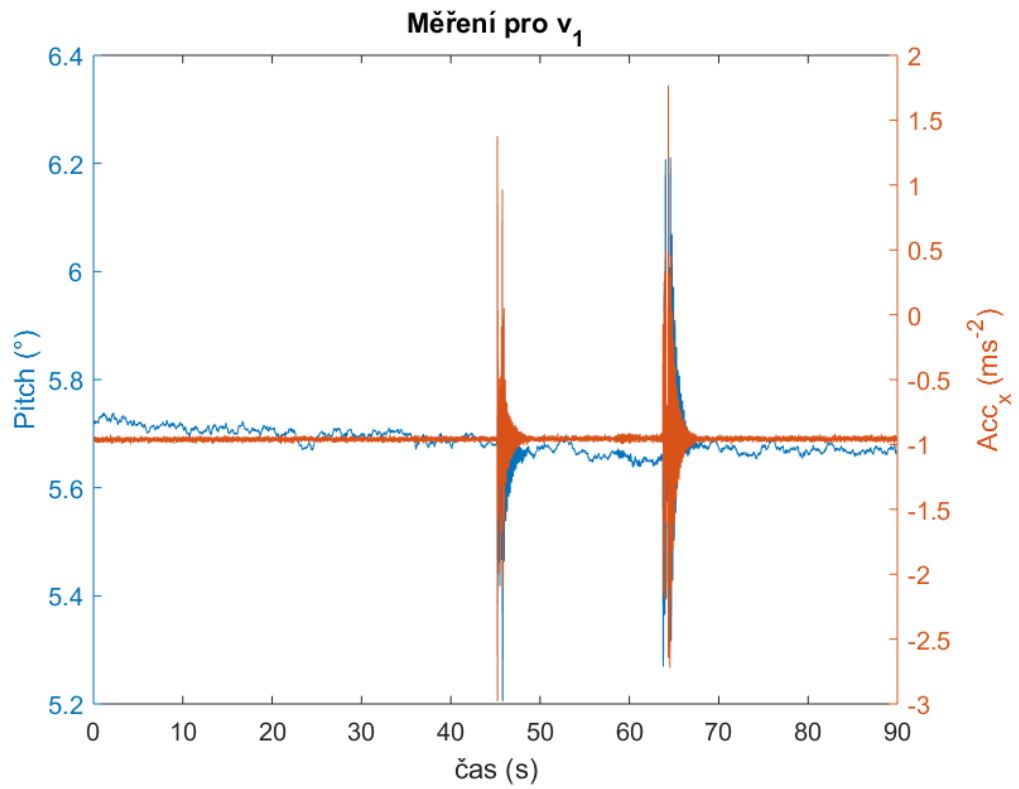
Po neúspěšné paralelní synchronizaci MoCap systému byla porovnána indoorová a outdoorová měření, zaznamenaná prostřednictvím externího MoCap systému Inertia ProMove. Z polohových dat, zapsaných v podobě kvaternionů byla vytvořena rotační matice, kde rotace okolo osy X odpovídaly úhlu klopení. Indoorová měření byla rozdělena do časových intervalů podle nastavené konstantní rychlosti ventilátoru. Celkem byla kvadrokoptéra v průběhu visení vystavena třem rychlostem proudu vzduchu, na základě kterých měnil pilot k udržení manévru visení úhel klopení kvadrokoptéry. Kvadrokoptéra byla vystavena proudu vzduchu o průměrné rychlosti  $v_1=1,44$  m/s,  $v_2=2,39$  m/s a  $v_3=3,41$  m/s. Rychlosti proudu vzduchu byly generované ventilátorem a měřené pomocí anemometru (Tabulka 2).

**Tabulka 2 - Naměřené rychlosti proudu vzduchu**

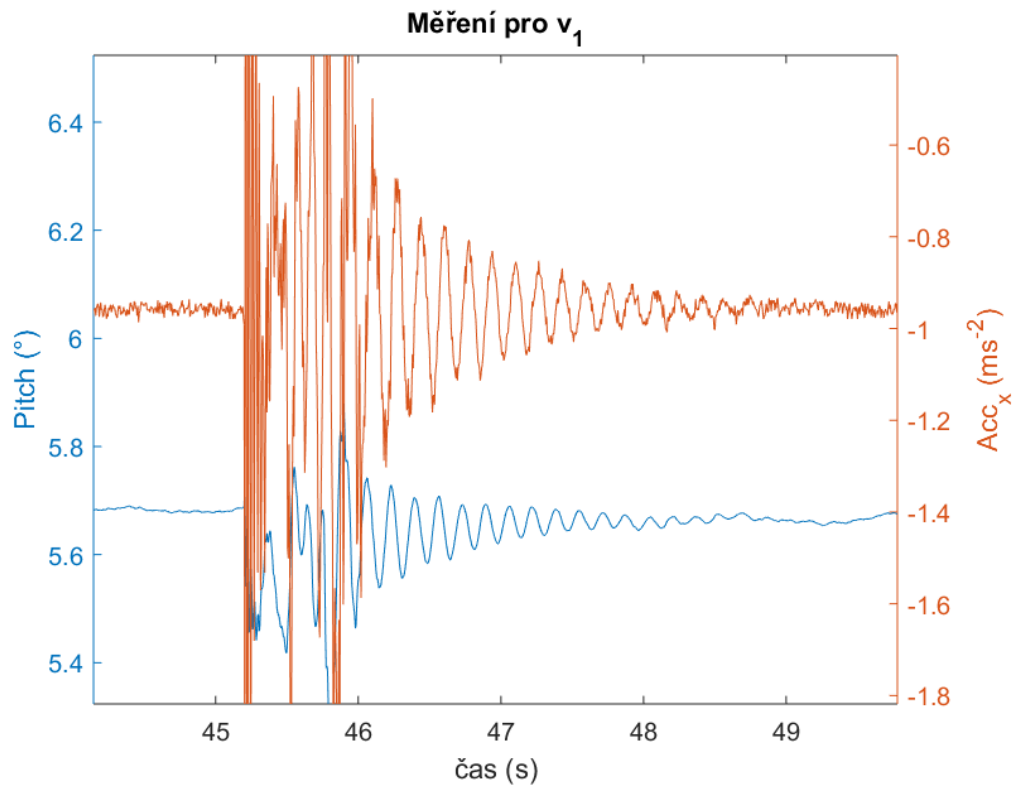
<b>Měření</b>	<b>Rychlost <math>v_1</math> (v m/s)</b>	<b>Rychlost <math>v_2</math> (v m/s)</b>	<b>Rychlost <math>v_3</math> (v m/s)</b>
1	1,36	2,54	3,1
2	1,44	2,36	3,21
3	1,43	2,44	3,41
4	1,5	2,29	3,32
5	1,51	2,3	3,26
6	1,49	2,22	3,54
7	1,37	2,51	3,6
8	1,39	2,57	3,47
9	1,37	2,33	3,66
10	1,56	2,31	3,51
<b>Průměr rychlostí</b>	1,44	2,39	3,41
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,07	0,12	0,18

Graf znázorňující měření při rychlostech proudění vzduchu  $v_1=1,44$  m/s, poukazuje na úsek měření v časovém rozmezí 90 s. Graf zobrazuje dvě v čase se měnící veličiny, zrychlení podél osy X a úhel klopení. V prvním úseku grafu pilot udržoval konstantní zrychlení. Další část grafu vykresluje dvě odchylky od střední hodnoty zrychlení a úhlu klopení (Graf 1). Tyto odchylky představují první dotek kvadrokoptéry s turbulentním poryvem proudu vzduchu, který se projevuje jako sinusový pohyb kvadrokoptéry. Detail grafu v čase 44 s až 50 s, dále blíže vykresluje jednu z odchylek zrychlení a úhlu klopení, jenž představují zpětnou reakci pilota na poryv v podobě kompenzačních pohybů (Graf 2). Medián úhlu klopení v průběhu měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_1=1,44$  m/s, odpovídal  $5,7^\circ$ .

**Graf 1 – Měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_1$**

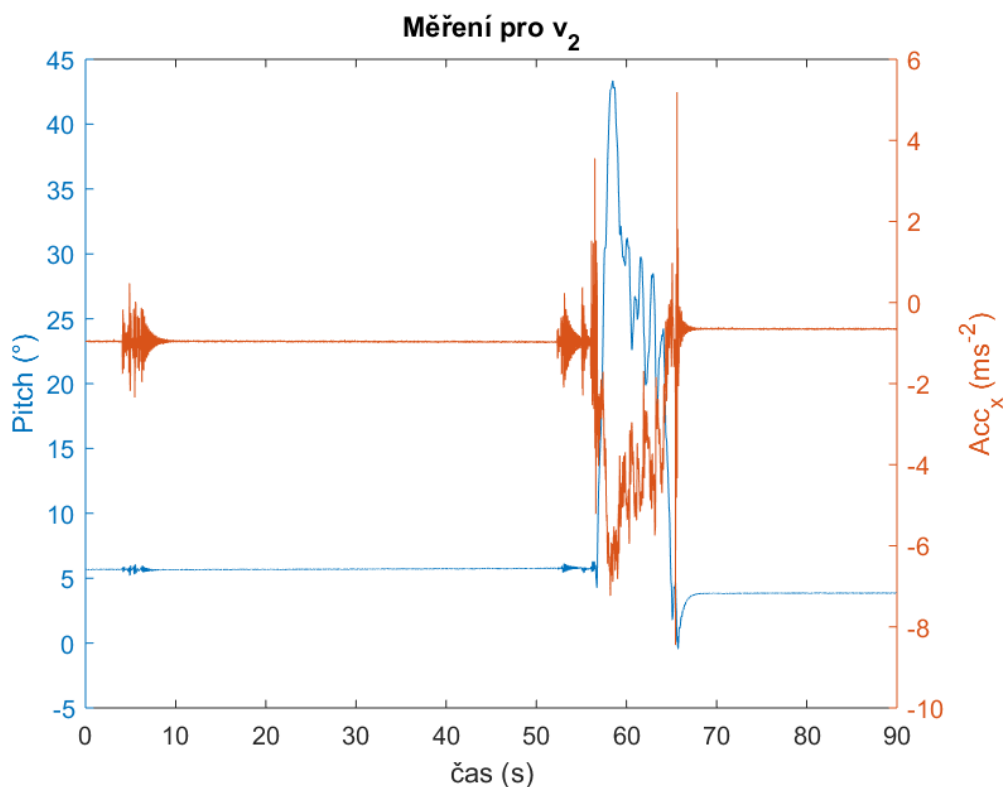


**Graf 2 – Detail měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_1$**

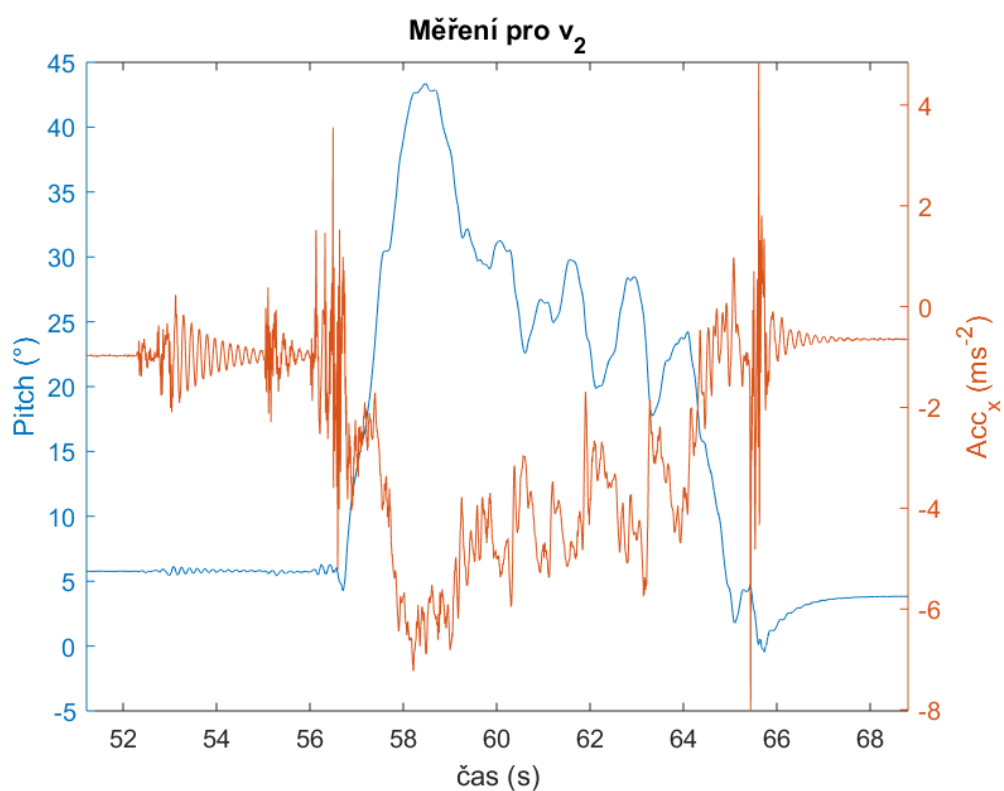


Graf znázorňující měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_2=2,39$  m/s opět poukazuje na časový úsek měření v intervalu 90 s, ve kterém je vidět neúspěšná snaha pilota udržet nulové zrychlení vůči ventilátoru (Graf 3). V časovém rozmezí detail grafu od 53 s do 68 s, jsou opět zachycené oba úkazy. Kontakt kvadrokoptéry s poryvem vzduchu a kompenzační pohyby. První jev se znovu projevuje jako sinusový pohyb s malou amplitudou a vysokou frekvencí. Druhý jev přibližuje reakce pilota ve snaze udržení kvadrokoptéry ve visení, které se projevují jako diferenciální změny klopení a zrychlení (Graf 4). V průběhu testování odpovídal medián úhlu klopení  $6,1^\circ$ .

**Graf 3 - Měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_2$**



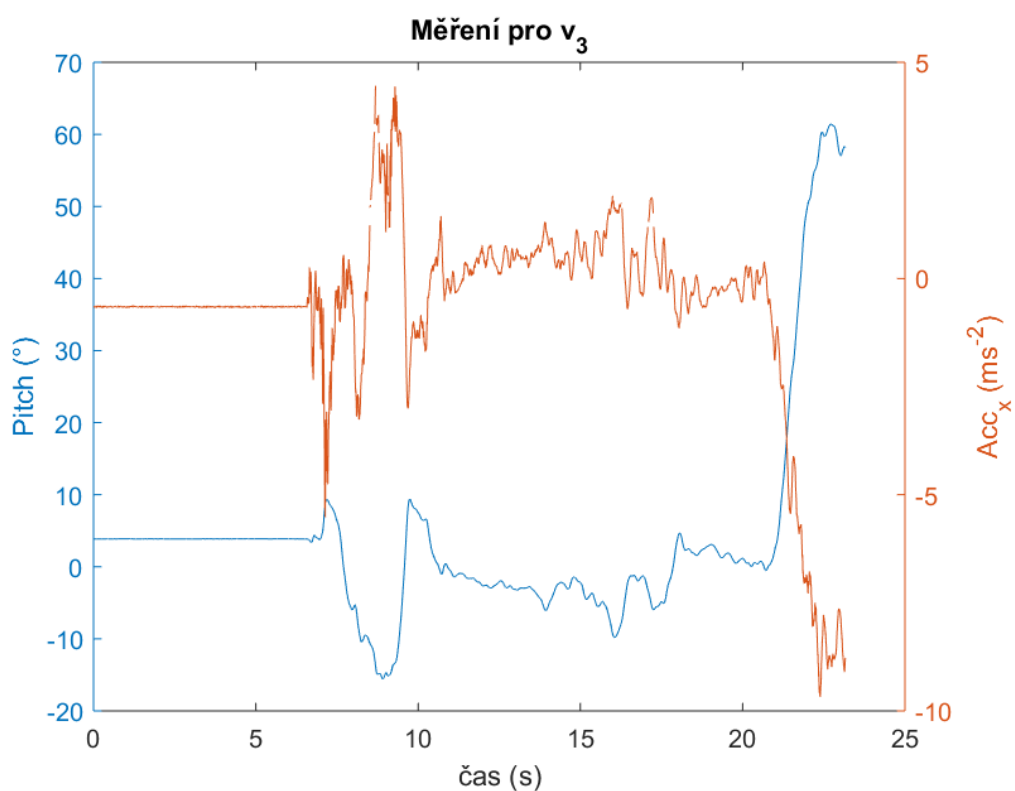
Graf 4 – Detail měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_2$



Při testování poslední rychlosti proudění vzduchu  $v_3=3,41$  m/s, již pilot nedokázal kompenzačními pohyby udržet kvadrokoptéru ve visení oproti ventilátoru a kvadrokoptéra se v krátkém časovém intervalu od manévru visení a ventilátoru značně odchýlila (Graf 5).

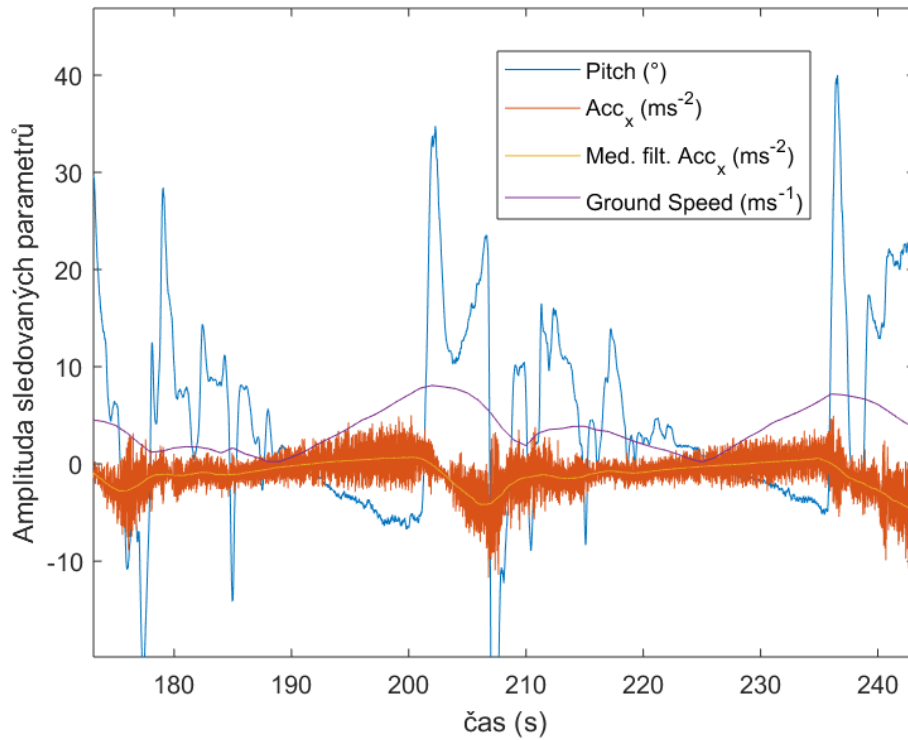


Graf 5 – Detail měření při rychlosti proudění vzduchu  $v_3$



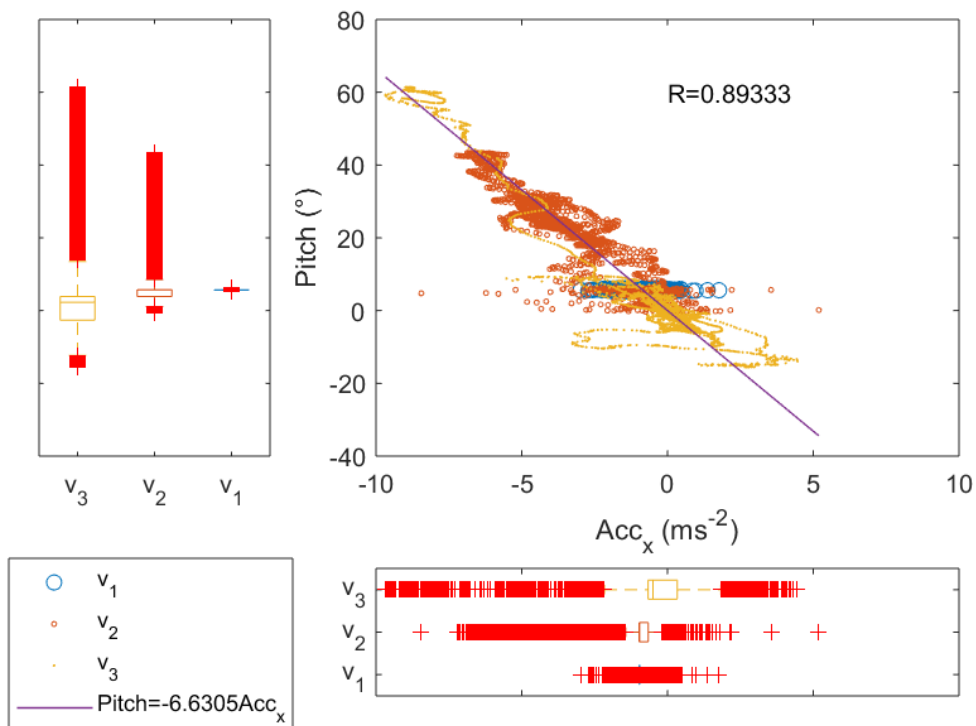
Mění se klopení kvadrokoptéry v závislosti na rychlosti proudění vzduchu při vlnění vůči ventilátoru mělo být porovnáno s klopením odpovídající rychlostem letu při outdoorovém měření. Při zpracování dat naměřených při outdoorových letech se ukázalo, že z grafu nelze jednoznačně určit nulovou akceleraci, tedy konstantní rychlosti a lety tak nemohly být k potvrzení hypotézy porovnány (Graf 6).

**Graf 6 – Měření při outdoorových letech**



Dále byl v rámci zpracování dat dopočítán korelační koeficient  $R=0,89333$ , blíží se jedné. Poukazující na kladnou lineární závislost mezi klopením a zrychlením podél osy X. Na tento fakt poukazují i krabicové grafy, které vizualizují větší rozptyl hodnot klopení a zrychlení při větších rychlostech proudění vzduchu. K bližšímu popisu závislosti klopení a zrychlení podél osy X, byla dopočítána lineární regrese, ze které plyne, že je klopení závislé na zrychlení, nikoliv zrychlení na klopení. Regresní koeficient udává, že se klopení změní o  $-6.6305^\circ$  pokud se zrychlení podél osy X změní o jednu jednotku (Graf 7).

Graf 7 – Přehled krabicových grafů a závislosti klopení na zrychlení



## 4 Diskuze

Při zpětném pohledu na návrh experimentálního konceptu je možné s odstupem a získanými zkušenostmi poukázat na určité aspekty, které negativně ovlivnily měření. Například k dosažení nulového zrychlení a konstantní rychlosti by bylo možné využití poloautomatického režimu letu, při kterém by kvadrokoptéra využitím sensorického vybavení dodržovala pilotem zadanou rychlost a odpovídající úhel klopení. Dále by bylo možné tento režim využít při testování vůči proudění vzduchu, ve kterém by byla kvadrokoptéra schopna pomocí sensorického vybavení a vhodného indoorového firmwaru samovolně setrvávat při manévru visení. Využitím poloautomatického režimu letu kvadrokoptéry by byla vyřazená proměnná v podobě pilota a bylo by možné dosáhnout větší stability při vyšších rychlostech proudění vzduchu a tím by se na výstupních hodnotách projevila větší přesnost měření. Například při testování působících sil a momentů na kvadrokoptéru vlivem rozdílných úhlů klopení, rychlostí otáček a rychlostí proudu vzduchu. Tento aspekt vyřadili využitím kloubu, který kvadrokoptéru v prostorách tunelu udržel ve stále pozici. Tuto metodu však nelze aplikovat při dynamickém testování a porovnávání indoorových letů s outdoorovými. [13] [14]

Další dílčí aspekt, který významně ovlivnil výsledky práce byl nezdařilý pokus o synchronizaci optického MoCap systému Qualisys prostřednictvím ROSu se sensorickým vybavením kvadrokoptéry. K odstranění této chyby by bylo nutné zajistit vzájemnou komptabilitu ROSu s optickým systémem Qualisys, například upravením již existujícího balíčku ROS s názvem vicon\_bridge, který byl vytvořen k těmto účelům propojení s jiným optickým MoCap systémem Vicon. [57] Po odstranění této závady a dosažení vzájemné synchronizace mezi jednotlivými systémy by opět vzrostla přesnost měření. Optický systém Vicon a přemostění vicon\_bridge, bylo nejčastěji využívaným nástrojem při implementaci optických MoCap systému do nových konceptů, navržených k autonomním letům bezpilotních letadel po předdefinované trajektorii [25], letům ve formaci více bezpilotních letadel [26] nebo právě porovnání skutečně opisované trajektorie s trajektorií opisovanou pomocí různorodého sensorického vybavení.

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout koncepční testovací zařízení letových charakteristik bezpilotních letadel při indoorových manuálně řízených letech. Pro tento účel byla navržena vlastní imitace aerodynamického tunelu, modelující uniformní podmínky a simulující reálné lety. K vytvoření napodobeniny nízkorychlostního aerodynamického tunelu byl použit průmyslový ventilátor, který byl schopný produkovat proud vzduchu odpovídající rychlostem při outdoorových dopředných letech. Ventilátorem generovaný proud vzduchu byl dále usměrněn pomocí laminárního regulátoru k minimalizaci vznikajících turbulencí. Ke kompenzaci indoorových prostor laboratoře byl zvolen vhodný manévru, poskytující možnost dynamického testování letových charakteristik v průběhu visení bezpilotního letadla vůči ventilátoru. K testování byl vybrán vhodný bezpilotní letoun, umožňující setrvávat při manuálně řízených letech v manévru visení. Na základě těchto letových vlastností byla v konceptu testována kvadrokoptéra IRIS+. Ke snímání a zaznamenání letových charakteristik bylo rozšířeno senzorické vybavení kvadrokoptéry o řídicí jednotku Pixhawk a externí inerciální MoCap systém Inertia ProMove. Koncept byl dále k dosažení různorodých vzájemně nezávislých výstupních hodnot měření rozšířen o optický MoCap systém Qualisys laboratoře FTVS. K zajištění paralelního měření jednotlivých systémů ve stejném časovém intervalu byla kvadrokoptéra dovybavena o palubní počítač ODRON C2, který prostřednictvím experimentálního operačního systému ROSu zajistil komunikační vrstvu mezi senzorickým vybavením kvadrokoptéry a optickým MoCap systémem Qualisys.

V navrženém experimentálním konceptu byla provedena série letů, při kterých byla kvadrokoptéra v průběhu manévru visení vystavována narůstajícím rychlostem proudění vzduchu. S rostoucí rychlostí proudění vzduchu se přímou úměrou zvětšoval odpor a pilot byl v rámci udržení manuálně řízeného manévru vůči ventilátoru nucen tyto vlivy změnou úhlu klopení kompenzovat. K porovnání, zda je navržený koncept vhodný k testování letových charakteristik bezpilotních, byla provedena série outdoorových testů při dopředných letech. Za předpokladu, že se bude úhel klopení při stejných rychlostech proudu vzduchu u indoorových letů rovnat úhlu klopení při odpovídajících rychlostech outdoorových letů.

Při zpracování jednotlivých vzorků dat testování ze senzorického vybavení kvadrokoptéry a optického MoCap systému Qualisys bylo zjištěno, že se nepodařilo optický systém Qualisys prostřednictvím ROSu časově synchronizovat, a nebylo tak možné v čase identifikovat počáteční hodnotu měření a data porovnat. Prvotní myšlenka, získání více dat z různorodých systémů, se tak nepodařila uskutečnit a výstupní hodnoty vycházely pouze z externího MoCap systému Inertia ProMove. Naměřená polohová data ve formě kvaternionů byla společně

s lineárními akceleracemi po přistání kvadrokoptéry nahraná do počítače, ve kterém byla pomocí softwaru Matlab zpracována.

Navzdory uniformním podmínkám se při letech nepodařilo dosáhnout nulové akcelerace, tedy konstantní rychlosti a hodnoty indoorových a outdoorových letů nemohly být porovnány k potvrzení či vyvrácení předpokládaného tvrzení. Tedy presumpce, kdy by měl úhel klopení při stejných rychlostech proudu vzduchu u indoorových letů odpovídat úhlu klopení při odpovídajících rychlostech outdoorových letů. Za hlavní limitaci lze určit lidský faktor, tedy pilota, který nebyl schopný při manuálně řízených letech udržet nulové zrychlení. Příčinou chyby je samotná složitost manévru a postavení pilota vůči ventilátoru, které pilotovi poskytovalo pouze dopředný 2D pohled na prováděný manévr. Pilotovi scházel pohled z jiné perspektivy. Ze stejných důvodů, ze kterých nemohly být porovnány indoorové a outdoorové lety, neodpovídaly hodnoty mediánů úhlů klopení, kdy měly podle předpokladů růst limitní hodnoty úhlů klopení s rostoucí rychlostí proudění vzduchu.

Práce navrhuje koncept dynamického testování letových charakteristik při manuálně řízených letech kvadrokoptéry. Experimentálně verifikovala správnost zvoleného manévru pro studium dílčí letové charakteristiky. Práce dále dokazuje existenci vztahu mezi úhlem klopení a dopředným zrychlením. Tento poznatek může přispět k vytvoření letových obálek při indoorových testovacích letech. Výsledky práce mohou sloužit jako znalostní báze pro navazující výzkum.

## Bibliografie

- [1] Jednotná evropská legislativa pro drony: Co znamená pro české hobby a profi piloty?. *DRONPRO* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/jednotna-evropska-legislativa-pro-drony-co-znamená-pro-ceske-hobby-a-profi-piloty>
- [2] Nová pravidla pro drony: z čeho musí vycházet národní předpisy. *DRONEWEB* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/333-drony-legislativa-eu>
- [3] Podle kterého předpisu se řídí provoz bezpilotních letadel / systémů?. *ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/letadla-bez-pilota-na-palube/provoz-ostatnich-letadel-bez-pilota-na-palube/podle-ktereho-predpisu-se-ridi-provoz-bezpilotnich-letadel-systemu/>
- [4] KELLER, Ladislav. *Učební texty pro piloty UAS*. 3. Praha: Dronim, 2019.
- [5] DOPLNĚK X - BEZPILOTNÍ SYSTÉMY. *LETECKÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [6] Příprava společných evropských pravidel. *ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ* [online]. [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/letadla-bez-pilota-na-palube/priprava-spolecnych-evropskych-pravidel/>
- [7] NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) 2019/945. *EUR-lex* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=CS>
- [8] PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2019/947. *EUR-lex* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=IT>
- [9] Letecký předpis L7. *LETECKÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [10] TORENBEEK, E. a H. WITTENBERG. *Flight Physics: Essentials of Aeronautical Disciplines and Technology, with Historical Notes*. 1st. London: Springer Science & Business Media, 2009. ISBN 978-1-4020-8663-2.
- [11] MARQUÉS, Pascual a Andrea DA RONCH, ed. *Advanced UAV Aerodynamics, Flight Stability and Control* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017 [cit. 2020-04-29]. DOI: 10.1002/9781118928691. ISBN 9781118928691.
- [12] JENKINS, Kevin. *The Droner's Manual: A Guide to the responsible operation of Small Unmanned Aircraft*. 1st. NEWCASTLE: Aviation Supplies & Academics, Inc., 2018. ISBN 9781619544338.
- [13] RUSSELL, Carl, Jaewoo JUNG, Gina WILLINK a Brett GLASNER. Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles. In: *72nd American Helicopter Society*

(AHS) *International Annual Forum and Technology Display* [online]. Florida [cit. 2020-04-27]. ISBN 978-151082506-2.

- [14] THEYS, B., G. DIMITRIADIS, T. ANDRIANNE, P. HENDRICK a J. DE SCHUTTER. Wind tunnel testing of a VTOL MAV propeller in tilted operating mode. In: *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* [online]. IEEE, 2014, s. 1064-1072 [cit. 2020-04-28]. DOI: 10.1109/ICUAS.2014.6842358. ISBN 978-1-4799-2376-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6842358/>
- [15] AKCAKOCA, Mehmet, Bilge Mirac ATICI, Basak GEVER et al. A Simulation-Based Development and Verification Architecture for Micro UAV Teams and Swarms. In: *AIAA Scitech 2019 Forum* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019, s. - [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.2514/6.2019-1979. ISBN 978-1-62410-578-4. Dostupné z: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-1979>
- [16] GOEL, Rahul, Sapan SHAH, Nitin GUPTA a N. ANANTHKRISHNAN. Modeling, Simulation and Flight Testing of an Autonomous Quadrotor. *Proceedings of ICEAE* [online]. [cit. 2020-04-28].
- [17] MICHAEL, Nathan, Daniel MELLINGER, Quentin LINDSEY a Vijay KUMAR. The GRASP Multiple Micro-UAV Testbed. *IEEE Robotics & Automation Magazine* [online]. 2010, **17**(3), 56-65 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1109/MRA.2010.937855. ISSN 1070-9932. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5569026/>
- [18] DONG, Wei, Guo-Ying GU, Xiangyang ZHU a Han DING. Development of a Quadrotor Test Bed — Modelling, Parameter Identification, Controller Design and Trajectory Generation. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2015, **12**(2) [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.5772/59618. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.5772/59618>
- [19] YINAN CUI a Tamer INANC. Multiple Air Robotics Indoor Testbed. In: *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* [online]. IEEE, 2012, s. 3487-3492 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1109/CCDC.2012.6244557. ISBN 978-1-4577-2074-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6244557/>
- [20] SPOSATO, Mario. *Multiagent cooperative coverage control*. Stockholm, 2016. Degree project. KTH Royal Institute of Technology.
- [21] SARKAR, Mrinmoy, Abdollah HOMAIFAR, Berat A. EROL, Mohammadreza BEHNIAPOOR a Edward TUNSTEL. PIE: a Tool for Data-Driven Autonomous UAV Flight Testing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* [online]. 2020, **98**(2), 421-438 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1007/s10846-019-01078-y. ISSN 0921-0296. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-019-01078-y>
- [22] PALACIOS, Filiberto Muñoz, Eduardo Steed Espinoza QUESADA, Guillaume SANAHUJA, Sergio SALAZAR, Octavio Garcia SALAZAR a Luis Rodolfo Garcia CARRILLO. Test bed for applications of heterogeneous unmanned vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2016, **14**(1) [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1177/1729881416687111. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881416687111>



- [23] HUI, Cheng, Chen YOUSHENG a Wong Wing SHING. Trajectory tracking and formation flight of autonomous UAVs in GPS-denied environments using onboard sensing. In: *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference* [online]. IEEE, 2014, s. 2639-2645 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1109/CGNCC.2014.7007585. ISBN 978-1-4799-4699-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7007585/>
- [24] AL-KAFF, Abdulla, José María ARMINGOL a Arturo DE LA ESCALERA. A vision-based navigation system for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Integrated Computer-Aided Engineering* [online]. 2019, **26**(3), 297-310 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.3233/ICA-190601. ISSN 10692509. Dostupné z: <https://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress&doi=10.3233/ICA-190601>
- [25] AL HABSI, Shaima, Maha SHEHADA, Marwah ABDOON, Ahmed MASHOOD a Hassan NOURA. Integration of a Vicon camera system for indoor flight of a Parrot AR Drone. In: *2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)* [online]. IEEE, 2015, s. 1-6 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1109/ISMA.2015.7373476. ISBN 978-1-4673-7797-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7373476/>
- [26] MASHOOD, Ahmed, Marwah MOHAMMED, Maha ABDULWAHAB, Shaima ABDULWAHAB a Hassan NOURA. A hardware setup for formation flight of UAVs using motion tracking system. In: *2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)* [online]. IEEE, 2015, s. 1-6 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1109/ISMA.2015.7373474. ISBN 978-1-4673-7797-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7373474/>
- [27] MASHOOD, Ahmed, Ahmed DIRIR, Mousa HUSSEIN, Hassan NOURA a Falah AWWAD. Quadrotor object tracking using real-time motion sensing. In: *2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-4 [cit. 2020-08-04]. DOI: 10.1109/ICEDSA.2016.7818504. ISBN 978-1-5090-5306-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7818504/>
- [28] ROZANTSEV, Artem, Sudipta N. SINHA, Debadeepta DEY a Pascal FUA. Flight Dynamics-Based Recovery of a UAV Trajectory Using Ground Cameras. In: *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* [online]. IEEE, 2017, s. 2482-2491 [cit. 2020-08-05]. DOI: 10.1109/CVPR.2017.266. ISBN 978-1-5386-0457-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8099749/>
- [29] HOVORA, Jan. *Motion Capture - teorie i praxe.* (). Dostupné také z: [http://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwfV3LCKIhEB16rKOoqOjhd9wQ7Woue7e5EVTrUO8ErYpqEX19epOIoHaCMjl46pnBcwTgrE-jrzOBIZlu0MHR2MbUWkqtEuhF8IZaCem5yknC1rt4ulGroJrjqTEvPdS-1zPNnkw\\_PgglwmNrlYc8l35HLsaeiBNGftwR8zKUArgjo9dqVCBnr1XoJdlHOWSiz75aTyJyw5NLU MmRnC\\_6jjUg89l2soyCOX2oqOzfk7M6FFyWjg0gmMpU4NBQaXBghDCapYyhVUZL1-BNaP400\\_rT14biwQUidt6-dTNfn8sGYrM](http://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwfV3LCKIhEB16rKOoqOjhd9wQ7Woue7e5EVTrUO8ErYpqEX19epOIoHaCMjl46pnBcwTgrE-jrzOBIZlu0MHR2MbUWkqtEuhF8IZaCem5yknC1rt4ulGroJrjqTEvPdS-1zPNnkw_PgglwmNrlYc8l35HLsaeiBNGftwR8zKUArgjo9dqVCBnr1XoJdlHOWSiz75aTyJyw5NLU MmRnC_6jjUg89l2soyCOX2oqOzfk7M6FFyWjg0gmMpU4NBQaXBghDCapYyhVUZL1-BNaP400_rT14biwQUidt6-dTNfn8sGYrM)
- [30] Motion Capture. *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Motion\\_capture](https://en.wikipedia.org/wiki/Motion_capture)
- [31] Hardware. *QUALISYS* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.qualisys.com/hardware/>

- [32] TOBON, Ricardo. *The mocap book: a practical guide to the art of motion capture*. Orlando: Foris Force, 2010. ISBN 0615293069.
- [33] Cybernetics & Robotics. *QUALISYS* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.qualisys.com/applications/engineering/cybernetics/>
- [34] MENACHE, Alberto. *Understanding motion capture for computer animation*. 2nd ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2011. ISBN 9780123814968.
- [35] Inertia ProMove MINI. *Inertia technology* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <http://inertia-technology.com/product/motion-capture-promove-mini/>
- [36] 3D Robotics IRIS+. *MEGAPIXEL* [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/3d-robotics-iris-433>
- [37] Pixhawk 2.4.8. *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Readytosky-Pixhawk-Controller-Autopilot-Splitter/dp/B07CHQ7S24>
- [38] Pixhawk 1 Flight Controller. *Dronocode* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight\\_controller/pixhawk.html](https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk.html)
- [39] Radiová sada 3DR. *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: [https://www.amazon.com/Readytosky-Telemetry-Standard-Version-Controller/dp/B01DHV4DVA/ref=sr\\_1\\_23\\_sspa?crid=14BZ3GI7TZFCC&keywords=](https://www.amazon.com/Readytosky-Telemetry-Standard-Version-Controller/dp/B01DHV4DVA/ref=sr_1_23_sspa?crid=14BZ3GI7TZFCC&keywords=)
- [40] Pitotova trubice. *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [https://www.amazon.com/powerday-Digital-Airspeed-Differential-Autopilot/dp/B01HR4CZLS/ref=sr\\_1\\_5?crid=2XG48QTKD12WX&keywords=pitot+tube](https://www.amazon.com/powerday-Digital-Airspeed-Differential-Autopilot/dp/B01HR4CZLS/ref=sr_1_5?crid=2XG48QTKD12WX&keywords=pitot+tube)
- [41] Napájecí modul. *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [https://www.amazon.co.uk/powerday-Module-APM2-8-Pixhawk-Controller/dp/B01CN62MZE/ref=sr\\_1\\_1?dchild=1&keywords=powerday+APM+Power+Module+V1.0+XT60+Plug+for+APM2.8+APM2.6+APM+Pixhawk+Flight+Controller&qid=1588358350&s=kids&sr=1-1](https://www.amazon.co.uk/powerday-Module-APM2-8-Pixhawk-Controller/dp/B01CN62MZE/ref=sr_1_1?dchild=1&keywords=powerday+APM+Power+Module+V1.0+XT60+Plug+for+APM2.8+APM2.6+APM+Pixhawk+Flight+Controller&qid=1588358350&s=kids&sr=1-1)
- [42] ODROID-C2. *RPishop* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/odroid/1333-odroid-c2.html>
- [43] ODROID-C2. *ODROID wiki* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://wiki.odroid.com/odroid-c2/odroid-c2>
- [44] What is ROS exactly? Middleware, Framework, Operating System?. *ROS answers* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://answers.ros.org/question/12230/what-is-ros-exactly-middleware-framework-operating-system/>
- [45] What is ROS?. *Le Blog Génération Robots* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.generationrobots.com/blog/en/ros-robot-operating-system-2/>

- [46] What is ROS?. *The Robotics back-end* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://roboticsbackend.com/what-is-ros/>
- [47] ROS concepts. *ROS.org* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>
- [48] FILIPE LEONOR NEBEKER, Nuno. *External Robot Localization in 6DoF*. Porto, 2015. Disertační práce. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Vedoucí práce Armando Jorge Miranda de Sousa.
- [49] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1958.
- [50] MAVROS. *Dronocode* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://dev.px4.io/v1.9.0/en/ros/mavros\\_installation.html](https://dev.px4.io/v1.9.0/en/ros/mavros_installation.html)
- [51] MAVLink Developer Guide. *MAVLINK* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://mavlink.io/en/>
- [52] JONES, Thomas A. MATLAB functions to analyze directional (azimuthal) data—II: Correlation. *Computers & Geosciences* [online]. 2006, **32**(2), 176-183 [cit. 2020-08-10]. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.06.021. ISSN 00983004. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300405001615>
- [53] Výpočet Pearsonova korelačního koeficientu. *Matematicka biologie* [online]. [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinickych-a-biologickych-dat--biostatistika-pro-matematickou-biologii--zaklady-korelacni-analyzy--pearsonuv-korelacni-koeficient--vypocet-pearsonova-korelacniho-koeficientu>
- [54] Linear Correlation. *MathWorks* [online]. [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/matlab/data\\_analysis/linear-correlation.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-correlation.html?s_tid=srchtitle)
- [55] Correlation and linear regression. *Handbook of biological statistics: John H. Mcdonald* [online]. [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <http://www.biostathandbook.com/linearregression.html>
- [56] Boxplot. *MathWorks* [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://se.mathworks.com/help/stats/boxplot.html>
- [57] Vicon\_bridge. *ROS.org* [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: [http://wiki.ros.org/vicon\\_bridge](http://wiki.ros.org/vicon_bridge)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rozdělení bezpilotních letadel .....	17
Obrázek 2 – Rozdělení vrtulníků .....	18
Obrázek 3 – Rozdělení multikoptér .....	20
Obrázek 4 – Konfigurace multikoptér .....	20
Obrázek 5 – Kvadrokoptéra DJI Phantom v prostorách aerodynamického tunelu NASA .....	22
Obrázek 6 – Umístění vrtule Graupner E-prop v prostorách tunelu Liège .....	22
Obrázek 7 – Výsledné hodnoty vztlaku a odporu měnicích se vlivem rozdílných otáček elektromotorů a úhlů natočení.....	23
Obrázek 8 – Matematický model kvadrokoptéry.....	25
Obrázek 9 – Porovnání předdefinované trajektorie se skutečně opisovanou trajektorií .....	26
Obrázek 10 – Koncept opisování trajektorie pozemního vozidla bezpilotním letadlem .....	27
Obrázek 11 - Kamera systému Qualisys.....	32
Obrázek 12 - Markery .....	32
Obrázek 13 – Varianty spojení systému s počítačem.....	35
Obrázek 14 – Kvadrokoptéra IRIS+ od společnosti 3DRobotics.....	36
Obrázek 15 – Mód ovladače .....	36
Obrázek 16 – Směr rotace vrtulí .....	37
Obrázek 17 – Řídicí jednotka Pixhawk 2.4.8.....	38
Obrázek 18 – Radiová sada 3DR.....	39
Obrázek 19 – Pitotova trubice připojená k řídicí jednotce.....	39
Obrázek 20 – Napájecí modul.....	40
Obrázek 21 – Palubní počítač Odroid C2].....	41
Obrázek 22 – Schéma komunikační struktury ROSu .....	44
Obrázek 23 – Ventilátor umístěný v laminárním regulátoru .....	45
Obrázek 24 – Schéma testovacího konceptu .....	48
Obrázek 25 – Pearsonův korelační koeficient .....	49

Obrázek 26 – Bodový diagram.....	50
----------------------------------	----

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 - Parametry senzorů užitých při duplikaci dat .....	34
Tabulka 2 - Naměřené rychlosti proudu vzduchu .....	53

## **Seznam grafů**

Graf 1 – Měření při rychlosti proudění vzduchu $v_1$ .....	54
Graf 2 – Detail měření při rychlosti proudění vzduchu $v_1$ .....	54
Graf 3 - Měření při rychlosti proudění vzduchu $v_2$ .....	55
Graf 4 – Detail měření při rychlosti proudění vzduchu $v_2$ .....	56
Graf 5 – Detail měření při rychlosti proudění vzduchu $v_3$ .....	57
Graf 6 – Měření při outdoorových letech .....	58
Graf 7 – Přehled krabicových grafů a závislosti klopení na zrychlení .....	59