



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

David Šíma

Možnosti využití bezpilotních letadel v meteorologii

Bakalářská práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621**Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

David Šíma

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Možnosti využití bezpilotních letadel v meteorologii**

Název tématu (anglicky): Opportunities for Use of UAVs in Meteorology

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je analyzovat využití bezpilotních letadel k provádění meteorologických měření a pozorování a následně provedení a zhodnocení praktického měření právě za pomoci bezpilotního letadla.
- Druhy a principy fungování meteorologických letadel
- Příklady možností využití bezpilotních letadel pro meteorologická pozorování
- Tvorba měřicího zařízení
- Provedení praktického měření



- 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: VYSOUDIL, Miroslav. Meteorologie a klimatologie. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. ISBN 8024408759.
DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie 2017. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5
KARAS, Jakub. 222 tipů a triků pro drony. Brno:

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Iveta Kameníková**

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.

David Šíma
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. října 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Mgr. Ivetě Kameníkové a Ing. Ladislavu Kellerovi za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytovali po celou dobu mého studia. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

Nemám závažný důvod proti užití 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).

V Praze dne 31.07.2020


.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MOŽNOSTI VYUŽITÍ BEZPILOTNÍCH LETADEL V METEOROLOGII

Bakalářská práce

srpen 2020

David Šíma

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je analyzovat podobu minulých a současných bezpilotních letadel využívaných v meteorologii. Dále je v práci nastíněn možný budoucí vývoj v této oblasti společně se zhodnocením vhodnosti využití bezpilotních meteorologických multikoptér pro aerologická měření za pomoci vlastního sestrojeného zařízení.

ABSTRACT

The subject of this bachelor thesis is to analyze past and current meteorological UAVs. The thesis also mentions possible future development in this area together with evaluation of suitability of multicopter UAVs use in aerological measurements by means of own designed device.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MOŽNOSTI VYUŽITÍ BEZPILOTNÍCH LETADEL V METEOROLOGII

Bakalářská práce

srpen 2020

David Šíma

KLÍČOVÁ SLOVA

meteorologie, bezpilotní letadlo, aerologie, meteorologický balón, bezpilotní letoun, bezpilotní multikoptéra, bezpilotní vzducholod', mezní vrstva atmosféry

KEY WORDS

meteorology, unmanned aerial vehicle, aerology, weather balloon, unmanned airplane, unmanned multicopter, unmanned airship, atmospheric boundary layer

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých zkratek:..... | 6 |
| Úvod | 7 |
| 1 Aerologie | 8 |
| 2 Mezní vrstva atmosféry | 13 |
| 3 Druhy bezpilotních letadel vhodných pro aerologická měření..... | 16 |
| 4 Konkrétní příklady využití bezpilotních letadel v meteorologii..... | 21 |
| 4.1 ČHMÚ – Meteorologický balón..... | 21 |
| 4.2 Pozorování tropických cyklón | 24 |
| 4.3 Monitorování vývoje oblačnosti..... | 26 |
| 4.4 NASA | 27 |
| 4.5 Meteomatics | 30 |
| 4.6 SUMO – Bepilotní letoun..... | 32 |
| 4.7 Využití bezpilotních vzducholodí..... | 37 |
| 5 Měřicí zařízení..... | 38 |
| 5.1 Umístění senzorů | 42 |
| 5.2 Vliv vlhkosti a teploty prostředí na naměřené hodnoty..... | 52 |
| 5.3 Měření pod přímým slunečním zářením..... | 57 |
| 5.4 Měření ve 30 metrech nad zemí | 61 |
| Závěr..... | 63 |
| Seznam použité literatury: | 65 |
| Seznam obrázků, tabulek a grafů..... | 70 |
| Seznam příloh..... | 72 |

Seznam použitých zkratek:

| Zkratka | Anglický ekvivalent | Český ekvivalent |
|----------------|---|---|
| BUFR | Binary Universal Form for the Representation of meteorological data | Binární univerzální forma reprezentace meteorologických dat |
| CAPE | Convective available potential energy | Dostupná potenciální energie pro konvektivní činnost |
| CASIE | The Characterization of Arctic Sea Ice Experiment | Experiment charakterizace arktického mořského ledu |
| CIN | Convective Inhibition | Zábrana konvektivní činnosti |
| ČHMÚ | | Český hydrometeorologický ústav |
| ERAST | Environmental Research Aircraft and Sensor Technology | Výzkum technologií letadel a senzorů pro pozorování životního prostředí |
| GNSS | Global Navigation Satellite System | Globální družicový polohový systém |
| GPS | Global Positioning System | Globální polohový systém |
| GRIP | Genesis and Rapid Intensification Process | Proces geneze a rychlého zesílení |
| HALE | High Altitude, Long Endurance | Vysoký dostup, dlouhá výdrž |
| LALE | Low Altitude, Long Endurance | Nízký dostup, dlouhá výdrž |
| LASE | Low Altitude, Short Endurance | Nízký dostup, krátká výdrž |
| LORAN | Long Range Navigation | Navigace na dlouhé vzdálenosti |
| MALE | Medium Altitude, Long Endurance | Střední dostup, dlouhá výdrž |
| MEMS | MicroElectroMechanical Systems | Mikroelektromechanické systémy |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration | Národní úřad pro letectví a vesmír |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration | Národní úřad pro oceán a atmosféru |
| NOTAM | Notice to Airmen | Upozornění pro letce |
| RAM-GGM | The Right-of Way Automated Monitoring - Greenhouse Gas Mission | Automatizované monitorování skleníkových plynů |
| SHOUT | Sensing Hazards with Operational Unmanned Technology | Pozorování nebezpečných jevů s pomocí bezpilotních technologií |
| SUMO | Small Unmanned Meteorological Observer | Malý bezpilotní meteorologický pozorovatel |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle | Bezpilotní letadlo |

Úvod

Bezpilotní letadla jsou v současné době využívána v mnoha odlišných odvětvích a není tomu jinak ani v případě meteorologie. Na první pohled by se mohlo zdát, že jedním z mála takových zařízení jsou pouze meteorologické balóny, které jsou v meteorologii využívány již od konce 19. století [1]. Ano, ještě před pár desítkami let by toto tvrzení nebylo daleko od pravdy, nicméně vzhledem k neustálému vývoji bezpilotních letadel pronikly nové technologie i do oblasti meteorologie.

Cílem teoretické části práce tak je vytvoření uceleného dokumentu věnovaného právě bezpilotním letadlům využívaným v meteorologii, a to konkrétně pak nejen již zmíněným bezpilotním meteorologickým balónům, ale dále také vzducholodím, letounům a multikoptérám. Nejprve je práce zaměřena na základní seznámení čtenáře s aerologií obecně, následně je zmíněn popis mezní vrstvy atmosféry, ve které většina aerologických měření probíhá, v další kapitole se čtenář seznámí s principy jednotlivých zařízení, která se k aerologickým měřením používají, a v kapitole poslední teoretické části se může čtenář dozvědět mnoho informací o konkrétních příkladech aerologických pozorování. V této části je například zmíněn popis toho, jakým způsobem se k aerologii staví Český hydrometeorologický ústav, jakou formou pozoruje meteorologické prvky v atmosféře americký úřad NASA společně s agenturou NOAA, k čemu mohou posloužit bezpilotní vzducholodě v oboru meteorologie, jakými způsoby mohou být v budoucnu potenciálně nahrazeny meteorologické balóny nebo například jak jsou za pomoci bezpilotních letadel sledovány tropické cyklóny.

Část praktická je pak věnována tomu, zda a případně jakým způsobem je reálné vytvořit z běžně dostupné multikoptéry, určené především k pořizování leteckých snímků, meteorologické bezpilotní letadlo vhodné k provádění určité formy aerologických pozorování. Nejprve je v této části práce zmíněn konkrétní postup tvorby měřicího zařízení, které bylo posléze společně s multikoptérou využito při sérii několika měření ke zodpovězení této otázky. Výstupy z těchto měření jsou následně v práci uvedeny.

1 Aerologie

Měření získaná pomocí zařízení, která jsou do atmosféry vynášena speciálními nosiči, tedy právě zejména bezpilotními prostředky, se řadí do oboru nazývaného aerologie, konkrétně se jedná o aerologii přímou. K měření jednotlivých dílčích veličin jsou v drtivé většině případů využívána zařízení s digitálními senzory, která jsou naměřené hodnoty schopna ukládat či dálkově přenášet zpět na zemský povrch k pozorovatelům. Výstupem z takových měření jsou pak například v letectví hojně využívané aerologické diagramy, ve kterých jsou znázorněny naměřené hodnoty ve vertikální rovině. [2]

Aerologii lze ještě dále rozdělit na aerologii nepřímou. V takovém případě jsou hodnoty v jednotlivých vrstvách nad zemským povrchem měřeny přímo ze zemského povrchu. Možnosti takového charakteru jsou však pro účely měření základních meteorologických veličin značně omezené. [2]

Do oboru aerologie ještě dále spadá podobor nazývaný se aeronomie, ten se zabývá stavbou a vlastnostmi zemské atmosféry nad tropopauzou. Tento podobor na rozdíl od aerologie v troposféře patří z větší části do aerologie nepřímé. Mezi pozemní metody aeronomických pozorování se pak řadí zejména fotografické, respektive vizuální, pozorování meteorů nebo polárních září. [2]

Mezi veličiny, které se v atmosféře cestou aerologie pozorují, patří zejména následující.

Teplota

K měření přízemní teploty se dodnes ještě stále hojně využívají teploměry mechanické, konkrétně pak bimetalické či skleněné kapalinové. Takový druh teploměrů je však pro aerologická měření nevhodný z důvodu nutné přímé vizuální kontroly měřené hodnoty na stupnici teploměru. V aerologii je tak pro měření využíváno pouze teploměrů elektrických, a to zejména takových, u kterých se měří změny elektrického odporu určitého materiálu se změnou teploty. Při využití teploměru měřícího změnu odporu v kovovém materiálu pak s rostoucí teplotou odpor lineárně narůstá, při využití polovodiče naopak odpor klesá, v tomto případě však již s nelineární závislostí. [2] [3] [4]

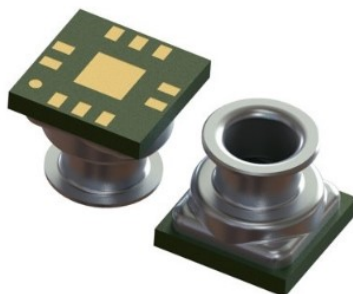
$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad 1$$

Tato kalibrační rovnice vyjadřuje obecnou kvadratickou závislost odporu právě na teplotě materiálu. Jednotlivé členy pak odpovídají následujícím údajům:

- R_t odpovídá elektrickému odporu čidla při teplotě t [W]
- R_0 odpovídá elektrickému odporu při nulové teplotě [W]
- A a B jsou konstanty charakteristické pro daný materiál
- T je měřená teplota [°C]

Atmosférický tlak

Stejně jako u teploměrů, tak i u tlakoměrných zařízení je v aerologickém oboru nutné sáhnout po přístrojích, které jsou schopné dodávat změřené hodnoty v digitálním formátu. Klíčovou je pak minimalizace velikosti mechanických částí takového zařízení. Ideální formou pro taková měření jsou tak například zařízení typu MEMS (Microelectromechanical Systems), která jsou mimo jiné schopna měřit hodnoty tlaku na principu změn vlastností určitých druhů elektrických obvodů v důsledku změn tlaku, který na ně působí. Zařízení MEMS využívají k měření hodnoty tlaku piezorezistivní jev. Příkladem takového zařízení může být tenzometr tvořený křemíkovou membránou, na které se mění hodnota měřeného napětí v důsledku deformací způsobených působícím tlakem. [5]



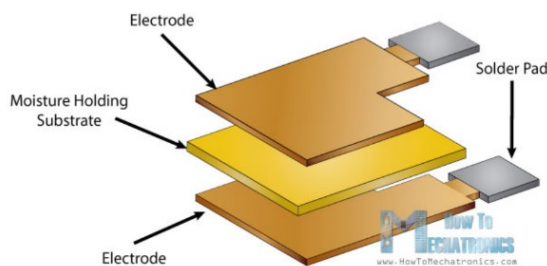
Obrázek 1 - Tlakový MEMS senzor s křemíkovou membránou [6]

Na obrázku 1 je uveden příklad MEMS senzoru, který je díky svým rozměrům, které jsou přibližně 2 centimetry ve všech směrech, a rozsahu měřitelných hodnot od 260 hPa do 1260 hPa, potenciálně vhodný k využití při aerologických měření. [6]

Vlhkost vzduchu

Stejně jako u měření teploty a tlaku, tak i způsob měření vlhkosti vzduchu musí být pro aerologická měření odlišný od tradičního způsobu měření v meteorologických budkách umístěných při zemském povrchu, kde se k určení vlhkosti vzduchu ještě stále v mnoha případech využívá neelektrického psychrometru, který porovnává teplotu vlhkého a suchého teploměru. Pro aerologická měření jsou k tomuto účelu opět velice vhodná zařízení, která,

stejně jako u teploměrů, snímají změnu odporu elektrického obvodu s měnící se vlhkostí vzduchu. Dalším možným příkladem takového senzoru může být senzor kapacitní sestávající z dvojice elektrod, mezi kterými je umístěno dielektrikum ve formě hygroskopického materiálu. Schéma takového vlhkoměru je znázorněno na obrázku 2. [2]



Obrázek 2 - Schéma kapacitního vlhkoměru [7]

Směr a rychlost větru

Směr a rychlost větru jsou dalšími důležitými údaji, které jsou v aerologii pozorovány. Při současných technologiích existuje několik různých komplexních způsobů, jak tyto údaje ze sondážních prostředků získávat. V prvopočátcích aerologických měření však bylo získávání takovýchto údajů téměř nemožné. Naši předci se spoléhali pouze na vizuální referenci s meteorologickými balóny, na jejímž základě údaje o směru a rychlosti větru se značnou nepřesností odhadovali. Zlom následně přinesl až příchod nejprve pozemních a následně satelitních radionavigačních systémů.

- **Měření směru a rychlosti větru u meteorologického balónu**

Prvním radionavigačním systémem sloužícím k přesné lokalizaci meteorologických balónů byl hyperbolický systém LORAN. Na základě změny horizontální polohy balónu s narůstající výškou dokázal dopočítat směr a rychlost větru, které na balón působí. Postupem času byly přijímače systému LORAN u meteorologických balónů nahrazeny satelitními navigačními systémy. [8]

- **Měření směru a rychlosti větru u bezpilotních letounů**

U bezpilotních letounů lze údaje o směru a rychlosti větru získat na základě podobného principu, jakým se tyto údaje získávají u některých letounů pilotovaných, a to takovým způsobem, kdy tyto údaje získáme porovnáním naměřených údajů z pitot-statické sondy a satelitního navigačního systému. Na základě studie [9] lze s takovým zařízením získávat dostatečně přesné údaje o horizontální složce větru v místech bez silné turbulence. [9]

Další možnost, jakou lze získat údaje o větru s pomocí bezpilotního letounu, je založena opět na využití satelitních navigačních systémů. Pokud dokážeme docílit toho, aby takový letoun udržoval stálou pravou vzdušnou rychlost, pak při provedení dostatečně mírné třistašedesáti stupňové zatáčky můžeme při porovnání právě pravé vzdušné rychlosti s rychlostí vůči zemskému povrchu určit směr i rychlost větru. Takový princip měření však předpokládá, že je směr i rychlost větru v dané oblasti konstantní a proudění není turbulentní. [9]

- **Měření směru a rychlosti větru u multikoptér**

Vzhledem k tomu, že je vzduchová hmota v okolí těchto zařízení silně zvířena, není vhodné měřit údaje o větru s pomocí tlakoměrných sond tak, jak bylo popsáno u bezpilotních letounů. Aplikace posledního popsaného způsobu s využitím udržování konstantní pravé vzdušné rychlosti a porovnáním s rychlostí vůči zemskému povrchu u bezpilotních letounů však již možná je.

Možnost udržovat multikoptéru ve stacionární poloze však přináší další možnosti jak směr a rychlost větru určit. Prvním takovým způsobem, znázorněným na obrázku 3, je připevnění anemometru k multikoptéře do dostatečné vzdálenosti, kde již není ovlivňován prouděním od jednotlivých vrtulí. [10]



Obrázek 3 - DJI Phantom s anemometrem [10]

Další možnost, jak data o větru získat, spočívá ve vyhodnocování údajů z akcelerometrů a určování náklonu multikoptéry ve srovnání s údaji ze satelitního navigačního systému. Směr a rychlost větru je pak možné získávat jak v situacích, kdy se multikoptéra pohybuje, tak i v situaci, kdy multikoptéra udržuje stacionární polohu, v takovém případě lze dosáhnout značně větší přesnosti měření. Výhodou takového způsobu měření je možnost okamžité indikace směru a rychlosti větru, kdy zároveň není potencionálně nutné multikoptéru dovybavovat dalšími zařízeními, kromě již zmíněného přijímače polohy ze satelitních navigačních systémů. Pro dopočet výsledných údajů při takové metodě měření je však nutné

využít poměrně komplikovaný algoritmus společně s přesnou znalostí aktuální hustoty vzduchu, ve které se multikoptéra pohybuje, což takové měření komplikuje. Lze však očekávat, že právě takový způsob měření údajů o větru bude v budoucnu více zkoumán a posléze případně využíván. [10]

Ozon

Ozon, jakožto nedílná součást zemské atmosféry, slouží k filtraci ultrafialového UV-B záření a chrání tak organický život na Zemi proti jeho zhoubným účinkům.

Hodnoty koncentrace ozonu bývají měřeny přímou či nepřímou cestou. Nepřímou cestou se rozumí měření hodnot již dopadajícího ultrafialového záření na zemský povrch, z kterých se následně přibližné hodnoty množství ozonu v atmosféře odvozují. Aerologická měření pak provádí přímé měření koncentrace ozonu, kdy jsou bezpilotní letadla vybavena patřičnými senzory schopnými zaznamenat konkrétní hodnoty ozonu v jednotlivých vrstvách atmosféry. Ozon se v atmosféře vyskytuje převážně ve výškách odpovídajícím výšce tropopauzy, bývá tak v současnosti měřen zejména bezpilotními balóny. [11]

K měření těchto hodnot slouží senzory pracující na principu, kdy elektrolyt umístěný mezi elektrodami mění své elektromechanické vlastnosti v závislosti na koncentraci ozonu v jeho bezprostředním okolí. [11]

Radioaktivita

Jelikož je radioaktivní záření pro živé organismy velice nebezpečné, bývají jeho hodnoty v atmosféře pravidelně sledovány. Cílem takovýchto pravidelných měření (v ČR prováděných 4x ročně) je zjištění intenzity převážně kosmického záření, které je právě atmosférou Země pohlcováno a filtrováno. [12]

V případě potenciálních jaderných havárií pak takováto forma měření může poskytnout údaje o uvolněném radioaktivním záření do vyšších vrstev atmosféry. [13]

Jako aerologická sonda v takovém případě může sloužit Geiger-Müllerova trubice, ve které dochází při průletu částice záření k ionizaci plynu, čímž dojde k výboji mezi dvěma elektrodami. [13]

2 Mezní vrstva atmosféry

Mezní vrstvou atmosféry se rozumí její nejspodnější část, která se nachází v oblasti troposféry. Proudění v této části atmosféry je, na rozdíl od celé její zbývající části, přímo ovlivňováno zemským povrchem, se kterým je mezní vrstva atmosféry v přímém kontaktu. Podrobná znalost této části atmosféry je klíčová jak pro přesné meteorologické předpovědi, tak i pro předpověď výsledného vlivu zdrojů znečištění ovzduší na jeho kvalitu v okolí. Jelikož však zemský povrch v každé části Země disponuje určitými rozdílnými charakteristikami, mohou být takové předpovědi značně komplikované. [14]

Z fyzikálního hlediska je v mezní vrstvě atmosféry vzduchové proudění ovlivňováno třemi odlišnými silami. První dvě síly jsou shodné jak pro mezní vrstvu, tak i pro volnou část atmosféry neboli tu část atmosféry, ve které se již tření o zemský povrch neprojevuje. Těmito silami jsou síla Coriolisova vyvolaná rotací Země a dále pak síla tlakového gradientu zapříčiněná nerovnoměrným rozvrstvením tlaku v atmosféře. Charakteristickou silou mezní vrstvy atmosféry je pak síla třecí, která bývá označována, jakožto síla brzdící. Výsledkem je změna velikosti a směru vektoru větru v prostoru. [15]

Výška mezní vrstvy atmosféry nad zemským povrchem se pohybuje ve většině případů v intervalu od 0,5 do 2 km [16] právě v závislosti na charakteristickém tvaru povrchu. Ještě obecněji je v některých případech její výška ztotožňována s hladinou 850 hPa. [15] Takovéto hodnoty jsou při současných technologiích v souladu se schopnostmi dostupů bezpilotních letadel, čímž se otevřely nové možnosti, jakými lze mezní vrstvu atmosféry pozorovat.

Podvrstvy mezní vrstvy atmosféry

Mezní vrstva atmosféry je dále dělena na následující podvrstvy:

- Laminární podvrstvu

Jedná se o tenkou podvrstvu bezprostředně přiléhající k zemskému povrchu s maximální tloušťkou v řádech několika centimetrů. Vzdálenost proudnic v této vrstvě je v celém poli konstantní. Výskyt této vrstvy lze předpokládat pouze nad dokonale vyhlazenými povrchy, jakými mohou být například sněhová pokrývka, případně klidná vodní hladina. Taková vrstva výrazně ovlivňuje radiální charakteristiku povrchu. [15]

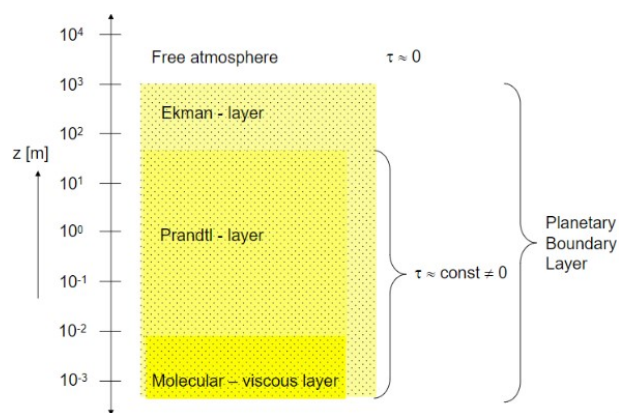
- Přízemní podvrstvu

Jedná se o vrstvu vyskytující se přímo nad zemským povrchem, případně nad laminární podvrstvou a sahá do přibližné výšky 50 metrů. V této vrstvě třecí síla výrazně převyšuje sílu Coriolisovu a sílu tlakového gradientu. Bývá také nazývána vrstvou konstantního toku, jelikož se směr větru v této vrstvě s rostoucí výškou nijak výrazněji nemění, případně ještě dále vrstvou Prandtlovou. [15]

- Spirální podvrstvu

Spirální neboli Ekmanovou vrstvou se rozumí taková část mezní vrstvy atmosféry, ve které velikost třecí síly klesá k hodnotám přibližně rovnajícím se velikostem Coriolisovy síly a síly barického gradientu. V této vrstvě se projevuje stáčení větru s rostoucí výškou, a to na severní polokouli směrem doprava a na jižní doleva. [16]

Schématické znázornění těchto podvrstev je uvedeno na obrázku 4.



Obrázek 4 - Schéma podvrstev mezní vrstvy atmosféry [17]

Způsoby vyhodnocování dění v mezní vrstvě atmosféry

Jak bylo zmíněno, znalost proudění v mezní vrstvě atmosféry, a tím pádem znalost rozvrstvení meteorologických a klimatologických prvků v konkrétních oblastech, je klíčová hned z několika důvodů. Predikce dění v této vrstvě je tak prováděna za pomoci několika různých metod. Jelikož do takových predikcí vstupuje velké množství proměnných od charakteristického chování vzduchu v závislosti na jeho fyzikálních vlastnostech po odlišnou členitost terénu, je správný odhad chování vzduchu komplexní a komplikovanou záležitostí. [16]

- **Matematické modelování**

Dění v mezní vrstvě atmosféry je popsitelné pomocí soustav matematických rovnic, které jsou vytvořeny pro danou konkrétní oblast a zohledňující dané předpokládané podmínky. Tvorba a řešení takovýchto soustav rovnic je však i při dnešních znalostech ve většině případů značně problematické a je proto nutné tyto soustavy zobecňovat a zjednodušovat. [15]

- **Přímé pozorování**

Přímé pozorování jevů v mezní vrstvě atmosféry je důležitou součástí matematického modelování. Právě na základě skutečných pozorovaných hodnot lze ověřit přesnost matematického modelu a v případě určité neshody jeho matematické vyjádření upravit. K tomuto účelu se jeví bezpilotní letadla, zejména pak ta dálkově řízená, jakožto ideální nástroj, díky kterému je možné do značné míry matematické modely zpřesňovat. [18] [15]

- **Fyzikální modelování**

Další z metod predikce chování v mezní vrstvě atmosféry je tvorba modelů konkrétních oblastí v daném měřítku a následné zkoumání chování proudění při ofukování modelu ve větrném tunelu. Takováto metoda přináší velmi přesné výsledky, ovšem za cenu vysokých pořizovacích nákladů. [15]

3 Druhy bezpilotních letadel vhodných pro aerologická měření

Bezpilotní letadla vhodná k využití jakožto nosičů měřicích sond lze rozčlenit do 4 kategorií. Každá z těchto kategorií má svá určitá specifika, která ovlivňují to, zda je vhodné daný druh zařízení využít pro určitou formu měření. Ještě, než se však k těmto konkrétním kategoriím dostaneme, je vhodné uvést alespoň základní obecné dělení bezpilotních letadel.

Rozdělení bezpilotních letadel

Jelikož na trhu existuje nespočet různých typů bezpilotních letadel, dají se tato zařízení rozdělit na základě určitých kritérií do několika různých kategorií. Na obrázcích 5 až 8 jsou uvedeny vybrané příklady různých druhů bezpilotních letadel, která jsou dále v tabulce 1 na následující straně zařazena podle zmiňovaných kritérií do konkrétních kategorií. Fotografie dalších, v tabulce zmiňovaných, konkrétních příkladů bezpilotních letadel jsou k nalezení v následujících kapitolách na dalších stranách této práce.



Obrázek 5 – Bezpilotní vrtulník LIAZ SkySpotter 150 [19] / Obrázek 6 – Bezpilotní meteorologický balón ČHMÚ [20]



Obrázek 7 – Bezpilotní vzducholod' AirshipClub X15 hybrid [21] / Obrázek 8 – Bezpilotní letoun RQ-4 Global Hawk [22]

| Kritérium | Podskupina | Typ | Konkrétní příklad |
|-----------------------------|------------------------------|---|---|
| Konstrukce | Těžší než vzduch | Vrtulník | LIAZ SkySpotter 150 |
| | | Letoun | SUMO |
| | | Multikoptéra | Meteosonde SSE |
| | Lehčí než vzduch | Balón | Meteorologický balón ČHMÚ |
| | | Vzducholoď | AirshipClub X15 hybrid |
| Účel | Civilní | Rekreačně-sportovní | DJI Mavic Pro |
| | | Letecké práce | Meteosonde SSE |
| | | Služba pátrání a záchrany | DJI Matrice 200 |
| | Vojenské | Průzkumné | RQ-4 Global Hawk MQ-1 Predator MQ-9 Raper |
| | | Zaměření cíle a návnada | |
| | | Bojové | |
| Výzkumné | | | |
| Typ pohonu | Bezmotorové | Balón | Meteorologický balón ČHMÚ |
| | | Vzducholoď | AirshipClub X15 hybrid |
| | | Kluzák | LG-1K |
| | Motorové | Elektrický | DJI Mavic Pro |
| | | Pístový | MQ-1 Predator |
| | | Proudový | RQ-4 Global Hawk |
| | | Hybridní | Skyfront Perimeter |
| Kritérium | Podskupina | Poznámka | |
| Maximální vzletová hmotnost | $\leq 0,91$ kg | Takto jsou definované hmotnosti v Doplnku X předpisu L2 | |
| | $0,91$ kg < a < 7 kg | | |
| | 7 kg \leq a ≥ 25 kg | | |
| | 25 kg < | | |
| Typ vzletu a přistání | Vertikální | Vzlet a přistání ve vertikálním směru | |
| | Konvenční | Vzlet a přistání v podélném směru | |
| Stupeň automatizace řízení | Manuální | Letadlo ovládané dálkově řídicím pilotem, který pohybuje řídicími prvky (páčkami). | |
| | Poloautomatické | Letadlo zůstává v pilotem nastaveném letu na řídicí stanici. Pilot však může kdykoliv převzít plnou kontrolu nad letadlem | |
| | Automatické | Letadlo provádí let podle nastaveného programu, který byl vložen do autopilota dálkově řídicím pilotem. Pilot však stále může průběh letu ovlivnit. | |
| | Autonomní | Letadlo má naprogramovaný let, který dálkově řídicí pilot nemůže v průběhu letu ovlivnit | |

Tabulka 1 - Rozdělení bezpilotních letadel [21]

Meteorologický balón

Definice: Meteorologickým balónem se rozumí letadlo lehčí než vzduch, které není poháněno motorem a které se udržuje v letu buď pomocí plynu, nebo palubního hořáku, které je do atmosféry vypouštěno za účelem získání meteorologických dat. [23]

Základní a zároveň nejstarší formou bezpilotního letadla, které slouží jako nosič meteorologických sond, v rané fázi zejména pak těch teplotních, vynášených do atmosféry, je právě meteorologický balón. Byl poprvé využit koncem 19. století ve Francii. Balóny byly v tomto období plněny plynem, který se v noci vlivem ochlazování postupně vypouštěl, což způsobilo zpětný pokles balónu k zemskému povrchu. Jelikož byl však celý proces výstupu i sestupu ovlivněn snosem větru, kterému byl balón vystaven po poměrně dlouhou dobu, v řádu několika hodin, byla následná úspěšnost lokalizace a tím pádem získání naměřených dat, která bylo nutné odečíst z mechanického záznamového pásku, velice malá. [1]

Začátkem 20. století byly balóny zdokonaleny, a to takovým způsobem, kdy materiál balónu umožňoval značné rozpínání plynu a následnou explozi ve vyšších vrstvách atmosféry. Záznamové zařízení bylo doplněno o malý padákový systém, čímž se minimalizovalo riziko destruktivního pádu zařízení na zemský povrch. Jelikož celý proces takto vypuštěného balónu a následně zpětného pohybu měřicího zařízení trvalo o poznání kratší dobu, byla následná lokalizace naměřených dat snazší a úspěšnější. [1]

K zásadnímu průlomů ve sběru aerologických dat došlo ve třicátých letech minulého století, kdy byly poprvé vypuštěny do stratosféry meteorologické balóny, které disponovaly radiosondami vysílajícími naměřená data zpět k pozorovatelům bez nutnosti nalezení záznamového zařízení po návratu na zemský povrch. Na základě tohoto principu pracují meteorologické balóny dodnes. [1]

V současnosti je na celém světě každý den pravidelně do atmosféry vypuštěno přibližně 900 meteorologických balónů, toto číslo tak z balónů dělá nejvyužívanější bezpilotní letadlo, které se v meteorologii uplatňuje. K balónům jsou v naprosté většině případů připevňována zařízení schopná zaznamenávat teplotu, vlhkost, atmosférický tlak a zařízení schopná určovat polohu balónu za pomoci satelitního navigačního systému. V určitých případech jsou pak balóny doplňovány o sondy měřící například přítomnost ozonu či sondy radioaktivity. [1]

Bezpilotní letoun

Definice: Bezpilotním letounem se rozumí motorové letadlo bez pilota na palubě s nepohyblivými křídly, těžší než vzduch, které je schopno letu působením aerodynamických sil na jeho křídla. [23]

Myšlenka a provedení prvních úspěšných letů s bezpilotními letouny jsou datovány do první poloviny 20. století. [24] Nicméně k významnému využití takových zařízení v meteorologických pozorováních došlo o mnoho desítek let později, zejména pak až v prvním desetiletí 21. století. [25]

V závislosti na jejich velikosti, dostupu a výdrži lze tato zařízení dále rozdělit do následujících kategorií: [25]

- LASE (Low Altitude, Short Endurance)

Zařízení s dostupem do hodnoty 1500 metrů nad mořem a výdrží v řádech několika desítek minut až dvou hodin. Hmotnost zařízení se pohybuje do 5 kilogramů a rozpětí křídel nepřesahuje 3 metry.

- LALE (Low Altitude, Long Endurance)

Zařízení s dostupem shodným s kategorií LASE, jejich výdrž ve vzduchu se však pohybuje v řádech několika hodin, jsou zpravidla větších rozměrů a hmotností.

- MALE (Medium Altitude, Long Endurance)

Zařízení s dostupem do 9000 metrů nad mořem a výdrží několika hodin až desítek hodin. Letouny s výdrží celého dne nejsou výjimkou. Maximální vzletová hmotnost letounů této kategorie může přesahovat hodnotu jedné tuny.

- HALE (High Altitude, Long Endurance)

Největší a nejkompexnější zařízení s dostupem až do 20 000 metrů nad mořem a výdrží okolo 30 hodin. Maximální vzletová hmotnost může dosahovat až několika desítek tun. Cena takovýchto letounů se pohybuje v řádech stovek tisíc dolarů. Jedná se však o jediná bezpilotní letadla vyjma balónů a vzducholodí, která jsou schopná provádět pozorování v oblasti stratosféry.

Multikoptéra

Definice: Multikoptérou se rozumí motorové, vrtulové letadlo s přibližně svislou osou rotace nosných pohonných jednotek. Aerodynamická síla je vyvozována na nosných vrtulových listech. Pohyb letadla je realizován změnou otáček vrtulí. [23]

Během posledních deseti let se vývoj a schopnosti u multikoptér posunuly o velký krok kupředu. V porovnání s ostatními kategoriemi bezpilotních letadel zažívá tato kategorie v posledních letech největší posun v dostupných technologiích. Nabízí se tak otázka, které je věnována praktická část této práce, a to, zda i zařízení tohoto formátu mohou posloužit k meteorologickým účelům. Výhodou těchto zařízení je především jejich schopnost vertikálního vzletu a tím pádem nulové požadavky na vzletovou dráhu, schopnost udržovat stacionární polohu, malé rozměry, nízké pořizovací a provozní náklady a snadné ovládání. Na druhou stranu víření vzduchu od jednotlivých vrtulí může do jisté míry negativně ovlivnit schopnost zaznamenávat jednotlivé meteorologické prvky. [26] [27]

Bezpilotní vzducholod'

Definice: Bezpilotní vzducholodí se rozumí letadlo bez pilota na palubě lehčí než vzduch s pohonem. [23]

Vzducholodě ve své bezpilotní a dálkově řízené podobě těží zejména ze své schopnosti setrvat v určité poloze ve vzduchu po poměrně dlouhou dobu za cenu nízké spotřeby energie a zároveň s výhodou téměř nulového rozvíření vzduchu ve svém okolí. Na druhou stranu omezená obratnost, jak v horizontálním tak ve vertikálním směru oproti bezpilotním letounům či multikoptérám, negativně ovlivňuje možnost využít takové zařízení pro zkoumání dynamicky se měnících meteorologických prvků v rozsáhlejší oblasti.

Právě díky zmíněným vlastnostem je však tato forma bezpilotního letadla vhodná k pozorování kvality ovzduší. [28]

Další pozitivní vlastností spjatou s bezpilotními vzducholoděmi je jejich potenciální vysoký dostup, díky kterému mohou být vzducholodě využívány k pozorování prvků a jevů ve stratosféře, mezi které se řadí například již zmíněná koncentrace ozonu. [29]

4 Konkrétní příklady využití bezpilotních letadel v meteorologii

4.1 ČHMÚ – Meteorologický balón

V České republice jsou pravidelná aerologická měření prováděna Českým hydrometeorologickým ústavem. Ten k této činnosti využívá po mnoho desítek let postupem času inovované meteorologické balóny.

Historie

První aerologická měření na našem území proběhla roku 1946 na Ruzyňském letišti. Tehdy se však ještě jednalo o pokusná měření, která neprobíhala v pravidelně stanovených intervalech. To se změnilo o 3 roky později, kdy bylo roku 1949 zahájeno první pravidelné aerologické pozorování v České republice, a to konkrétně na letišti v pražských Kbelích. Tato měření byla prováděna každý den ve 3 hodiny středoevropského času. Od roku 1950 pak měření probíhala dvakrát denně, a to v časech 3 a 15 hodin. V průběhu nadcházejících let byly časy vypouštění meteorologických balónů na obou letištích postupně rozšiřovány. V některých časech však nebyly měřeny všechny základní meteorologické prvky, mezi které patří údaje o teplotě, vlhkosti, tlaku a větru. Dalšími důležitými milníky se staly roky 1967, kdy bylo zahájeno nepravidelné měření na stanici v Praze Libuši, a posléze rok 1974, od kterého na této pražské stanici probíhají pravidelná měření všech základních meteorologických prvků do dnes. [30]

Současná podoba měření

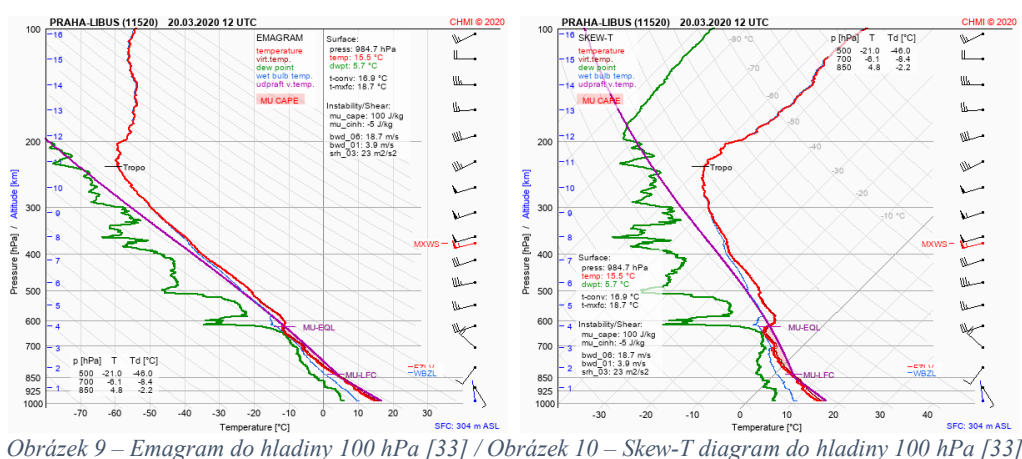
V současnosti provádí Český hydrometeorologický ústav pravidelná každodenní aerologická měření všech základních meteorologických prvků v časech 00, 06 a 12 hodin UTC. Měření je prováděno s pomocí systému dodaného finskou společností Vaisala. Komunikace mezi radiosondou a pozemním zařízením probíhá s pomocí frekvenčně modulovaných radiových vln v pásmu 400MHz. Výsledná naměřená data jsou zakódována do meteorologických zpráv TEMP, BUFR a PILOT, ty jsou posléze dále zpracovávány k tvorbě aerologických diagramů nebo předpovědních modelů. Jelikož je stanice v Praze Libuši zařazena do sítě aerologických stanic Světové meteorologické organizace, jsou data také dále šířena na mezinárodní úrovni. [31] [30]

Tato stanice mimo základní meteorologické prvky pozoruje za pomoci meteorologických balónů hodnoty koncentrace ozonu v atmosféře a intenzitu přítomného radioaktivního záření. Jelikož ozon v atmosféře vzniká za přítomnosti slunečního záření, je klíčové znát hodnoty jeho koncentrace především v zimních měsících, kdy jsou živé organismy jeho nedostatkem více ohroženy. Proto probíhají tato měření 3x týdně pouze v měsících od ledna do dubna. Radioaktivita je pak v současnosti pravidelně měřena 4x do roka. [11] [13]

Sondy využívané k měření základních meteorologických prvků nejsou v současnosti určeny k opakovanému použití, proto jsou při případném nálezů brány jakožto běžný elektronický odpad, v případě nálezů ozonové sondy se však počítá s možností jejího opětovného využití a Český hydrometeorologický ústav požaduje po případných nálezích jejich navrácení. [32]

Výstupy měření

Český hydrometeorologický ústav poskytuje z pravidelného každodenního aerologického sondování veřejnosti na svých webových stránkách 5 různých grafických výstupů společně s tabulkou hodnot pro vybrané výškové hladiny. Jedná se o 2 emagramy znázorňující měřené veličiny do tlakových hladin 500 hPa a 100 hPa, Skew-T diagram do hladiny 100 hPa, diagram vývoje větru do hladiny 100 hPa a hodograf informující o situaci do nadmořské výšky 12 kilometrů. Obrázky 9 a 10 jsou uvedeny jakožto příklady dvou základních diagramů. Zároveň je z nich patrný rozdíl mezi poskytovaným emagramem a Skew-T diagramem, kdy jsou ve Skew-T diagramu izotermy pro efektivnější využití celé plochy grafu znázorněny jakožto přímky svírající s vodorovnou osou grafu namísto pravého úhlu, jako je tomu u emagramu na obrázku číslo 9, úhel o velikosti 45°. To je zřejmé například na oblasti instabilního zvrstvení vzduchu, které bylo v danou chvíli aerologicky zaznamenáno v přibližné nadmořské výšce od 2 do 3 kilometrů. [33] [34]



Obrázek 9 – Emagram do hladiny 100 hPa [33] / Obrázek 10 – Skew-T diagram do hladiny 100 hPa [33]

S pomocí takovýchto diagramů lze dále předpovídat ve vertikální rovině oblasti s potenciální hrozbou turbulence, stříhu větru, přítomnosti mrznoucího deště a námrazy nebo například konvektivní činnosti. Právě na konvektivní činnost a následnou možnou hrozbu v podobě tvorby bouří je upozorňováno několika meteorologickými indexy, které jsou s pomocí Skew-T diagramů počítány a následně v nich uváděny.

Jedná se především o indexy CIN a CAPE, které jsou v ukázkových diagramech na obrázcích 9 a 10 také uváděny. CIN index reprezentuje energii potřebnou k výstupu částice z přízemní vrstvy do hladiny volné konvekce. Tento údaj je podstatný v případě, kdy je pod vrstvou instabilního zvrstvení atmosféry přítomno zvrstvení stabilní, které je schopné adiabatickému výstupu částic z přízemní vrstvy atmosféry bránit. Tento index je počítán na základě následující rovnice. [35]

$$CIN = \int_{z_0}^{HVK} g \cdot \frac{T' - T}{T} dz \quad 2$$

- z_0 značí přízemní hladinu [m]
- HVK značí hladinu volné konvekce [m]
- g je gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
- T' je virtuální teplota vystupující částice [K]
- T je virtuální teplota okolního vzduchu [K]

Druhý z indexů, index CAPE, naopak reprezentuje dostupnou energii k tvorbě konvekčních procesů v oblasti instabilního zvrstvení vzduchu. Jeho výpočet probíhá s pomocí rovnice následující (3), která integruje přes křivku počínající v hladině volné konvekce až do bodu odpovídajícímu hladině nulového vztlaku (HNV). Tento index je velice důležitým parametrem pro zhodnocení termiky. Cape hodnoty pod 50 J/kg/K značí výskyt slabé a například pro plachtaře ne příliš využitelné termiky. Hodnoty od 100 J/kg/K do 200 J/kg/K odpovídají stoupavým proudům o rychlostech 1-3 m/s, tvorba oblaků Cu congestus je spjata s CAPE hodnotou v rozmezí 500-800 J/kg/K a pro hodnoty 600-1000 J/kg/K je pak vysoká pravděpodobnost bouřek. [34]

$$CAPE = \int_{HVK}^{HNV} g \cdot \frac{T' - T}{T} dz \quad 3$$

4.2 Pozorování tropických cyklón

Z důvodu devastujících účinků je pozorování tropických cyklón komplikovanou záležitostí. K předpovídání a pozorování polohy těchto cyklón se v současnosti využívá především satelitních technologií, dat z plovoucích bójí, informací z obchodních lodí a letadel a dat z pozemních radarových systémů. Konkrétní data o stavu ovzduší uvnitř a v okolí tropických cyklón však musí být získávána zařízeními, která se v daném místě nachází. K takovému účelu pak v současnosti slouží především speciálně upravené letouny, které se dostávají do oka hurikánu či jeho okolí ve vyšších vrstvách atmosféry. Následně jsou z těchto letadel vypouštěny spolu s padákovým systémem radiosondy, které mapují vertikální profily meteorologických prvků v oblasti výskytu tropické cyklóny. Takto využívají například Hurricane Hunters spadající pod americký úřad NOAA ke svému působení dvě upravená letadla Lockheed WP-3D Orion, která jsou schopna ustát nepříznivé podmínky, které panují ve stěně oka tropické cyklóny a jeden letoun typu Gulfstream IV-SP, který slouží pro pozorování dění v okolí cyklóny. Nicméně z bezpečnostního i ekonomického hlediska se jeví náhrada pilotovaných letadel těmi bezpilotními jakožto žádoucí. [36]

Bezpilotní letouny však nemusí být v této oblasti pouhou náhradou letounů pilotovaných. Velkým přínosem je také možnost pozorování v nižších výškách, ve kterých by let pro letadlo s posádkou nebyl bezpečným. [37]

Vůbec prvním bezpilotním letadlem, které úspěšně proniklo do oka tropické cyklóny, se stal letoun vyvinutý americkou společností Insitu nesoucí název Aerosonde Mark III v roce 2005. Konkrétně šlo o tajfun Longwang v oblasti Tichého oceánu. Jednalo se o veliký úspěch právě v oblasti zkoumání tropických cyklón za pomoci bezpilotních letadel, o čemž svědčí také fakt, že společnost Insitu se o dosažení tohoto úspěchu pokoušela již řadu let předtím. K prvnímu pokusu došlo již roku 2000 za pomoci zařízení Aerosonde Mark I. Tento pokus nicméně společně s dalšími pěti provedenými v letech 2000 až 2004 skončil pádem letounu v oblasti silného deště v okolí oka ještě před tím, než se do něho podařilo proniknout. [37]

Aerosonde Mark III je bezpilotní letoun kategorie MALE s výdrží dosahující 30 hodin a poháněný spalovacím motorem. V průběhu úspěšného letu byl vybaven senzory vlhkosti, teploty, tlaku a zařízením zaznamenávajícím údaje o rychlosti a směru větru od finské společnosti Vaisala, která tato zařízení vyrábí primárně pro účely sondování za pomoci meteorologických balónů. Mezi uživatele zařízení od této konkrétní společnosti patří mimo jiné i Český hydrometeorologický ústav. [37] [30]

V současnosti, po 15 letech od prvního úspěšného proniknutí bezpilotního letadla do oka tropické cyklóny, je však úplná náhrada posádkou řízených letounů právě letadly bezpilotními stále ještě ve fázi výzkumu, nicméně vývoj v tomto směru neustále probíhá. Již zmíněný úřad NOAA pracuje na vývoji bezpilotního letounu označovaného Coyote. Účelem tohoto zařízení však není úplná náhrada letounů s posádkou, nýbrž spíše náhrada, popřípadě doplnění, vypouštěných měřicích sond. Jedná se totiž o letoun, který je primárně vypouštěn z průzkumného letounu Lockheed WP-3D Orion a prozkoumává tropické cyklony v jinak nepřístupných nižších výškách. Vedle senzorů základních meteorologických prvků je tento letoun také vybaven infračerveným snímačem zaznamenávajícím teplotu oceánu, což vede opět k prohloubení znalostí, které má lidstvo o vývoji tropických cyklón k dispozici. [38]

Dalším úřadem, který je v oblasti výzkumu tropických cyklón za pomoci bezpilotních letadel činný, je americká NASA. Prvního zásadního úspěchu dosáhla během své mise GRIP věnované právě výzkumu a zdokonalení předpovědí chování tropických cyklón. Dne 2. září roku 2010 byl poprvé proveden přelet skrze vrchní část oka hurikánu Earl, který toho času dosahoval 4. kategorie Saffirovy-Simpsonovy stupnice za pomoci bezpilotního letounu RQ-4 Global Hawk vyvinutým právě v NASA. Tento bezpilotní letoun kategorie HALE, primárně vyvinutý pro vojenské účely, původně k meteorologickým pozorováním sloužit neměl, nicméně na základě této události se jeho potenciál v této oblasti úspěšně prokázal. Na celé misi NASA spolupracovala společně s úřadem NOAA, který další vývoj letounu RQ-4 Global Hawk pro pozorování tropických cyklón podpořil. [39]

Samotný úřad NOAA pak tento bezpilotní letoun využil poprvé k zaznamenávání a vyhodnocování dat v reálném čase ze sond, které byly z letounu vypuštěny nad okem hurikánu Gaston v rámci projektu SHOUT v roce 2016. Cílem tohoto projektu probíhajícího mezi lety 2015 a 2017, bylo vyhodnocení efektivity a ekonomiky využití bezpilotních letadel, primárně kategorie HALE, k pozorování nebezpečných meteorologických jevů. Závěrečná zpráva uveřejněná v lednu roku 2018 hovoří o tom, že právě na základě pokusů prováděných s letounem RQ-4 Global Hawk lze říci, že jsou taková zařízení k tomuto účelu vhodná, a to jak z pohledu provozních nákladů, tak z pohledu bezpečnosti. Zpráva dále zmiňuje nutnost dalších kroků, které by budoucnost bezpilotních letadel v této oblasti podpořily, mezi ně pak patří zejména zjednodušení administrativy, zvýšení počtu kvalifikovaného personálu schopného takové operace provádět a v neposlední řadě také zajištění podpory projektům tohoto charakteru napříč celou agenturou. [40]

4.3 Monitorování vývoje oblačnosti

Prozkoumání a znalost stavu prvků v atmosféře je klíčovou pro správné předpovězení vývoje oblačnosti. I když jsme při současných technologiích a znalostech schopni tvorbu jednotlivých typů oblačnosti ve velkém množství případů předpovědět, stále dochází k situacím, ve kterých není přesný původ daného stavu zřejmý. Zásadní proto také není pouze určení druhu oblačnosti, která se v daný okamžik bude nad určitým územím vyskytovat nýbrž právě i její následný vývoj společně s mohutností. Bezpilotní letadla jsou pak ideálními zařízeními, s pomocí kterých je možné pozorovat reálné stavy meteorologických prvků, které mohou být následně na základě pozorování přiřazovány k určité podobě následného vývoje. [41]

V této oblasti v současnosti dochází ke snaze vytvoření zařízení, které by bylo schopné na jedné straně pozorovat zmíněný vývoj meteorologických prvků a na straně druhé využít přítomných stoupavých proudů k minimalizaci energetické náročnosti. Cílem tedy je vytvořit algoritmus, který by zajišťoval, aby se bezpilotní letadlo bylo schopno udržet za vhodných podmínek ve vzduchu bez nutného zásahu člověka po co nejdelší časový interval, ale zároveň by bylo schopné efektivně pozorovat vývoj prvků. Takové zařízení by pak bylo potenciálně schopno ve vzdušném prostoru operovat po dobu přítomnosti stoupavých proudů, což značí, že by bylo vhodné zejména k pozorování oblačnosti kupovité, která je výskytem stoupavých proudů charakteristická. Počítá se tedy s využitím motorového bezpilotního kluzáku, který by nejprve vystoupal do požadované výšky za pomoci vlastní pohonné jednotky a následně by se v oblastech výskytu stoupavých proudů držel ve vzduchu nezávisle na svém pohonu. Vertikální profil letu by probíhal takovým způsobem, kdy by kluzák opakovaně úmyslně opouštěl stoupavé proudy a opět se do nich po vyklesání určité výšky za účelem zmapování prvků v okolních oblastech navracel. Pro zefektivnění takových pozorování se počítá s využitím vícero kluzáků v jeden okamžik v dané oblasti. [41]

V současnosti je takovéto využití bezpilotních letadel v rané fázi vývoje, kdy jsou prováděny počítačové simulace navržených algoritmů, které by výše zmíněné principy zajišťovaly [41], nicméně není vyloučeno, že se takovýto druh pozorování do budoucna prosadí a stane se jedním ze zdrojů dat pro krátkodobou předpověď vývoje oblačnosti.

4.4 NASA

Již jednou zmíněný úřad NASA je v oblasti vývoje bezpilotních letadel obecně jedním z nejpokročilejších s mnohaletou historií. Výzkum v oblasti meteorologie spjaté právě s bezpilotními letadly zahájil v 70. letech minulého století svým programem „Mini-Sniffer“. Cílem programu bylo vytvoření HALE zařízení pro pozorování stavu ovzduší ve výškách dosahujících přes 20 000 m. n. m. Takové zařízení se však kvůli komplikacím s pohonnou jednotkou, která měla za účelem schopnosti operovat ve vysokých nadmořských výškách spalovat palivo na bázi hydrazinu, sestrojil nepodařilo. Program tak byl v 80. letech zastaven. [25]

V 90. letech vznikl v této oblasti další program, volně navazující na původní, nesoucí název ERAST. Jeho cílem bylo prozkoumání dalších možností a technologií, které by se ve vývoji bezpilotních letadel pro atmosférická pozorování mohly uplatnit, a zároveň sestrojení konkrétního zařízení, jehož provoz by byl ekonomický a efektivní. Výsledkem tohoto programu byl vznik několika různých bezpilotních letadel, díky kterým začal být tento druh zařízení využíván v dalších projektech zkoumajících stavy atmosféry. Jedná se například o letouny Altus, Pathfinder či Altair. V tabulce 2 jsou pak uvedeny konkrétní projekty, při kterých byla tato zařízení využita. [42]

| Program | Datum | Bezpilotní letoun | Popis programu |
|---------------------------------------|--------------------|------------------------------|---|
| ERAST | Od 1995 Do 2003 | Altus, Pathfinder, Altair | Demonstrování technologií |
| Atmospheric Radiation Measurement | Od 1994 | Gnat, Altus | Měření radiace v ovzduší |
| UAV Science Demonstration Projects | Od 2001 Do 2003 | Altus | Měření elektrického pole v oblačnosti typu Cumulus |
| UAV Science Demonstration Projects | Od 2001 Do 2003 | Pathfinder | Měření stavů atmosféry za účelem zefektivnění pěstitelství |
| FiRE | 2001 a 2006 | Altus Altair | Monitorování přírodních požárů |
| Channel Islands | 2001 | Altair | Mapování pobřeží, barvy oceánu a chemického složení atmosféry |

Tabulka 2 - Příklady NASA programů s využitím bezpilotních letadel [42]

Dalším zajímavým zařízením, respektive prototypem zařízení, které v rámci projektu ERAST vzniklo, byl bezpilotní HALE letoun Helios. O pohon tohoto zařízení se staralo 14 elektromotorů¹, které získávaly energii ze solárních panelů umístěných nad křídly s rozpětím 75,3 metrů. Letoun Helios pak stanovil roku 2001 stále aktuální světový rekord v nejvyšší dosažené nadmořské výšce, která činila 96 863 stop, a to jak v kategoriích vrtulových letadel, tak v kategorii letadel poháněných solární energií. Vývoj letounu byl však roku 2003 ukončen poté, co byl prototyp zničen při nehodě. [43]

V průběhu prvních dvou desetiletí 21. století provedla Armstrong Flight Research Center společně s Ames Research Center spadající pod NASA celou řadu projektů zaměřených na další výzkum v této oblasti. Mezi nejvýznamnější úspěchy patří vedle již na předchozích stranách zmíněného zkoumání vlastností tropických cyklón s pomocí bezpilotního letounu RQ-4 Global Hawk ještě další.

NASA SIERRA

Sensor Integrated Environmental Remote Research Aircraft je bezpilotním letounem kategorie MALE, které bylo poprvé využito roku 2009. Jedná se o letoun, jehož maximální vzletová hmotnost činí 180 kilogramů, ze kterých může být 45 kilogramů nákladu v podobě zařízení pro měření různých meteorologických prvků podle aktuální potřeby s až desetihodinovou výdrží, dostupem 3600 metrů a schopností letět rychlostí až 100 kilometrů za hodinu. SIERRA našlo uplatnění v následujících projektech. [25]

- CASIE (2009): Měření vlastností ledovců za polárním kruhem severně od Špicberských ostrovů.
- RAM-GGM (2011): Projekt zaměřený na lokalizaci úniků metanu do ovzduší a měření jeho koncentrace s úniky spojené.
- High Resolution Assessment of Carbon Dynamics in Seagrass and Coral Reef Biomes (2011-2013): Multispektrální a hyperspektrální snímkování mořských řas a korálů²

¹ V pozdějších fázích vývoje byl počet elektromotorů zredukován na 10

² Projekt není přímo spjat s meteorologií, nicméně demonstruje možnosti využití zařízení SIERRA

NASA Ikhana

NASA Ikhana je dalším bezpilotním letounem uvedeným do provozu na přelomu prvního desetiletí 21. století. Tento letoun vychází z primárně vojensky určeného modelu General Atomics MQ-9 Reaper a jeho primárním účelem je zkoumání přírodních požárů a jejich vlivů. [25]

Technologie senzorů infrazvuku

Roku 2013 vyvinuli vědci z Langely Research Center spadajícího pod NASA zařízení, přesněji řečeno mikrofon, který je schopný detekovat zvukové vlnění v oblasti infrazvuku, jehož hodnoty frekvence se vyskytují pod 20 hertzy a zároveň dokáže spolehlivě odfiltrovat frekvence nechtěné. Bylo zjištěno, že právě zvukové vlnění v oblasti infrazvuku je vyvoláno během mnoha nebezpečných meteorologických jevů, jako jsou například turbulence v čistém ovzduší, turbulence v úplavu, stříh větru, microburst, seizmická aktivita, tornádo nebo tropická cyklóna. Infrazvuk související s aktivitou rozsáhlejších rozměrů³ je možné registrovat ve vzdálenostech dosahujících stovky námořních mil s tím, že ani stěny či pohoří nejsou pro jeho šíření zásadní překážkou. NASA dále uvádí, že série 30 detekčních zařízení je dostatečná pro pokrytí celých Spojených států amerických. Pro detekci jevů lokálního charakteru⁴ je pak vhodné takový senzor umístit do bezprostředního okolí letiště. [44]

Ještě lepších detekčních charakteristik je však teoreticky možné docílit v případě, kdy by byl takovýto senzor vynesena přímo do vyšších vrstev atmosféry. Roku 2017 si NASA podala žádost o patentování bezpilotního letounu, který je o výše popsaný senzor infrazvuku doplněn. Takové zařízení pak NASA prezentuje jakožto možnou náhradu meteorologických balónů, které by však mimo měření běžných hodnot meteorologických prvků bylo schopné lokalizovat a pozorovat nebezpečné meteorologické jevy. Mělo by se jednat o zcela nový bezpilotní letoun, nikoliv tedy pouhé doplnění infrazvukového senzoru k již existujícímu zařízení, na kterém je zajímavá také mimo jiné plánovaná konstrukce křidel, ta by měla být potenciálně schopna měnit svoji geometrii v závislosti na aktuální nadmořské výšce. [45] [46]

V současnosti je tato žádost o patentování v procesu vyřizování. Pokud bude v budoucnu rozhodnuto o udělení patentu a NASA dokáže takovéto zařízení úspěšně sestrojít, bude se jednat v oblasti meteorologických bezpilotních letadel o velmi zásadní pokrok.

³ Například tropické cyklóny, tornáda, bouře, seizmická aktivita

⁴ Například turbulence v úplavu, microburst

4.5 Meteomatics

Jednou z mála společností, která se prosadila v oblasti využití bezpilotních multikoptér, je švýcarská firma Meteomatics. Cíl této společnosti lze charakterizovat jakožto přímou náhradu meteorologických balónů bezpilotními multikoptéry. Myšlenka společnosti je založena na zdokonalení meteorologických předpovědních modelů díky zvýšenému počtu míst, ve kterých lze takováto měření provádět, zkrácení intervalů mezi měřeními a společně s tím využití přesnějších měřicích senzorů. To vše díky schopnosti zamezení ztrátovosti bezpilotních letadel, která jsou za tímto účelem využívána. [47]

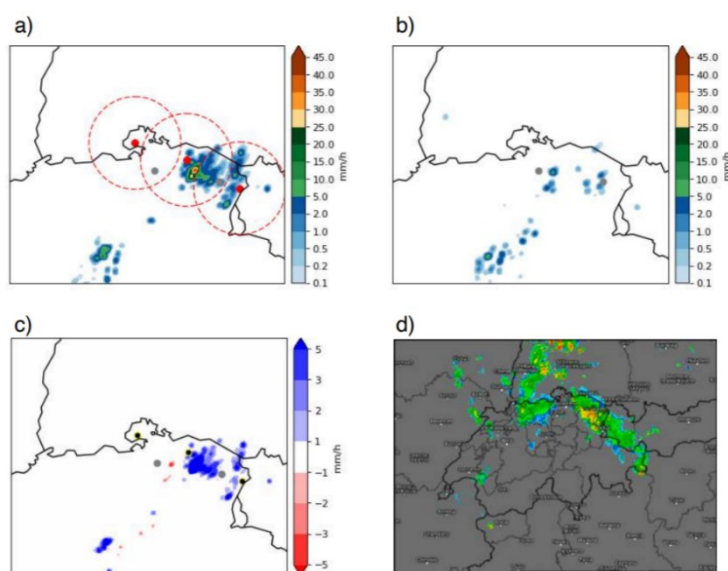
Současné numerické předpovědní modely jsou založeny především na termodynamických zákonech a Navier-Stokesových rovnicích. Tento fakt však s sebou přináší dvě zásadní komplikace. [47]

1. Úspěšné vyřešení Navier-Stokesových rovnic vyžaduje jistou míru aproximace.
2. Pro tvorbu předpovědního modelu je nutné znát počáteční stav atmosféry.

Díky současným velice výkonným meteorologickým počítačům se daří vliv prvního problému aproximace neustále redukovat, nicméně stále je v této oblasti prostor pro zdokonalení předpovědních modelů. [47]

Zajímavější je však v otázce bezpilotních letadel zmíněný druhý problém. Satelitní technologie v současnosti mohou poskytovat dostatečné informace z vyšších vrstev atmosféry, nicméně právě dynamicky se měnící mezní vrstvu atmosféry, která navíc bývá původcem bouří, mlhy či nízké oblačnosti, je třeba sledovat za pomoci technologií odlišných. Takové možnosti pak přináší pozemní radary, pozemní atmosférické lidary, údaje z dopravních letadel nebo právě bezpilotní letadla. Radary společně s atmosférickými lidary však s sebou přináší určité komplikace, jako jsou například vysoké náklady na pořízení či provoz, omezenou mobilitu, schopnost sledovat pouze omezené množství parametrů, která může být navíc dále omezena nepříznivými meteorologickými podmínkami. Údaje z dopravních letadel zase poskytují informace z mezní vrstvy pouze na omezeném území, jelikož se po většinu času vyskytují nad touto vrstvou. V letošním roce 2020 se navíc ukázala dostupnost takto získávaných dat jakožto zranitelná v důsledku razantní redukce leteckého provozu v souvislosti s koronavirovou pandemií. Meteorologické úřady proto začaly hledat vhodné technologie, kterými by bylo možné takovouto ztrátu dat kompenzovat. Způsob, jakým fungují multikoptéry právě například společnosti Meteomatics se jeví jakožto náhrada vhodná. [47] [48]

Společnost Meteomatics vyvinula 3 druhy multikoptér, které se liší svojí velikostí. Zásadní rozdíly mezi jednotlivými modely jsou odlišné hodnoty dostupu, výdrže a množství instalovaných senzorů. Základní model Meteosonde SSE, znázorněný na obrázku 12, disponuje dostupem 1500 m n. m. s průměrnou výdrží 12 minut. Druhý model Meteosonde Classic je schopný dostoupat do výšky 3000 m n. m. a ve vzduchu se udržet minut 20. Nejpokročilejší model Meteosonde XL zvládá dostup taktéž 3000 m n. m., avšak jeho výdrž činí minut 40. Každá multikoptéra je spjata s mobilní pozemní stanicí, ze které je vypouštěna, a na kterou se automaticky sama navrácí. Naměřená data jsou zaznamenávána na paměťové zařízení zabudované uvnitř multikoptéry a zároveň přenášena pomocí radiové komunikace primárně na frekvenci 2,4 GHz do pozemní stanice. Společnost provádí za pomoci těchto zařízení pravidelná měření, se získanými daty obchoduje a tvoří z nich vlastní předpovědní model. [47]



Obrázek 11 - Možný vliv využití zařízení společnosti Meteomatics ke zpřesnění meteorologické předpovědi [47]

Na obrázku 11a jsou k vidění předpovědní data pro severní část Švýcarska ze dne 29. května 2017 vytvořená za pomoci dat z multikoptér Meteosonde. Obrázek 11b pak znázorňuje předpověď, která vychází z dat poskytovaných Evropským centrem pro střednědobou předpověď počasí. Obrázek 11c znázorňuje rozdíl těchto předpovědí a na obrázku 11d je k vidění skutečná situace v daný den z meteorologického srážkového radaru. [47]

Do budoucna společnost plánuje především zdokonalení vlastností svých multikoptér, a to zejména v oblasti dostupu a schopnosti odolávat silnému větru. Překážkou v provádění pozorování ve vyšších výškách však nejsou pouze technické schopnosti vyvíjených multikoptér, nýbrž také legislativní omezení. Již nyní musí všechna prováděná aerologická

sondování při takovémto druhu provozu podléhat schválení příslušnými leteckými úřady, které tuto činnost následně publikují ve zprávách NOTAM. [47]



Obrázek 12 - Multikoptéra společnosti Meteomatics [49]

4.6 SUMO – Bezpilotní letoun

Jedním z dalších zařízení, která se projevila do dnešní doby jako velice účinná a spolehlivá pro provádění meteorologických pozorování, je zařízení SUMO. Právě na tomto zařízení jsou na následujících stranách demonstrovány další možnosti a účely, k jakým tento bezpilotní letoun může posloužit společně s popisem tohoto konkrétního zařízení.

Obecné informace

Small Unmanned Meteorological Observer neboli SUMO, je malým bezpilotním letounem vyvinutým vědci z Geofyzikálního institutu Norské Univerzity v Benu. První let byl proveden v roce 2007. Celé zařízení bylo vyvinuto na základě komerčně dostupného modelu letadla a doplněno o příslušné vysílače a senzory, které jsou schopné zaznamenávat údaje o teplotě, tlaku a vlhkosti vzduchu. Další součástí zařízení je také systém automatického řízení. Toto zařízení bylo již několikrát využito k provádění meteorologických měření a pozorování v různých částech světa a dokazuje tak svoji využitelnost. [50]

Drak

Jak již bylo zmíněno, pěnový drak letadla je založen na komerčně dostupném modelu letadla, které nese název FunJet a jeho výrobcem je společnost Multiplex. Pohon zajišťuje elektromotor, ke kterému je připojena vrtule. Energii dodává Lithium polymerová baterie, která je schopna zajistit přibližně 20 minut provozu při plném výkonu motoru. Při běžném provozu je pak zařízení schopno setrvat ve vzduchu až po dobu 45 minut. Celková hmotnost draku činí 0,58 kg a společně s vhodně navrženým delta křídlem přispívá k poměrně malé přistávací rychlosti, díky čemuž je dosaženo minimalizace rizika poškození právě při tomto manévru. [50]

System automatického řízení

System automatického řízení je založen na základě komunitou tvořeného open source projektu Papparazi. Tento system se skládá z procesorové desky, která se nachází na palubě bezpilotního letadla a je schopna určovat svoji polohu ze systému GPS. Stabilizace celého stroje je zajištěna pomocí šesti infračervených snímačů. Letoun se zemí komunikuje za pomoci rádiového zařízení, které je připojeno k počítači, na kterém obsluha programuje plánovanou trasu letu. Letoun je dále sekundárně možné ovládat pomocí bezdrátového dálkového ovladače v případě, že by system automatického řízení selhal. [50]

Meteorologické senzory a jejich umístění

Zařízení disponuje senzory pro měření tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu. Tlakový senzor je umístěn ve vnitřní části trupu, aby naměřená hodnota odpovídala s maximální přesností statickému tlaku, nikoli dynamickému. Senzory pro relativní vlhkost a teplotu jsou naopak umístěny pod křídly za účelem minimalizace vlivu radiačního ohřívání. Je nutné, aby rozlišovací schopnosti jednotlivých senzorů odpovídaly hodnotám, které se v mezní vrstvě atmosféry běžně vyskytují. Senzor tlaku je tak schopný měřit hodnoty v rozmezí 300 až 1200 hPa. Senzor pro měření teploty vzduchu je schopný rozeznávat teploty od -40 do 124 °C a senzor relativní vlhkosti pak hodnoty od 0 až po 100 %. [50]

Využití zařízení SUMO

Zhodnocení přesnosti numerických modelů

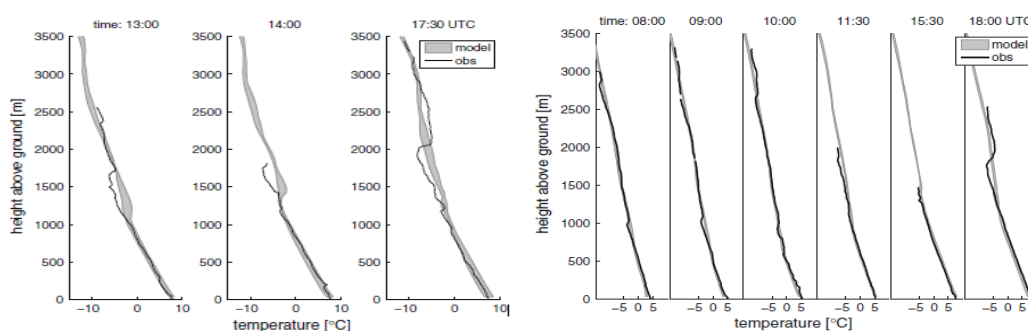
Vůbec prvním pokusem, ke kterému bylo zařízení SUMO využito, bylo vyhodnocení přesnosti numerického předpovědního modelu na Islandu. Konkrétně se jednalo o numerický model Advanced Weather Research and Forecasting Model s využitím 4 odlišných plánů mezní vrstvy atmosféry pro danou oblast. [18]

- **Lokalita**

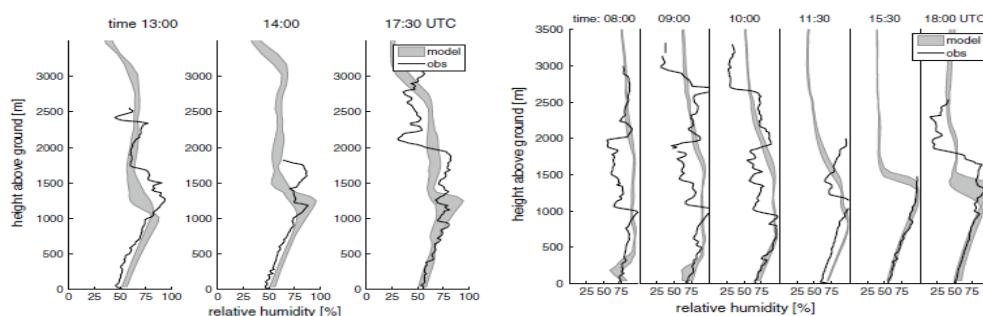
Měření probíhalo v blízkosti třetího největšího ledovce na Islandu pojmenovaného Hofsjökull. Ten leží v centrální části ostrova a jeho výška činí 1765 metrů. V okruhu 30 kilometrů jeho výškový rozdíl oproti okolí činí přibližně 1000 metrů. Toto místo bylo zvoleno z důvodu svého ideálního tvaru, kdy povrch celého ledovce je velice hladký a vrstevnice okolo něho tvoří přibližné kružnice. [18]

- **Postup měření**

Pro provádění měření byla zvolena dvě odlišná místa v blízkosti ledovce Hofsjökull. K prvnímu měření došlo 13. srpna 2007 a následné měření bylo provedeno 18. srpna 2007. Během druhého měření byla rychlost větru téměř nulová, zatímco během měření prvního bylo proudění větru podstatně intenzivnější. Toho dne dosahovala rychlost větru při zemi hodnot mezi 5 až 10 metry za sekundu a s výškou značně narůstala. Jeho směr byl převážně severovýchodní. Tyto zcela odlišné stavy byly záměrně vybrány pro vyhodnocení jejich vlivu na výsledek měření. Během prvního měření byly hodnoty zaznamenány v časech 13:00, 14:00 a 17:30. Druhý den měření byl doplněn i o dopolední hodnoty, které byly naměřeny v časech 08:00, 09:00, 10:00, 11:30, 15:30 a 18:00. Během následného vyhodnocení byly hodnoty převedeny do dílčích grafů, na kterých lze vizuálně snadno demonstrovat, jaké přesnosti předpovědní numerický model dosahoval. Obrázek 13 znázorňuje naměřené hodnoty teplot, které byly zaznamenány během prvního dne měření a zároveň předpovězené hodnoty modelem, na obrázku 14 jsou pak uvedeny hodnoty z druhého dne měření. Je zcela evidentní, že se hodnoty ve většině případů vyskytují v intervalu předpovědi s drobnými výjimkami v případech, kdy docházelo ke slabým teplotním inverzím v určitých výškách. Značně méně přesná byla předpověď relativní vlhkosti, kdy odchylky od skutečné hodnoty v určitých místech a časech dosahovaly maximální hodnoty přibližně 20 % během prvního dne měření, a ještě o něco více pak u hodnot z druhého dne měření. Na obrázku 15 a 16 jsou tyto rozdíly uvedeny. [18]



Obrázek 13 - Údaje o teplotě dne 13.08.2007 [18] / Obrázek 14 - Údaje o teplotě 18.08.2007 [18]



Obrázek 15 - Údaje o vlhkosti dne 13.08.2007 [18] / Obrázek 16 - Údaje o vlhkosti dne 18.08.2007 [18]

- **Výsledné zhodnocení**

Z výsledků je patrné, že v předpovědi teplot, je numerický model daleko spolehlivější, než je tomu u relativní vlhkosti. Ta byla ve většině případů ve výškách nad 1000 metrů nad zemí odlišná, a to jak reálnou vyšší hodnotou, tak i hodnotou nižší. Nelze tedy obecně stanovit, zda model tyto hodnoty přeceňuje či podceňuje. V nižší výšce však hodnoty numerickému modelu vesměs odpovídají, což poukazuje na fakt, že model je schopný počítat s vlivem zemského povrchu na relativní vlhkost v jeho blízkosti. Prvky ovlivňující dění ve vyšších výškách jsou pak modelem odhadovány s daleko větší nepřesností. U hodnot teplot je evidentní, že i přes vesměs odpovídající předpovězené teploty model není schopný odhadnout vývoj inverzí, které se během dne při obou měřeních postupně zesilovaly. To je pravděpodobně dáno tím, že se inverze vykytovaly v příliš malých intervalech výšek, jejichž hodnoty byly menší než rozlišovací schopnost modelu, který předpovídané hodnoty interpoluje s větším výškovým odstupem. [18]

Za pomoci zařízení SUMO byl ještě dále změřen směr a rychlost větru. Jelikož zařízení nebylo vybaveno žádným snímačem schopným tyto hodnoty přímo zaznamenat, byl postup měření takový, že letoun stoupal ustáleným letem po šroubovici s konstantní hodnotou vzdušné rychlosti, tak jak bylo popsáno v kapitole věnované této problematice. Takto naměřené hodnoty opět ve většině případů odpovídaly numerickému modelu, čímž se zároveň částečně prokázalo, že takový způsob měření sledovaných hodnot se jeví jako funkční a využitelný. Výjimku však tvořila přízemní hodnota rychlosti větru naměřená na doplňující pozemní stanici během prvního měřicího dne. Naměřené hodnoty byly o 2 až 5 metrů za sekundu vyšší než modelem předpokládané hodnoty. To je přičítáno faktu, kdy model počítá pouze s přibližnou polohou měření, nicméně i malá odchylka od této polohy může díky odlišnému profilu terénu hodnoty směru a rychlosti přízemního větru ovlivnit. [18]

Zkoumání mezní vrstvy atmosféry v polární oblasti

Provádění aerologických měření v polárních oblastech není příliš obvyklou disciplínou. Je tomu tak zejména z důvodu nedostatečné infrastruktury v těchto oblastech. Pravidelná měření, prováděná především za pomoci meteorologických balónů, probíhají pouze v několika osídlených oblastech, což se v porovnání s ostatními zemskými kontinenty jeví jako nedostatečné. V minulosti bylo zjištěno, že numerické modely ve velkém množství případů nedokážou spolehlivě odhadnout vývoj hodnot meteorologických prvků v oblastech, ve kterých se vyskytuje silná stabilita ovzduší a tím pádem i velice silná inverze. Přitom právě takové

podmínky v polárních oblastech velmi často panují. Na přelomu března a dubna v roce 2009 provedli vědci z Bergenské Univerzity další ze série měření, tentokrát na Špicberkách, během kterého se snažili opět za pomoci zařízení SUMO získat data z mezní vrstvy atmosféry a s jejich pomocí zpřesnit numerické předpovědní modely pro danou oblast. Zároveň byla data měřena za pomoci upoutaného meteorologického balónu. Data takto získaná byla porovnána s daty ze zařízení SUMO. Během tohoto projektu byla prokázána schopnost provozovat toto zařízení v oblastech za polárním kruhem, ověřena přesnost naměřených dat, která odpovídala hodnotám naměřeným meteorologickým balónem, a především získána data pro předpovědní modely z oblasti, ve které taková měření pravidelně neprobíhají. [51]



Obrázek 17 - Zařízení SUMO během měření na Antarktidě [52]

K takovéto formě výzkumu mezní vrstvy atmosféry za polárním kruhem bylo SUMO využito v následujících letech hned několikrát. Fotografie z jednoho z těchto měření je znázorněna na obrázku 17. [53]

Vývoj stabilní noční mezní vrstvy atmosféry

V červenci roku 2008 bylo zařízení SUMO využito meteorologickým institutem Univerzity v Mnichově pro zkoumání postupného vývoje stabilního zvrstvení vzduchu během jasné noci na německém letišti Steinrucken v rámci projektu zaměřeného na pozorování výskytu stoupavých proudů v mezní vrstvě atmosféry. [50]

Zkoumání vlivu zemědělské půdy na mezní vrstvu atmosféry

V srpnu roku 2008 pak bylo zařízení SUMO využito další německou institucí, tentokrát meteorologickým institutem Univerzity v Kolíně. Ten v rámci projektu Fluxpat zkoumal vliv rozdílných forem zemědělské půdy na meteorologické prvky v mezní vrstvě atmosféry. Hlavním zdrojem dat byl výzkumný letoun s posádkou METAIR Dimona, nicméně ten byl z bezpečnostního hlediska v nižších výškách doplněn o data získaná právě ze zařízení SUMO. [50]

4.7 Využití bezpilotních vzducholodí

AirshipClub

Prvním uvedeným příkladem využití bezpilotních vzducholodí je česká společnost AirshipClub působící na trhu již přes 15 let. Tato firma vyvinula a zároveň v současnosti dodává svým zákazníkům vzducholodě určené především k aerologickým měřením⁵. Vzhledem k již popsaným vlastnostem, kterými vzducholodě obecně disponují, nejsou tato zařízení primárně určena v této oblasti ke standardnímu měření základních meteorologických prvků, nýbrž především k pozorování kvality ovzduší, a to formou měření výskytu atmosférického aerosolu. Za tímto účelem se naopak jedná, díky nulovému rozvíření vzduchu v těsné blízkosti vzducholodi při udržování stacionární polohy, o velice efektivní způsob měření. Dalším způsobem využití takových zařízení může být například měření difrakce vysokofrekvenčních signálů, jež je ovlivněná zástavbou. Typickým zákazníkem společnosti jsou pak stavební, těžařské či další průmyslové firmy, které zkoumají vlivy svojí činnosti na okolní prostředí. V České republice byl obsah aerosolu v atmosféře měřen za pomoci těchto vzducholodí kupříkladu v oblasti Kladna, Ostravy, Mladé Boleslavi, Mostu nebo také v okolí Chvaletické elektrárny. Ani zákazníci v podobě univerzit, které tyto vzducholodě využívají ke své vědecké činnosti, však nejsou výjimkou. [54] [55] [56]

Portfolio společnosti čítá 3 druhy vzducholodí plněných heliem, jejichž dostup se pohybuje v závislosti na velikosti celého zařízení od 500 do 1000 metrů nad mořem, což samo o sobě značí, že jsou tato zařízení určena především pro horizontální, nikoliv vertikální, pozorování v nižších vrstvách mezní vrstvy atmosféry. Nosnost nákladu jednotlivých zařízení se pohybuje od 1 do 15 kg. Všechna zařízení jsou poháněna elektromotory, které dokáží vzducholodě udržovat v režimu cestovní rychlosti od 20 minut u nejmenšího modelu až po dobu 3 hodin u modelu největších rozměrů. [54]

Raven Aerostar

Americká společnost Raven Aerostar známá především vývojem radarových systémů pracuje mimo jiné také na vývoji bezpilotní vzducholodi, jejíž dostup dosahuje oblastí stratosféry.

⁵ V minulosti byly vzducholodě společnosti AirshipClub určeny jak k aerologickému pozorování, tak k leteckému snímkování, vzhledem k vývoji nových technologií v oblasti snímkování za pomoci bezpilotních letadel se však společnost v současnosti soustředí především na zmíněné pozorování kvality ovzduší.

Takovýto nástroj je jedním z mála, který dokáže prvky v těchto výškách efektivně měřit a zároveň být stále dálkově ovladatelný. [57]

5 Měřicí zařízení

Jak již bylo v úvodu zmíněno, po podrobném popisu meteorologických bezpilotních letadel v rámci teoretické části práce následuje část praktická, ve které bude zodpovězena otázka, zda je skutečně reálné vytvořit z běžné multikoptéry, primárně určené k leteckému snímkování, zařízení, s pomocí kterého lze aerologicky měřit základní meteorologické prvky. Začátek teoretické části je tak věnován tvorbě zařízení, které ke zodpovězení této otázky následně poslouží.

Základní informace

Základní myšlenka proto spočívá ve vytvoření zařízení takových rozměrů, které bude možné bezpečně připevnit k multikoptéře a zároveň bude disponovat minimální hmotností tak, aby se jeho váha negativně neprojevila na letových vlastnostech multikoptéry. Cílem je, aby takové zařízení bylo schopné zaznamenávat údaje o teplotě, vlhkosti a atmosférickém tlaku. Vzhledem k rozvířenému vzduchu v těsné blízkosti okolo multikoptéry je nutné, aby bylo možné s měřicími senzory snadno manipulovat a nalézt tak ideální polohu, ve které bude vliv vířícího se vzduchu minimalizován, případně eliminován. Dalším nutným požadavkem je schopnost zařízení zaznamenávat údaje z jednotlivých senzorů v předem definovaných časových intervalech na nějaké paměťové zařízení, ze kterého mohou být data posléze jednoduše stažena a vyhodnocena. Ze všeho výše uvedeného tedy plyne, že není vhodné takové měření provádět za pomoci k dronu připevněného ledajakého zařízení, které je schopné požadované údaje zaznamenávat. Využití zařízení v podobě běžně dostupných meteorologických stanic se jeví jako nereálné.

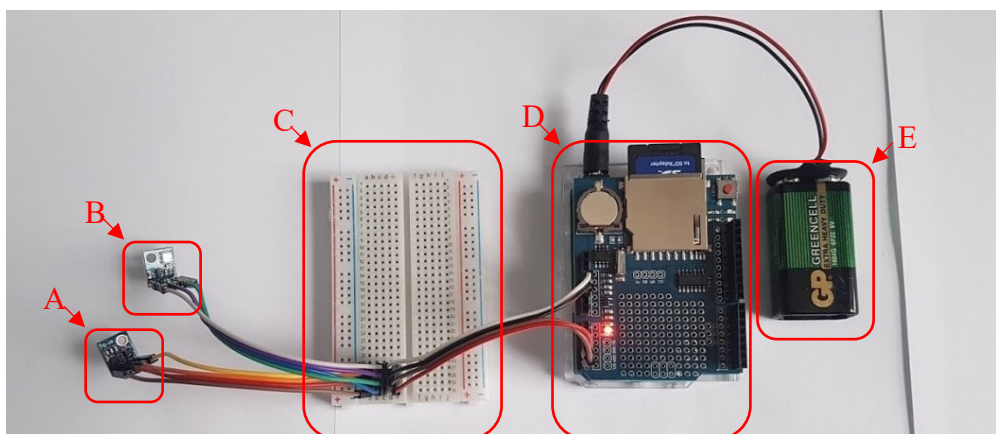
Výše popsaných vlastností je však možné dosáhnout za pomoci mikropočítače, případně mikrokontroléru⁶, ke kterému mohou být připojeny různé varianty senzorů, jejichž pozice vůči dronu nemusí být fixní a chování celého zařízení je pak otázkou programovacího kódu. V současnosti jsou na trhu dvě velice populární zařízení tohoto typu, a to konkrétně mikrokontroléry založené na platformě Arduino či mikropočítače založené na platformě Raspberry Pi. Oba zmíněné se jeví jakožto vhodní kandidáti pro zamýšlený účel, nicméně

⁶ Někdy taktéž označované jako programovatelné stavebnice.

vzhledem k tomu, že mikrokontroléry Arduino jsou všeobecně cenově dostupnější a energeticky méně náročné v porovnání s mikropočítači a zároveň pro plánovaný účel výkonově naprosto dostatečné, byla tato platforma zvolena právě pro tvorbu využitého měřicího zařízení.

Hardware

Celé zařízení je vytvořeno na vývojové desce založené na platformě Arduino, a to konkrétně na desce označované Arduino UNO. K té jsou pomocí 4 vodičů připojeny dva senzory (HTU21D a BMP180) společně schopné zaznamenávat teplotu, tlak a vlhkost. Dále je celé zařízení spojeno s tzv. data logger shieldem, který je schopný jednak naměřené hodnoty zaznamenávat na paměťovou SD kartu, a zároveň je možné s pomocí tohoto modulu každou naměřenou hodnotu propojit s aktuálním časem, ve kterém byla daná hodnota zaznamenána. O napájení zařízení se stará běžně dostupná 9V baterie, která je bez problémů schopná zařízení udržovat v provozu až po několik desítek hodin.



Obrázek 18 - Zapojení měřicího zařízení [autor práce]

Obrázek 18 znázorňuje zapojení celého zařízení. Písmeno A označuje senzor HTU21D, písmeno B senzor BMP180, písmeno C nepájivé pole, které bylo využito pouze v průběhu tvorby a základního testování zařízení, písmeno D značí desku Arduino UNO spojenou s data logger shieldem, do něhož je zapojena baterie CR1220, která slouží k zapamatování nastaveného času, a paměťová SD karta, písmeno E nakonec směřuje k napájecí 9V baterii.

Pro účely praktických měření, která jsou popsána na následujících stranách, bylo toto zařízení vyhotoveno ve dvou kusech.

Použité senzory

1.) HTU21D

Pro měření teploty a vlhkosti byl zvolen senzor komunikující s Arduino deskou přes I2C sběrnici označovaný HTU21D. Tento senzor je schopný zaznamenávat teploty v rozsahu od -40 °C až do 120 °C s rozlišením na 0,01 °C a jeho udávaná chyba měření činí 0,3 °C. Dále je tento senzor schopen zaznamenávat údaje o vlhkosti v rozsahu od 0 % až do 100 % s rozlišením na setiny procent a udávanou chybou měření 2 %. [58]

2.) BMP180

Pro měření atmosférického tlaku byl zvolen senzor s označením BMP180. Rozsah měřitelných hodnot je u tohoto konkrétního senzoru v rozmezí od 300 do 1100 hPa s rozlišením 0,01 hPa. Vzhledem k uváděným vlastnostem, které korelují s běžně vyskytujícími se podmínkami v oblastech mezní vrstvy atmosféry, jsou tedy oba tyto senzory k zamýšlenému účelu vhodné. [59]

Presnost měřených hodnot na sestavených zařízeních byla ještě dále ověřena dvěma měřeními za odlišných podmínek teploty a vlhkosti za pomoci dataloggeru Garni GAR 195, jehož nejistota měření teploty činí 0,5 °C. Výsledky odpovídají výše uvedeným chybám a jsou uvedeny v tabulce 3.

| Zařízení | Průměrná hodnota v intervalu 300 s | | | Minimální naměřená hodnota v intervalu 300 s | | | Maximální naměřená hodnota v intervalu 300 s | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------|---|--------------|--------------|---|--------------|--------------|
| | GAR 195 | Arduino 1 | Arduino 2 | GAR 195 | Arduino 1 | Arduino 2 | GAR 195 | Arduino 1 | Arduino 2 |
| Teplota [°C] | 26,64 | 26,73 | 26,97 | 26,50 | 26,67 | 26,91 | 26,80 | 26,82 | 27,06 |
| | 20,58 | 20,66 | 20,93 | 20,50 | 20,63 | 20,91 | 20,70 | 20,72 | 20,97 |
| Relativní vlhkost [%] | 47,90 | 48,22 | 49,15 | 47,50 | 48,01 | 48,95 | 48,40 | 48,50 | 49,37 |
| | 78,00 | 78,11 | 79,60 | 77,50 | 77,93 | 79,42 | 78,40 | 78,31 | 79,75 |

Tabulka 3 - Kontrolní srovnání měřených hodnot teploty a vlhkosti [autor práce]

Software

Celé zařízení je naprogramováno s pomocí kódu vytvořeném ve volně dostupném programu Arduino IDE v kombinaci s volně dostupnými a do programu importovanými knihovnami. Kód je k nalezení mezi přílohami přiloženými k této práci. V principu tento kód zajišťuje právě zápis údajů o teplotě ve stupních Celsia, relativní vlhkosti v procentech a lokálního tlaku v hektopascalech spojených s aktuální hodnotou lokálního data a času ve formátu hh:mm:ss do textového souboru ukládaného na připojenou SD kartu s předdefinovanou periodou mezi jednotlivými zápisy. Vytvořený textový soubor lze snadno převést do formátu xlsx a s hodnotami tak dále pracovat. Zároveň kód poskytuje možnost sledování aktuálně měřených dat s pomocí sériového monitoru spuštěném na počítači, ke kterému může být zařízení připojeno. Těto vlastnosti bylo využito při ověřování přesnosti měřených údajů a správné funkčnosti celého zařízení.

Popis využití multikoptéry

Všechna měření probíhala s pomocí populární multikoptéry Mavic Pro vyráběné čínským výrobcem DJI určené primárně pro účely leteckého snímkování a natáčení videa. Konkrétně se jedná o kvadrokoptéru o hmotnosti 734 g. Díky své skládací konstrukci je multikoptéra ve složeném stavu velice kompaktní, kdy její největší rozměr dosahuje pouhých 198 mm. Celé zařízení je řízeno pomocí dálkové řídicí jednotky, na které je zároveň možné sledovat vybrané údaje o stavu letu, jako je rychlost, výška, vzdálenost a další. S pomocí této jednotky lze také předdefinovat trasu letu, kterou je multikoptéra schopna následovat bez dalších zásahů pilota. Zároveň může být tato jednotka doplněna o mobilní telefon, na kterém lze společně s dalšími parametry letu také v reálném čase sledovat obraz z kamery připevněné k multikoptéře pomocí tříosého gimbálu. Výrobcem udávaný maximální dostup činí 5000 metrů nad mořem a maximální rychlost pak 18 m/s. Dosah dálkové řídicí jednotky, tedy respektive dolet, je udáván o hodnotě 7 km. Maximální rychlost větru, kterou výrobce doporučuje nepřekračovat, činí 10 m/s. Multikoptéra by měla být díky lithium-polymerovému akumulátoru o kapacitě 3830 mAh schopna setrvat ve vzduchu až 27 minut, nicméně tato hodnota se liší na základě aktuálních podmínek, především pak na panující rychlosti větru. Zároveň je multikoptéra vybavena 5 optickými senzory, které jsou schopny registrovat případné překážky ve vzdálenosti 15 metrů. Tyto senzory jsou však u tohoto konkrétního modelu umístěny pouze na čelní a spodní straně multikoptéry. [60]

Přípevnění zařízení k multikoptěře

Jak již bylo tedy zmíněno, pro účely měření byla využita multikoptéra DJI Mavic Pro. Výše popsané zařízení bylo připevněno k tělu multikoptéry za pomoci samolepícího suchého zipu a plastových stahovacích pásek. Tato jednoduchá forma připevnění obě části bezpečně spojila za cenu nárůstu hmotnosti v řádu jen několika málo gramů. Výsledné zařízení je znázorněno na obrázku 19.



Obrázek 19 - DJI Mavic Pro s měřicím modulem [autor práce]

5.1 Umístění senzorů

Prvním úkolem bylo nalezení vhodného umístění měřicích senzorů. Provozování multikoptéry ovlivňuje samo o sobě vlastnosti jejího bezprostředního okolí. Je tedy žádoucí, aby byly senzory umístěny na jejím těle ve vhodném místě, kde bude negativní dopad těchto změn prostředí na výsledné měřené hodnoty co možná nejmenší. Princip, jakým byla data pro vyhodnocení vhodnosti jednotlivých umístění senzorů získána, spočíval v identifikování potenciálního rozdílu měřených hodnot mezi stavem, kdy byla multikoptéra vypnutá, a stavem, kdy byla multikoptéra spuštěna ve stacionární poloze nad zemí. Konkrétně byla zaznamenávána data v intervalech přibližně 10 sekund po dobu 5 minut před spuštěním multikoptéry a následně po dobu 5 minut po jejím spuštění a vzletu. Všechna takto prováděná měření probíhala ve vnitřních prostorech. Pro zdokonalení přesnosti interpretace výsledků bylo vždy v průběhu měření v místnosti umístěno i druhé identické měřicí zařízení, které sloužilo jako kontrolní a jehož primárním účelem bylo identifikovat případné změny stavů jednotlivých veličin zapříčiněné vnějšími vlivy.

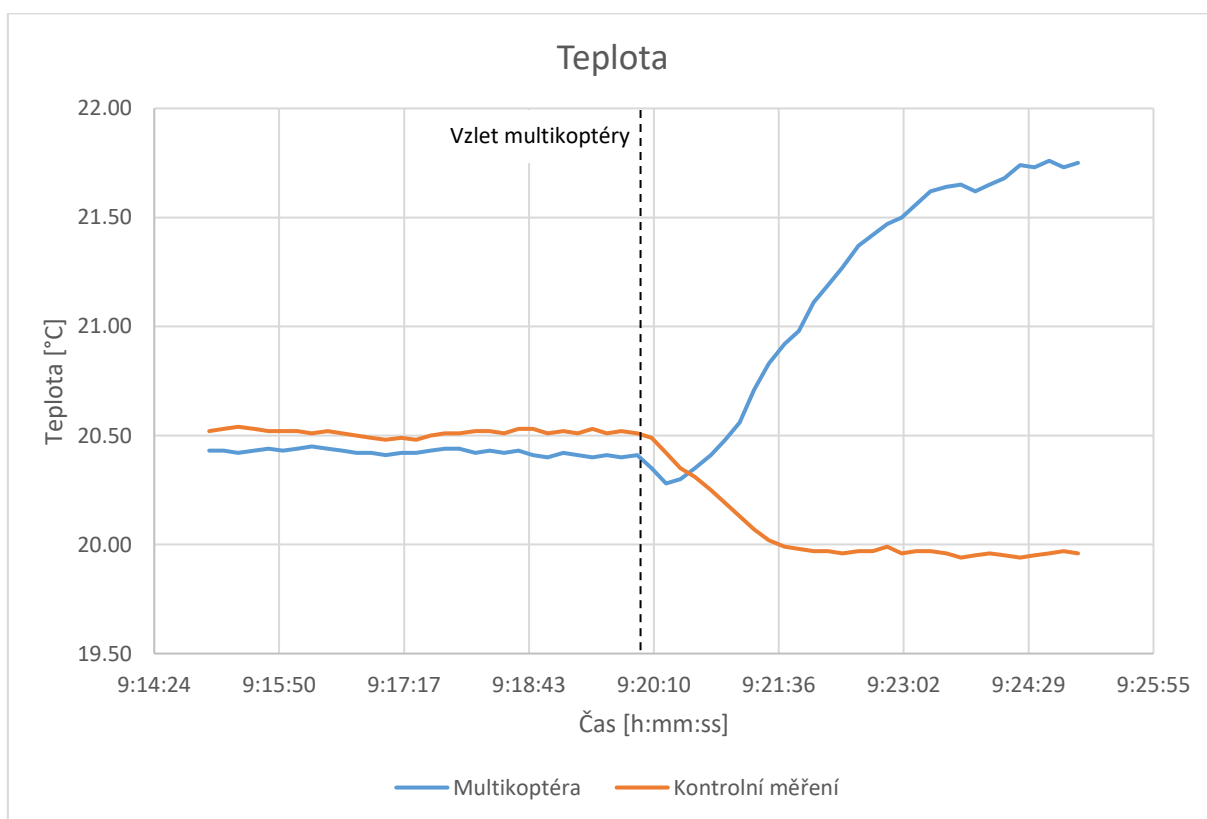
Umístění senzorů pod centrální část multikoptéry

Toto umístění je znázorněno na obrázku 20.

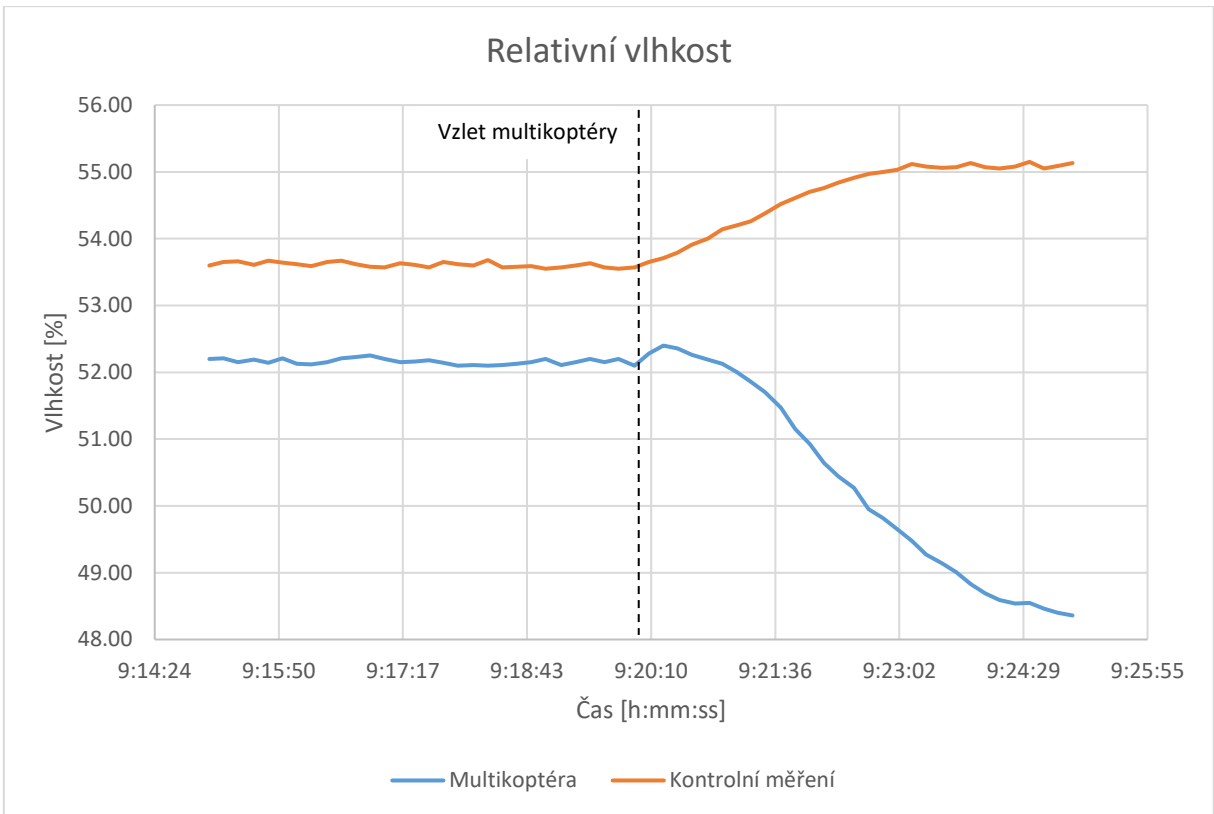


Obrázek 20 - Umístění měřicích senzorů pod tělem multikoptéry [autor práce]

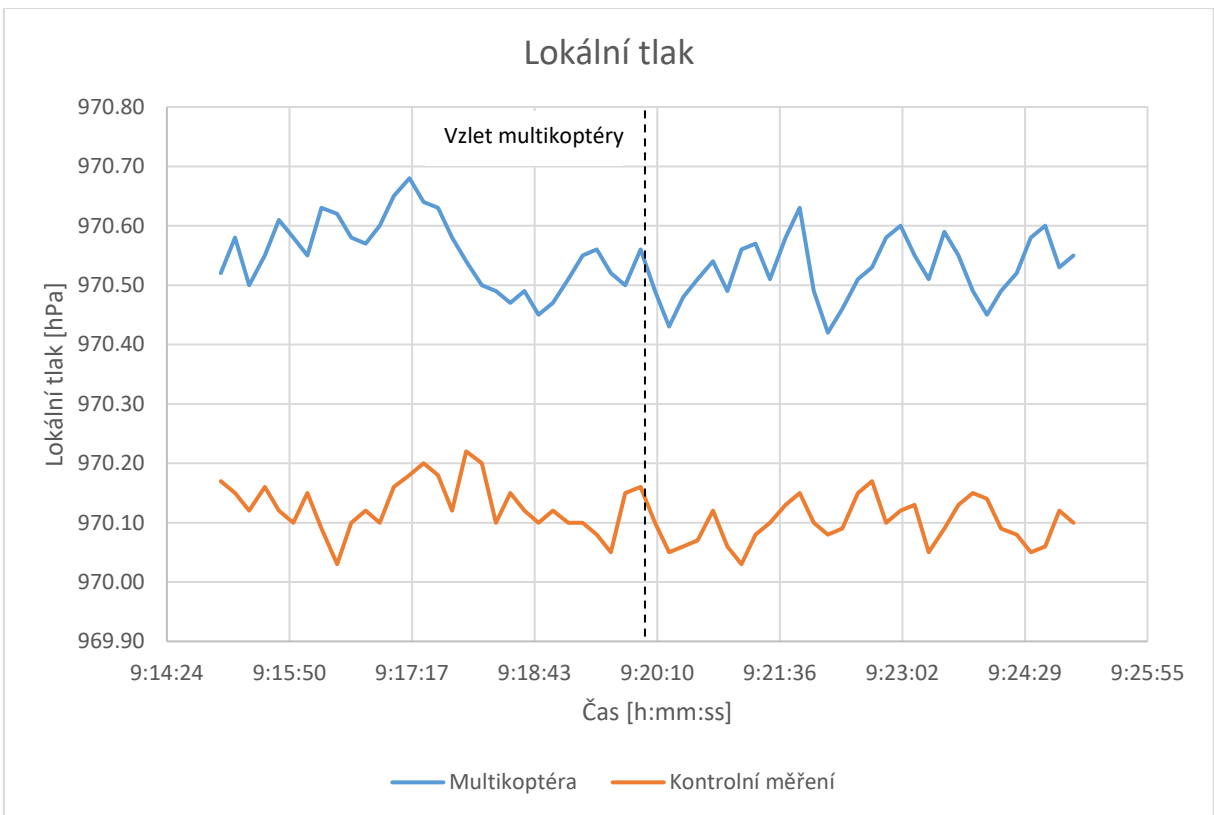
V grafech 1, 2 a 3 a tabulkách 4 a 5 jsou znázorněny průběhy měřených hodnot jednotlivých veličin pro toto umístění, záznamy při tomto měření byly pořizovány v intervalech 10 sekund.



Graf 1 - Teplota pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce]



Graf 2 - Relativní vlhkost pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce]



Graf 3 - Lokální tlak pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce]

| Data zaznamenaná s pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|---|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 5 minut před vzletem | 20,42 | 52,16 | 970,56 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 21,39 | 49,80 | 970,54 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | 0,97 | -2,36 | -0,02 |

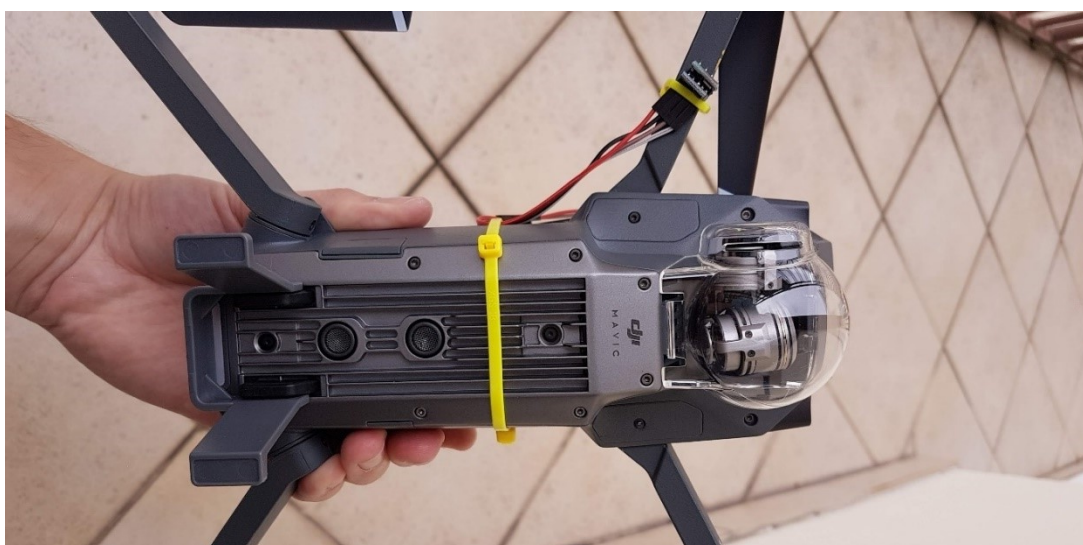
Tabulka 4 - Data zaznamenaná multikoptérou pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce]

| Data kontrolního měření | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|---|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 5 minut před vzletem | 20,51 | 53,61 | 970,13 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 19,98 | 54,89 | 970,10 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,53 | 1,28 | -0,03 |

Tabulka 5 - Data kontrolního měření pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce]

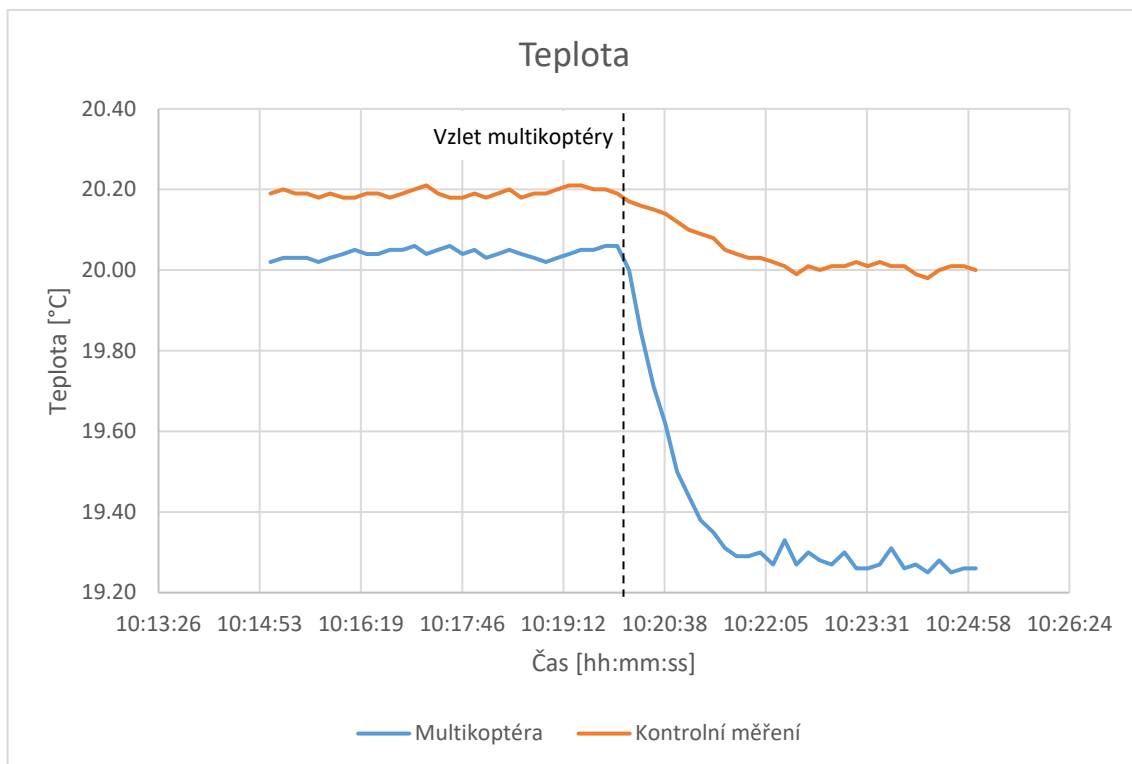
Umístění senzorů pod jedno z ramen multikoptéry

Toto umístění je znázorněno na obrázku 21.

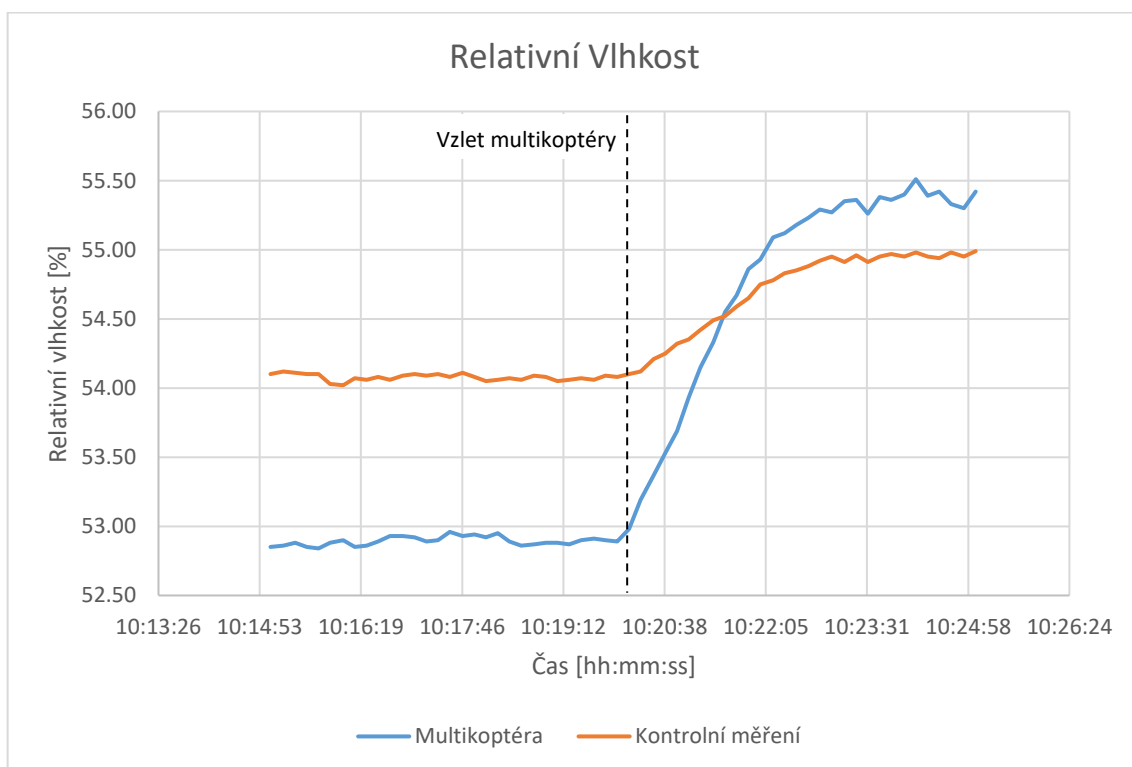


Obrázek 21 - Umístění senzorů pod rameno multikoptéry [autor práce]

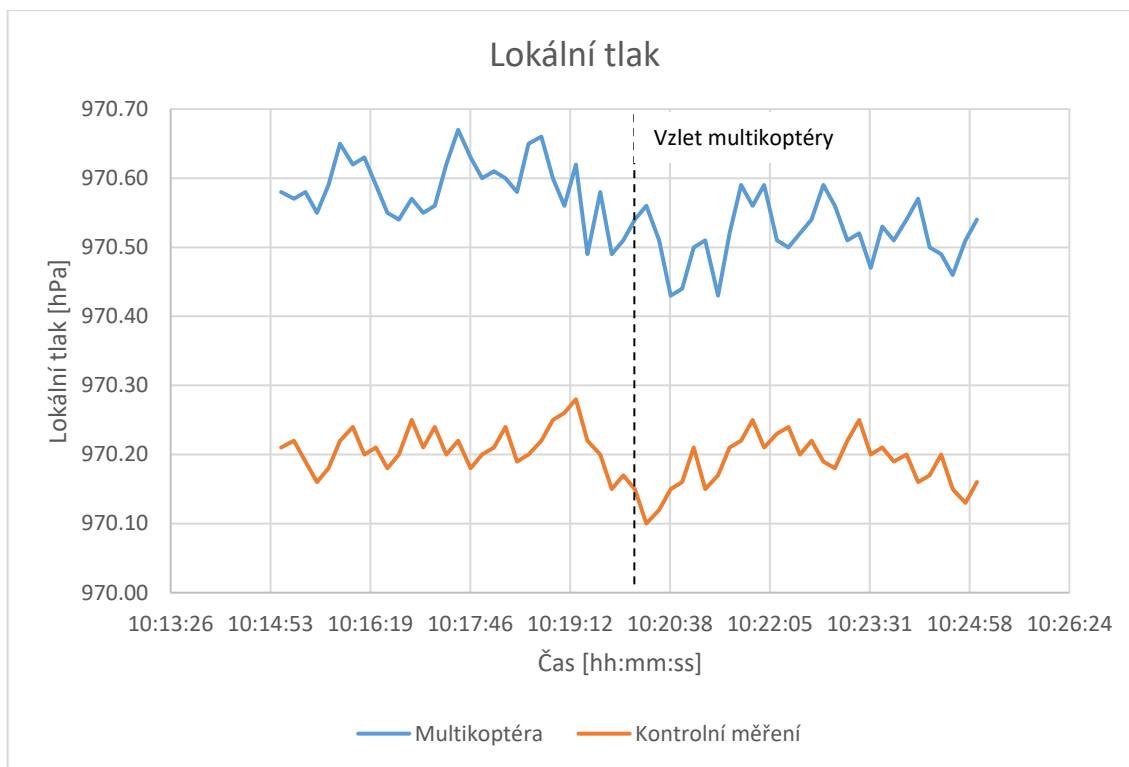
V grafech 4, 5 a 6 a tabulkách 6 a 7 jsou znázorněny průběhy měřených hodnot jednotlivých veličin pro toto umístění, záznamy při tomto měření byly pořizovány v intervalech 10 sekund.



Graf 4 - Teplota pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce]



Graf 5 - Relativní vlhkost pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce]



Graf 6 - Lokální tlak pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce]

| Data zaznamenaná s pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|---|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 5 minut před vzletem | 20,04 | 52,89 | 970,59 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 19,29 | 55,13 | 970,52 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,75 | 2,24 | -0,07 |

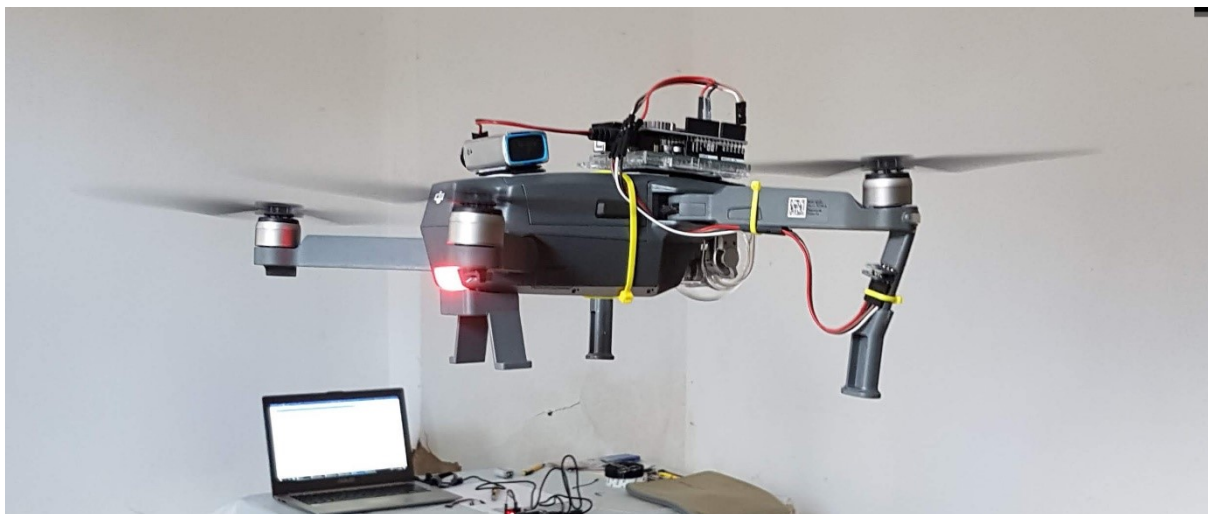
Tabulka 6 - Data zaznamenaná multikoptérou pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce]

| Data kontrolního měření | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|---|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 5 minut před vzletem | 20,19 | 54,08 | 970,21 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 20,02 | 54,84 | 970,16 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,17 | 0,76 | -0,05 |

Tabulka 7 - Data kontrolního měření pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce]

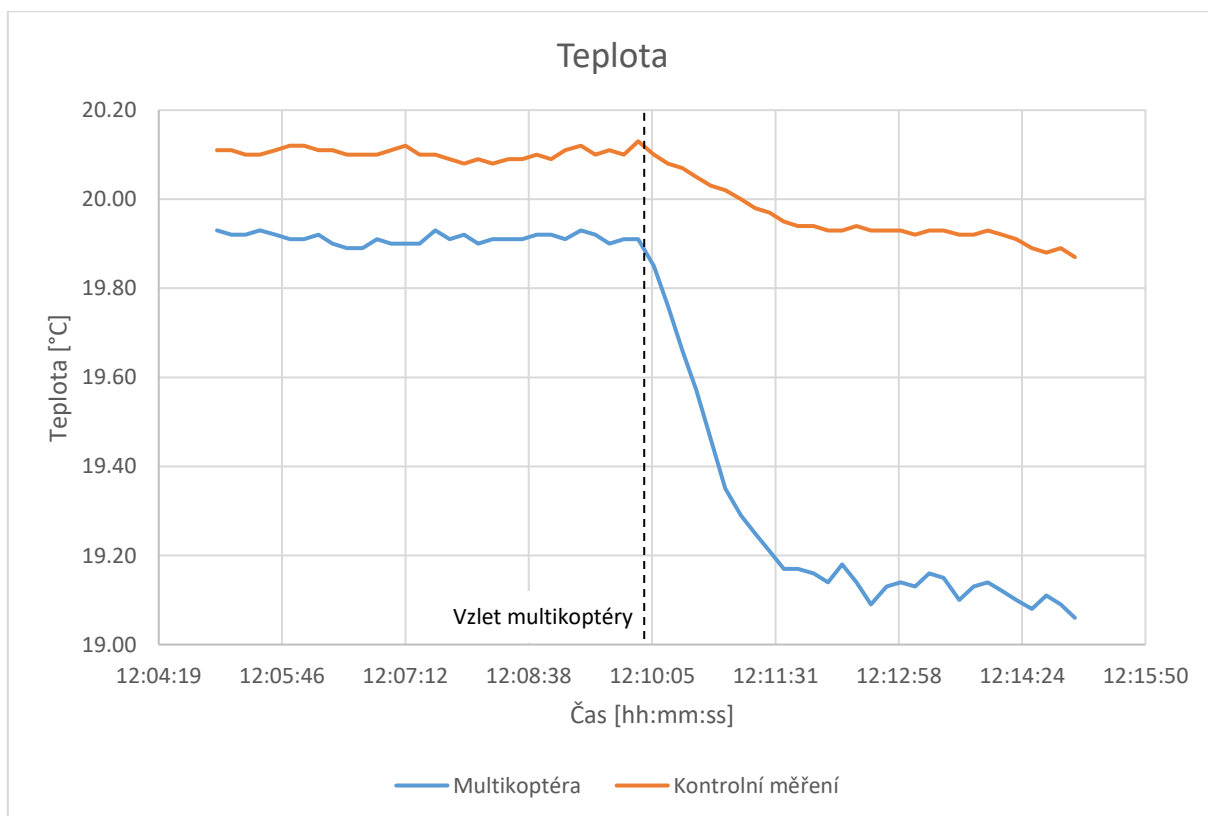
Umístění senzorů pod jedním z motorů multikoptéry

Toto umístění je znázorněno na obrázku 22.

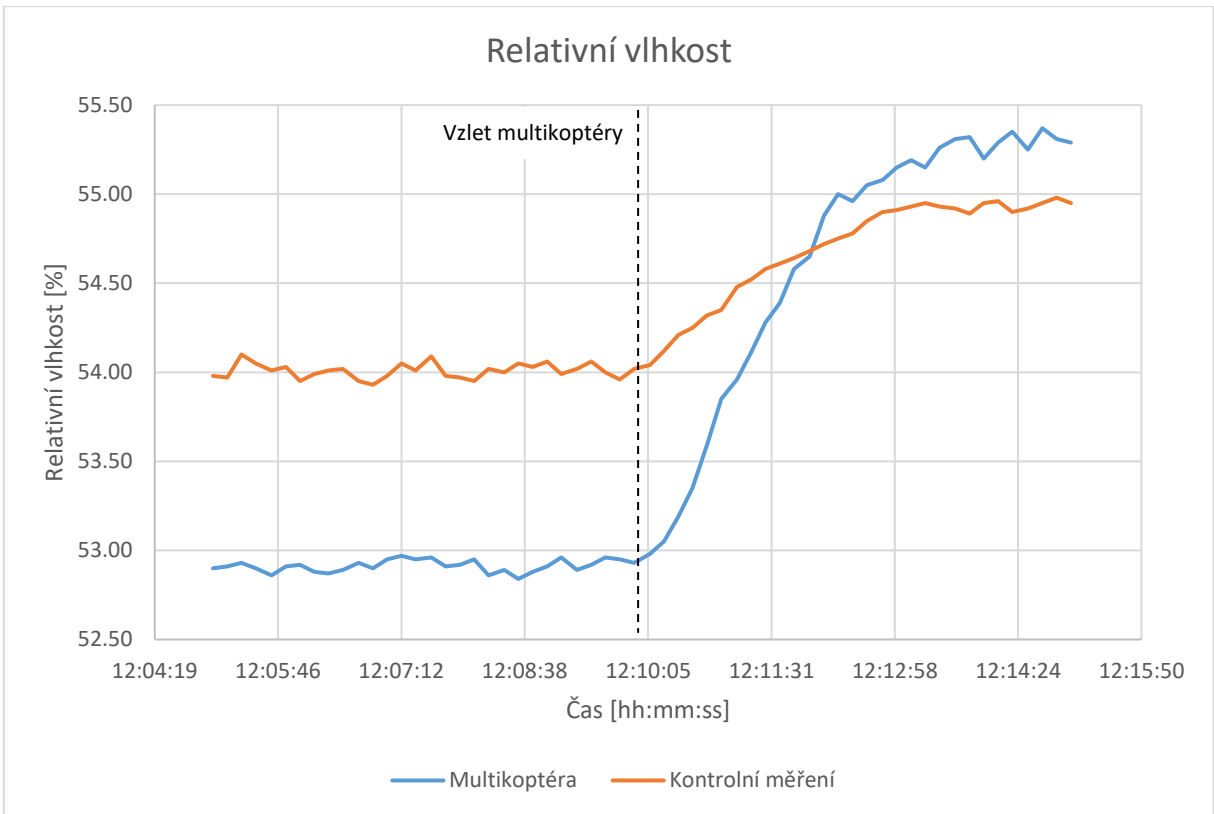


Obrázek 22 - Umístění senzorů pod motor multikoptéry [autor práce]

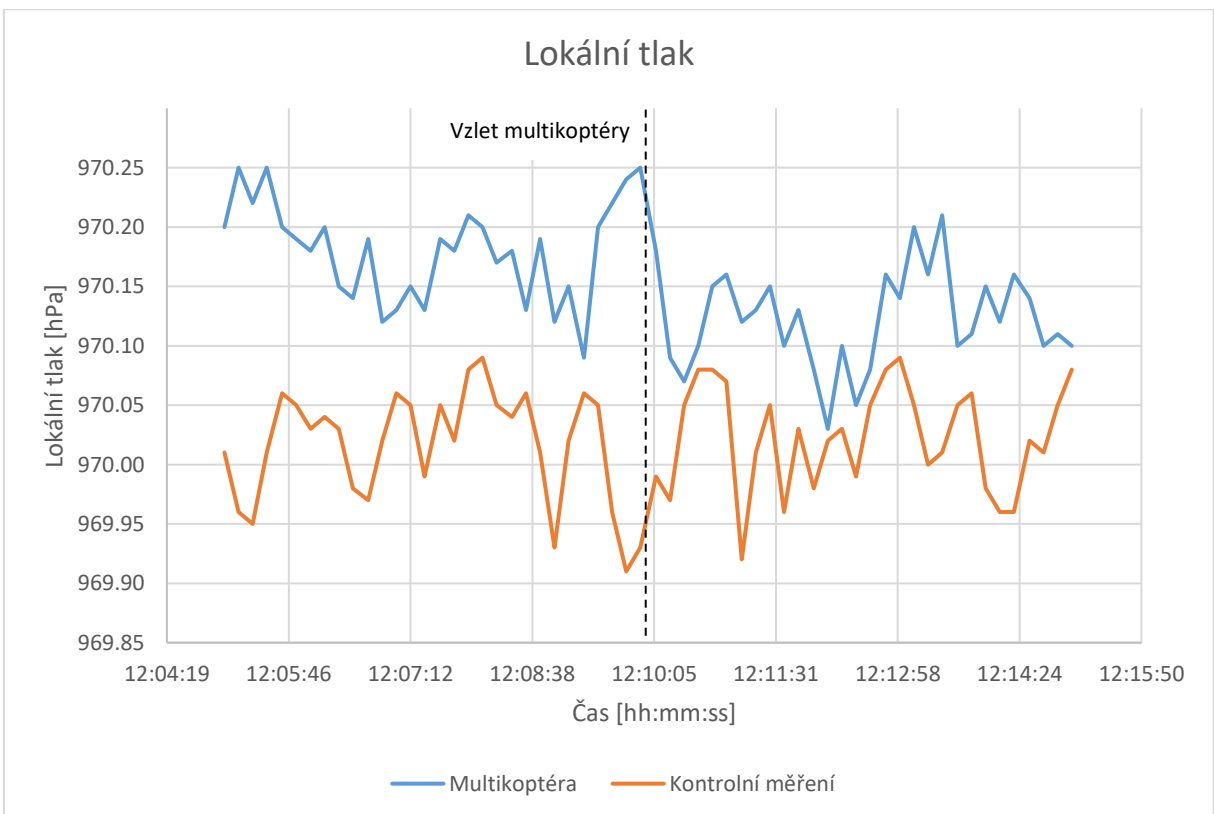
V grafech 7, 8 a 9 a tabulkách 8 a 9 jsou znázorněny průběhy měřených hodnot jednotlivých veličin pro toto umístění, záznamy při tomto měření byly pořizovány v intervalech 10 sekund.



Graf 7 - Teplota pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce]



Graf 8 - Relativní vlhkost pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce]



Graf 9 - Lokální tlak pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce]

| Data zaznamenaná s pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|---|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 5 minut před vzletem | 19,91 | 52,91 | 970,18 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 19,14 | 54,97 | 970,12 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,77 | 2,06 | -0,06 |

Tabulka 8 - Data zaznamenaná multikoptérou pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce]

| Data kontrolního měření | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|---|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 5 minut před vzletem | 20,10 | 54,01 | 970,02 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 19,93 | 54,82 | 970,08 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,17 | 0,81 | 0,06 |

Tabulka 9 - Data kontrolního měření pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce]

Interpretace naměřených dat

Z tabulek a grafů vztažených k situaci, kdy byl měřicí senzor teploty umístěn pod centrální část multikoptéry, vyplývá, že měření teploty takovýmto způsobem není vhodné. Z dat je možné vypočítat nárůst teploty, který trval po celou dobu pětiminutového měření po vzletu multikoptéry. Příčinou tohoto nárůstu měřené teploty bylo teplo vyzařované centrální částí multikoptéry. Tomuto nárůstu teploty pak odpovídá i naměřený pokles relativní vlhkosti. U hodnot naměřeného tlaku však žádný signifikantní rozdíl mezi stavem před a po spuštění multikoptéry pozorován nebyl.

Za zmínku ještě stojí pozorovaný pokles teploty doprovázený nárůstem relativní vlhkosti zaznamenaný s pomocí kontrolního měřicího zařízení. Tento stav se vyskytl i u ostatních měření a byl pravděpodobně zapříčiněn dvěma vnějšími vlivy. Teplotní zvrstvení v jednotlivých částech místnosti před počátkem měření patrně nebylo konstantní a zároveň místnost, ve které měření probíhalo, nebylo možné dokonale utěsnit. Právě za účelem eliminování negativního vlivu těchto chyb na výslednou interpretaci výsledků však bylo toto

kontrolní zařízení do místnosti umístěno. Rozdíl v měřených hodnotách v klidovém stavu mezi zařízením připevněným k multikoptéře a zařízením kontrolním jsou dány, již zmíněnou a výrobcem udávanou, možnou nepřesností využitých senzorů.

Při umístění senzorů pod jedno z ramen multikoptéry, případně pod motor multikoptéry do vzdálenosti přibližně 3 centimetrů, se podařilo sálání tepla multikoptérou eliminovat. Oba tyto případy vykazují vzájemně velmi podobné hodnoty. Z analýzy dat tedy nelze jednoznačně říci, která z těchto dvou poloh je pro provoz takového zařízení vhodnější. V obou případech byl však pozorován trend poklesu teploty po spuštění a vzletu multikoptéry. Jak je uvedeno v příslušných tabulkách, pokles průměrné teploty činil v prvním případě 0,75 °C a ve druhém pak 0,77 °C. Pokud od těchto hodnot odečteme pokles teploty v místnosti zaznamenaný s pomocí kontrolního měřicího zařízení, tedy v obou případech identickou hodnotu 0,17 °C, dostaneme přibližnou hodnotu poklesu průměrné měřené teploty 0,6 °C. Tento pokles má tedy přímou vazbu na stav, kdy je multikoptéra v provozu. Drobný náznak tohoto stavu byl pozorován i v případě, kdy byl senzor umístěn pod centrální část multikoptéry, avšak posléze byl eliminován právě již zmíněným sáláním. Příčinou tohoto poklesu je pravděpodobně přirozená vlastnost využitého senzoru teploty, který může sám svým provozem produkovat teplo. Výrobce s touto vlastností již počítá a zařízení kalibruje tak, aby výsledné naměřené hodnoty v klidném ovzduší odpovídaly co možná nejvíce realitě. Jelikož se však zařízení vlivem rychle proudícího vzduchu zapříčiněného provozem multikoptéry ochlazuje, mohou se výsledné naměřené hodnoty jevit o něco nižší, než ve skutečnosti jsou. Zda je tato chyba nějakým způsobem ovlivněna při měření v prostředí s rozdílnou teplotou a vlhkostí je uvedeno v následující kapitole.

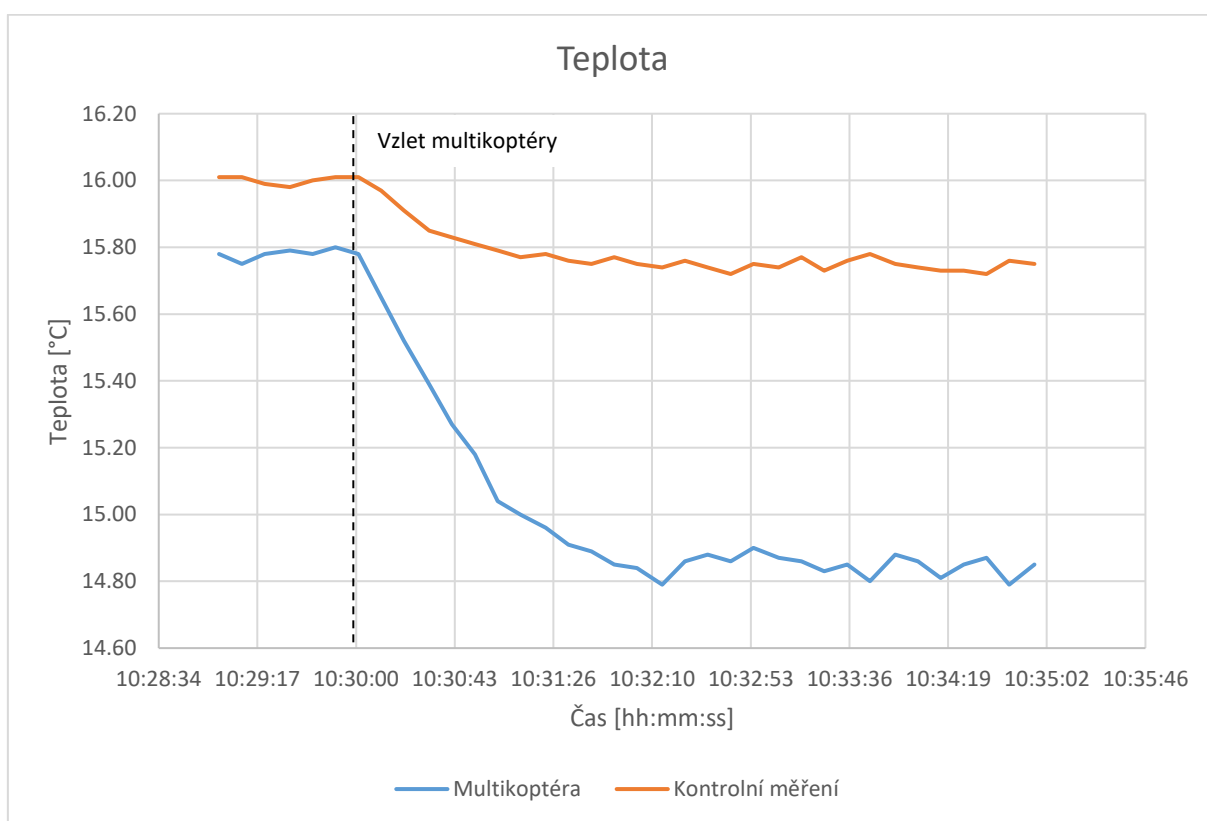
S poklesem teploty v obou případech opět koreloval nárůst hodnot relativní vlhkosti. Hodnoty měřeného lokálního tlaku opět v žádném z těchto případů nevykazovaly přímou závislost na provozu multikoptéry. Senzitivní část senzoru tlaku byla ve všech případech orientována takovým způsobem, aby na ni přímo nepůsobil urychlený proud vzduchu od vrtulí a eliminovalo se tak riziko ovlivnění měřených hodnot tlakem dynamickým.

Pro všechna následující měření byly měřicí senzory umístěny pod pravý přední motor multikoptéry tak, jak bylo uvedeno v posledním případě.

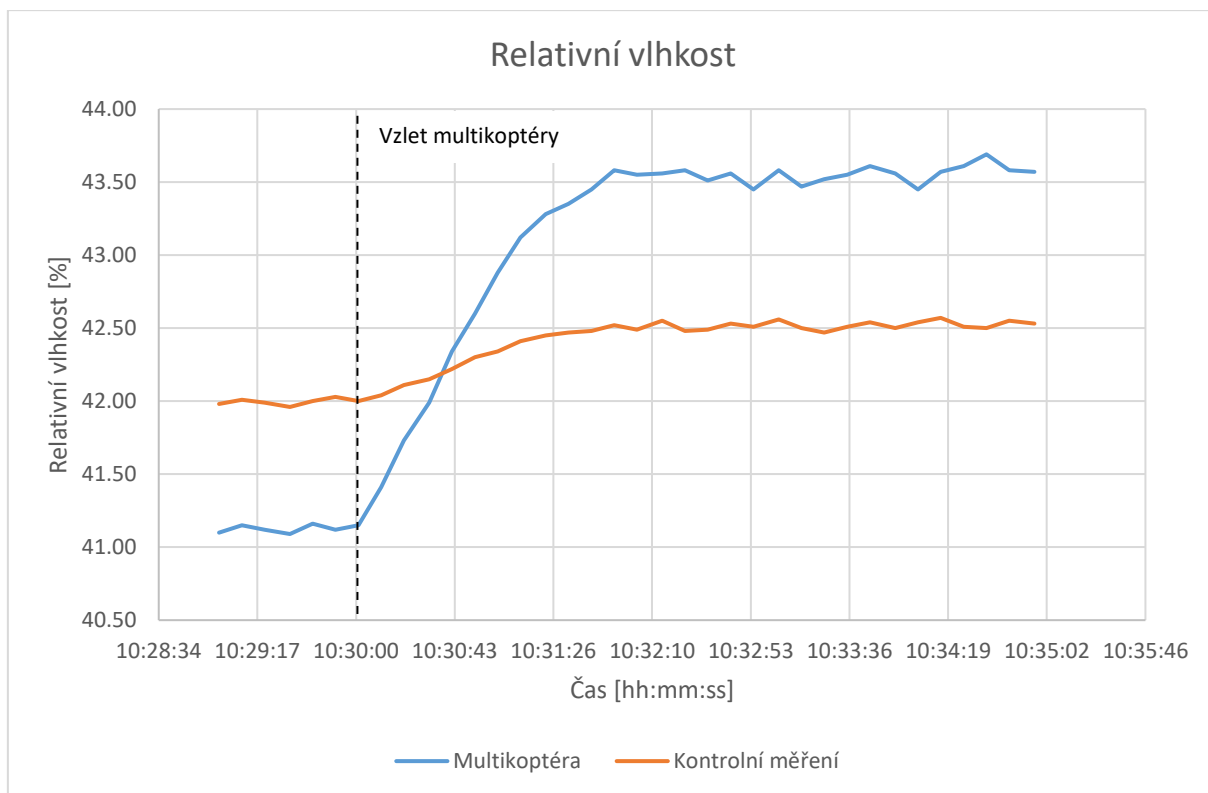
5.2 Vliv vlhkosti a teploty prostředí na naměřené hodnoty

Pro ověření toho, zda je výsledná chyba měřených hodnot teploty a vlhkosti pozorovaná v kapitole 5.1 nějakým způsobem ovlivněna samotnou vlhkostí a teplotou prostředí, ve kterém je multikoptéra provozována, byla k datům naměřeným v minulé kapitole doměřena další sada dat, nejprve při podmínkách, ve kterých relativní vlhkost činila přibližně 40 % a teplota byla 16 °C, při přibližné relativní vlhkosti 80 % a teplotě opět velmi blízké hodnotě 16 °C a na závěr při přibližné teplotě 25 °C a vlhkosti okolo 50 %. V grafech 10, 11, 12, 13, 14 a 15 a tabulkách 10, 11, 12, 13, 14, a 15 jsou data z těchto měření uvedena, záznamy při těchto měřeních byly pořizovány v intervalech 10 sekund.

Situace A1 (T≐16 °C, R.H.≐40 %)



Graf 10 - Teplota pro situaci A1 [autor práce]



Graf 11 - Relativní vlhkost pro situaci A1 [autor práce]

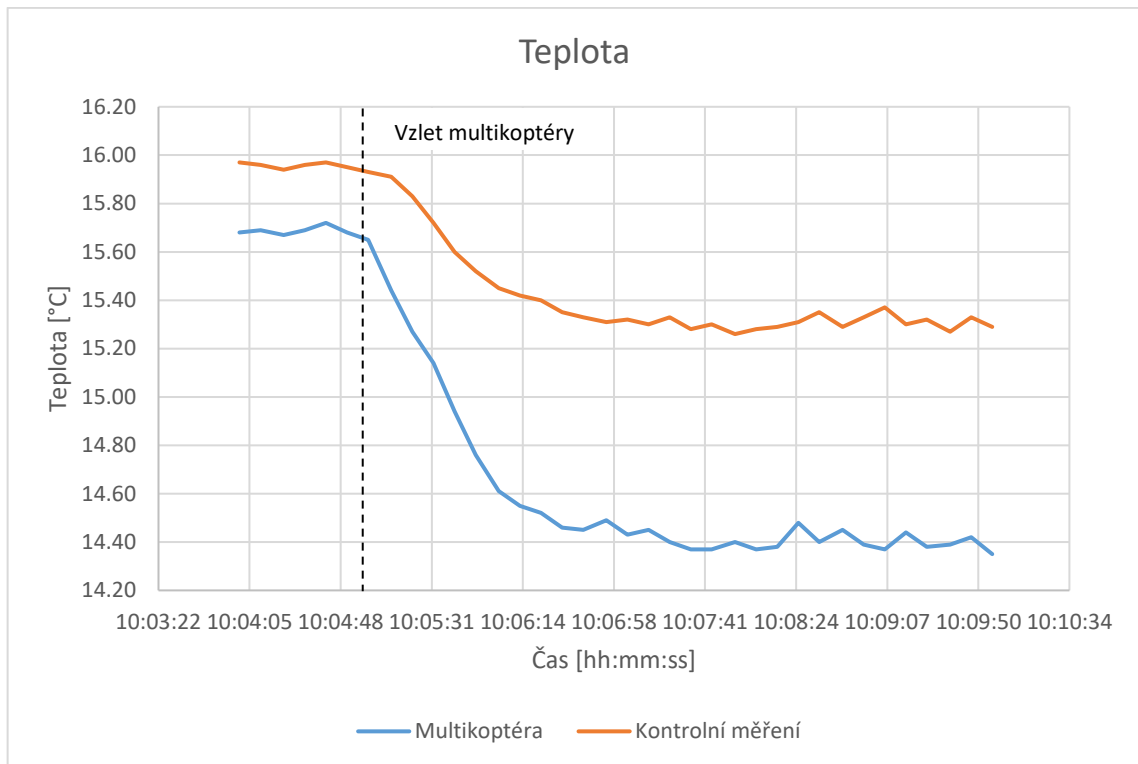
| Data zaznamenaná s pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--|---|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 1 minutu před vzletem | 15,78 | 41,12 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 14,87 | 43,48 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,91 | 2,36 |

Tabulka 10 - Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci A1 [autor práce]

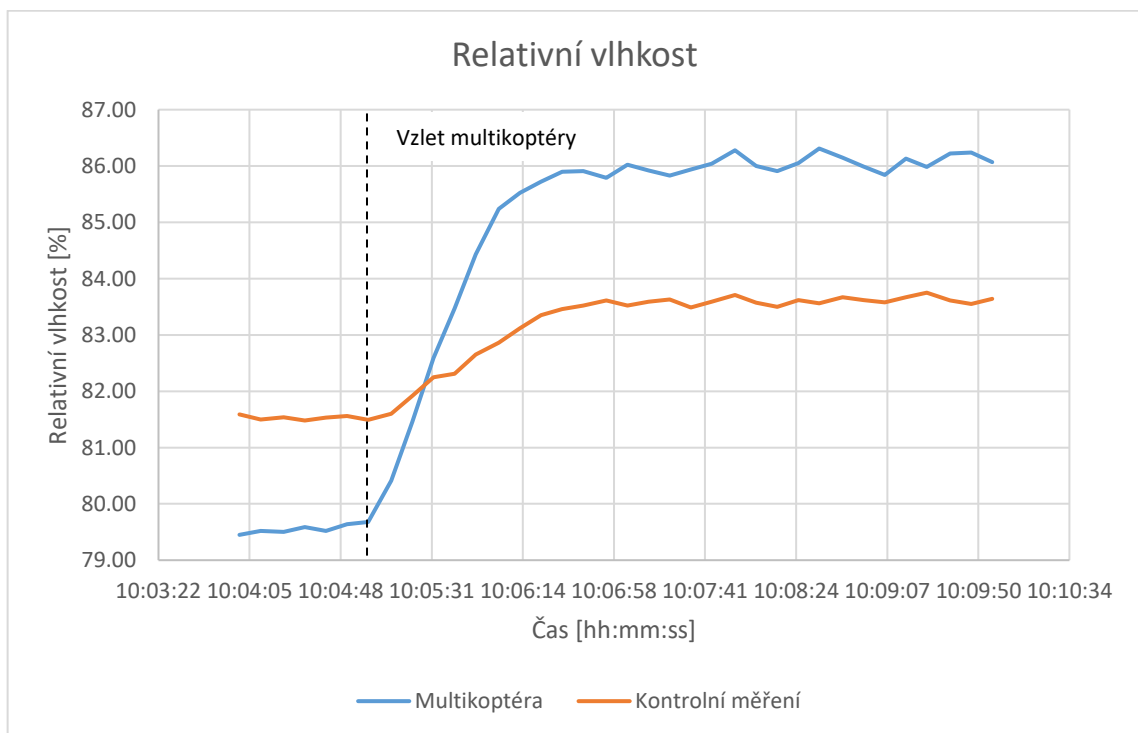
| Data kontrolního měření | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--|---|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 1 minutu před vzletem | 16,00 | 42,00 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 15,75 | 42,50 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,25 | 0,5 |

Tabulka 11 - Data kontrolního měření pro situaci A1 [autor práce]

Situace A2 ($T \approx 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $R.H. \approx 80 \%$)



Graf 12 - Teplota pro situaci A2 [autor práce]



Graf 13 - Relativní vlhkost pro situaci A2 [autor práce]

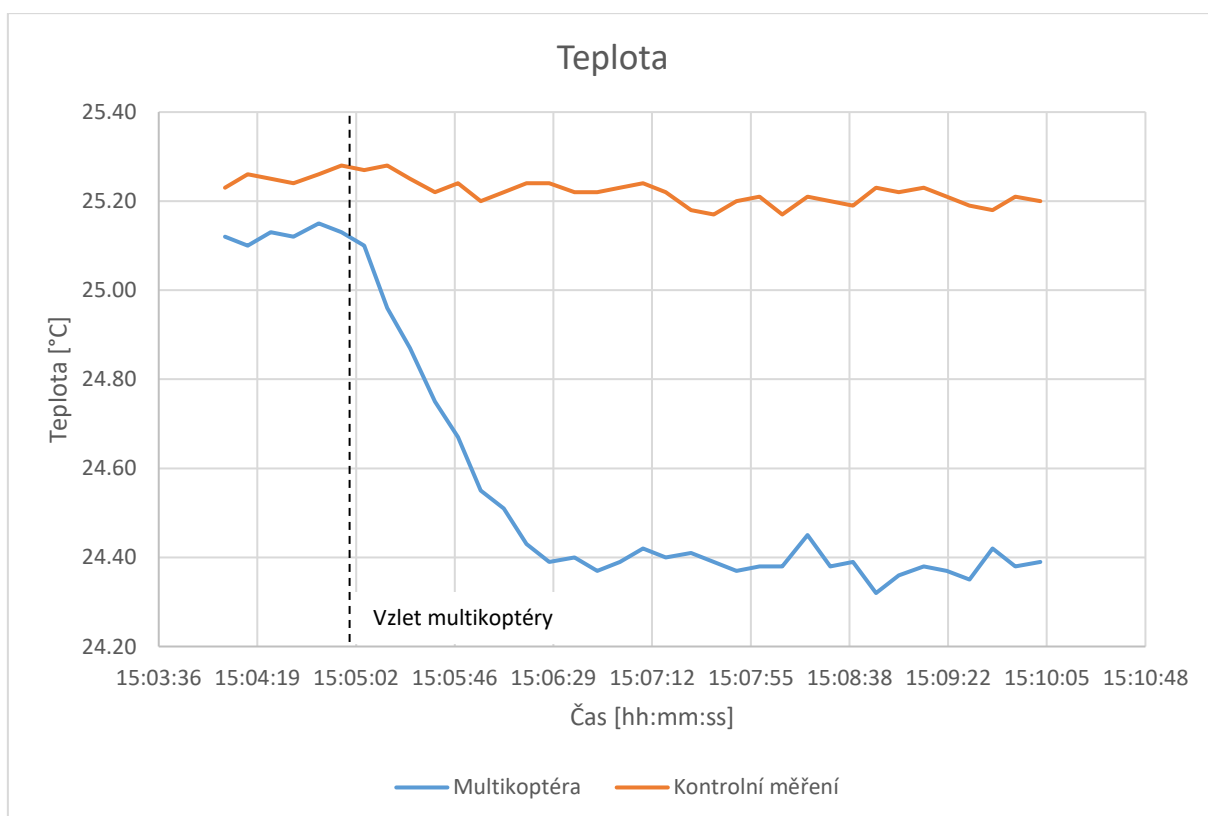
| Data zaznamenaná s pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--|---|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 1 minutu před vzletem | 15.69 | 79.54 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 14.43 | 85.96 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -1,26 | 6,42 |

Tabulka 12 - Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci A2 [autor práce]

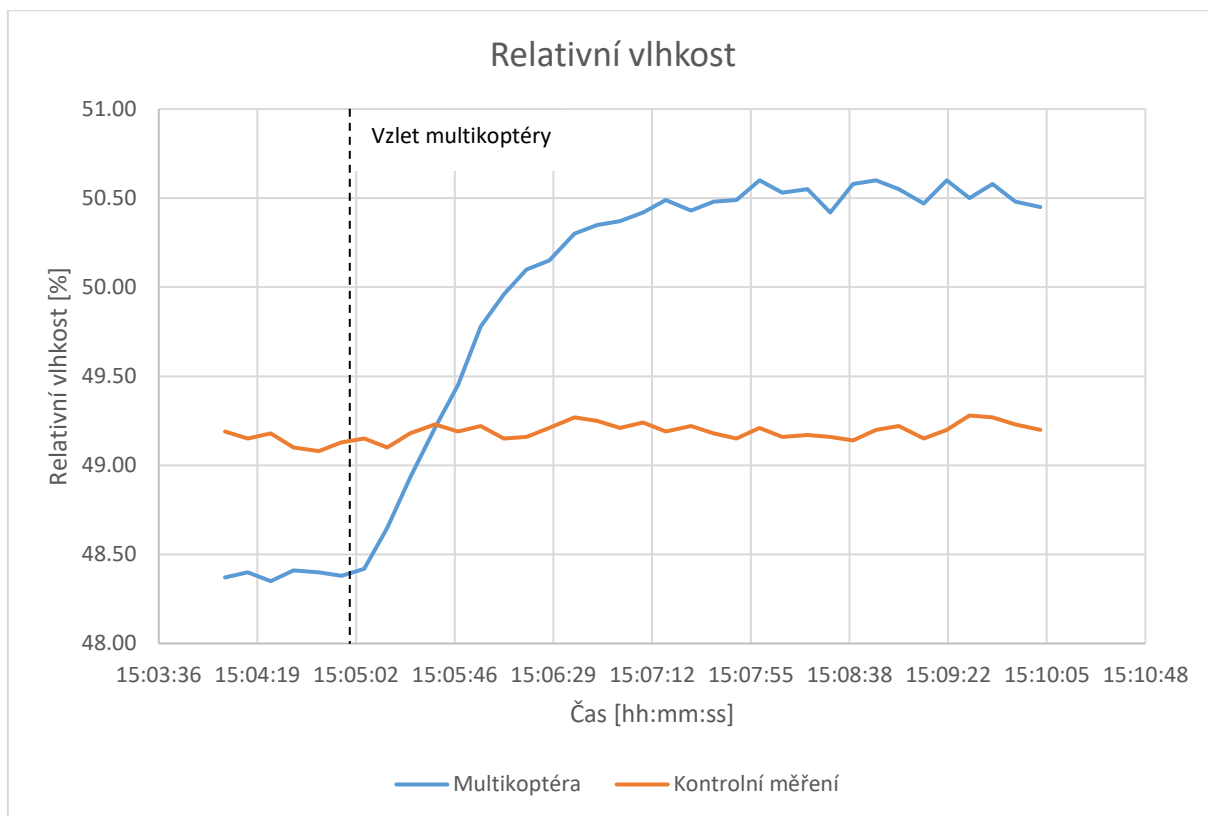
| Data kontrolního měření | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--|---|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 1 minutu před vzletem | 15.96 | 81.53 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 15.32 | 83.53 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,64 | 2,00 |

Tabulka 13 - Data kontrolního měření pro situaci A2 [autor práce]

Situace A3 (T≐25 °C, R.H.≐50 %)



Graf 14 - Teplota pro situaci A3 [autor práce]



Graf 15 - Relativní vlhkost pro situaci A3 [autor práce]

| Data zaznamenaná s pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--|---|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 1 minutu před vzletem | 25,13 | 48,39 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 24,39 | 50,44 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,74 | 2,05 |

Tabulka 14 - Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci A3 [autor práce]

| Data kontrolního měření | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--|---|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 1 minutu před vzletem | 25,25 | 49,14 |
| | Interval 4 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu | 25,21 | 49,20 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po – průměr před) | | -0,04 | 0,06 |

Tabulka 15 - Data kontrolního měření pro situaci A3 [autor práce]

Interpretace naměřených dat

| | T \pm 16 °C, R.H. \pm 40 % | T \pm 16 °C, R.H. \pm 80 % | T \pm 20 °C, R.H. \pm 50 % | T \pm 25 °C, R.H. \pm 50 % |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Rozdíl průměrných hodnot zaznamenaný multikoptérou – Rozdíl průměrných naměřených hodnot zaznamenaný kontrolním měřením | -0,66 °C | -0,62 °C | -0,60 °C | -0,70 °C |

Tabulka 16 - Zaznamenané rozdíly dat v jednotlivých situacích [autor práce]

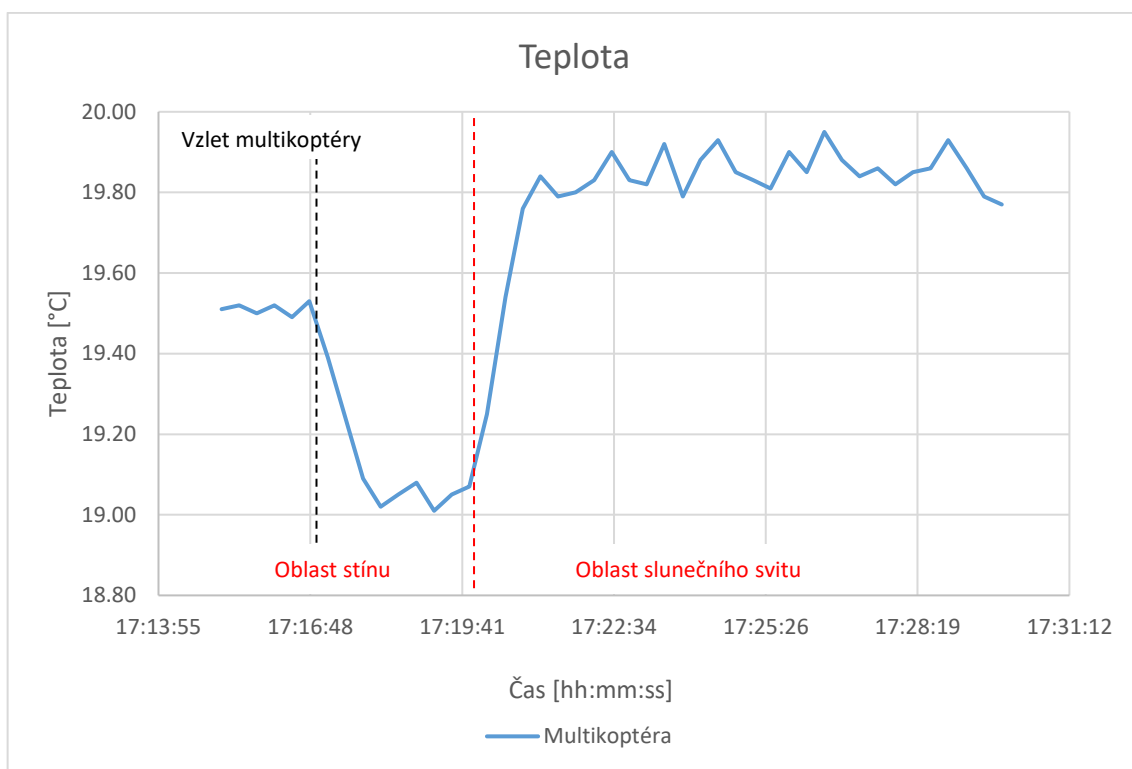
Jak vyplývá z tabulky 16, nebyla zaznamenána žádná výrazná závislost mezi hodnotou měřeného poklesu teploty zapříčiněného spuštěním a vzletem multikoptéry a podmínkami vlhkosti a teploty panujícími v prostředí, ve kterém měření probíhalo. Není vyloučeno, že za podmínek extrémnějších teplot či vlhkosti taková vazba nemůže existovat, v intervalech hodnot teploty a vlhkosti pokrytých v této kapitole však patrně není pro výslednou zaznamenanou chybu měření stěžejní. Dále je nutné zmínit fakt, že velikost této chyby je vázána na konkrétní použité senzory a při využití senzorů odlišných může nabývat rozdílných hodnot.

Nárůst měřené hodnoty relativní vlhkosti v jednotlivých případech je přičítán právě výše popsanému poklesu teploty.

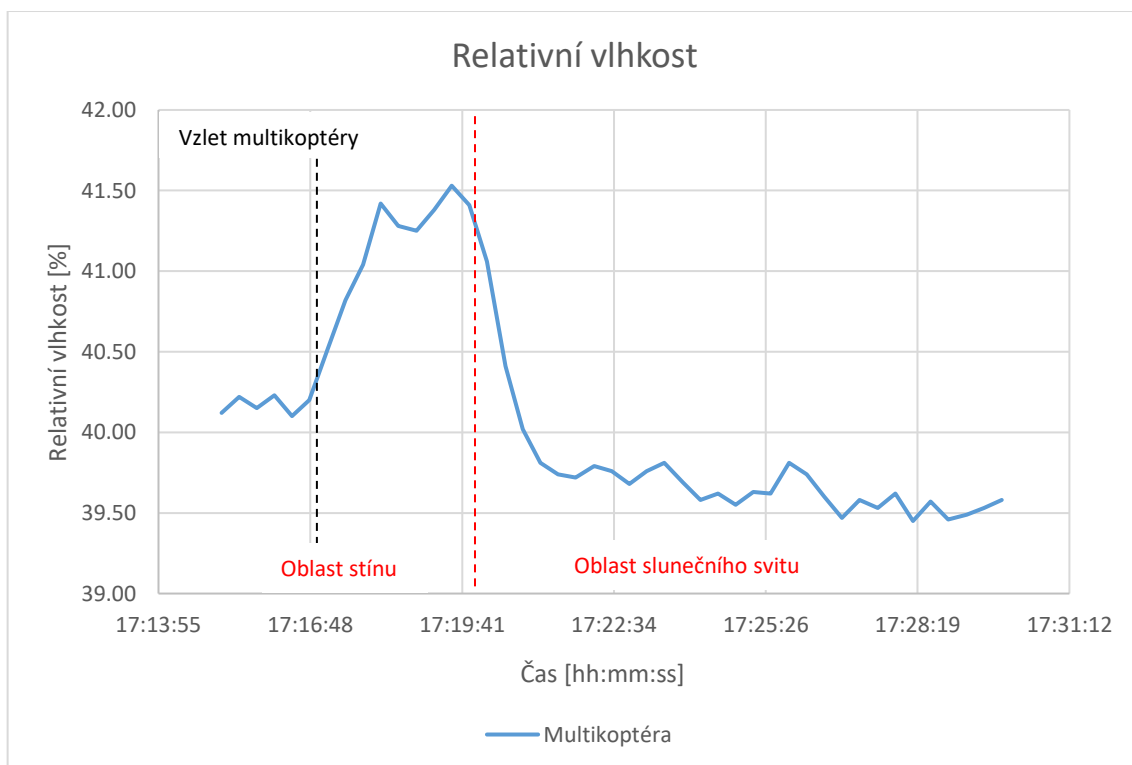
5.3 Měření pod přímým slunečním zářením

Vytvořené měřicí zařízení samo o sobě, bez jeho připevnění k multikoptéře, není zcela evidentně vhodné pro měření v místech, kde je vystaveno přímému působení sluneční radiace. Právě v kombinaci s multikoptérou, která, jak již bylo mimo jiné uvedeno, zapříčiňuje ochlazování připevněných senzorů, může být teoreticky takové zařízení využito k měření pod přímým slunečním zářením bez využití jakéhokoliv radiačního štítu. Pro ověření této teze byla naměřena data za dvou odlišných teplotních situacích ve venkovních prostorech. Naměřená data jsou uvedena v grafech 16, 17, 18 a 19 a tabulkách 17 a 18. Záznamy při těchto měřeních byly pořizovány v intervalech 20 sekund.

Situace B1 ($T \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$)



Graf 16 - Teplota pro situaci B1 [autor práce]

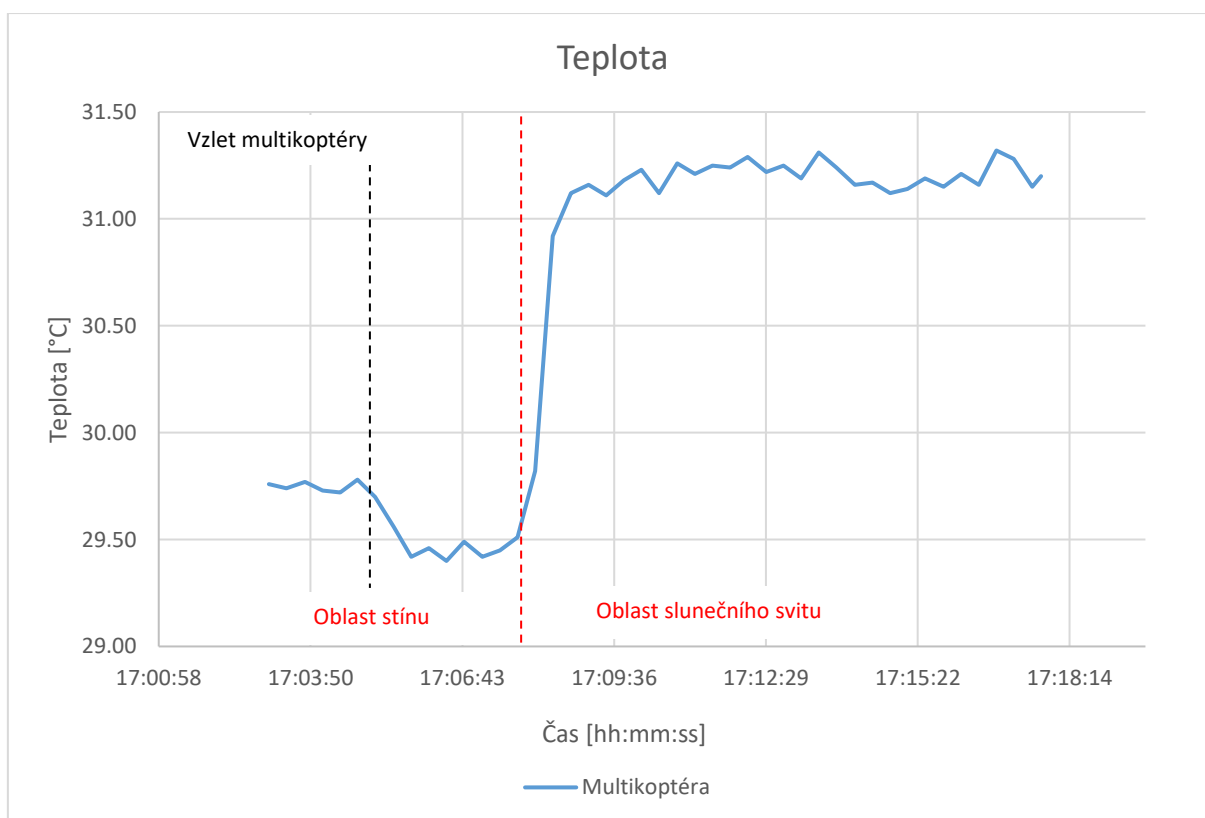


Graf 17 - Relativní vlhkost pro situaci B1 [autor práce]

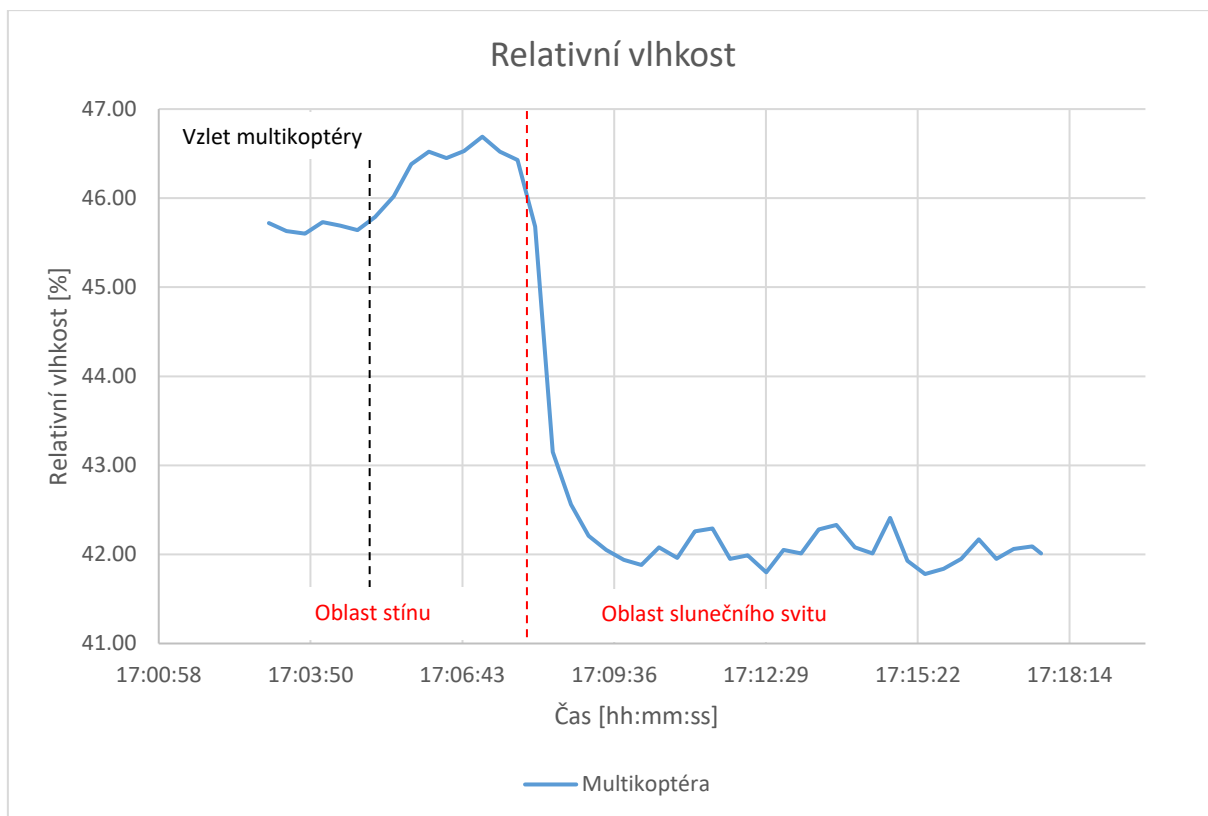
| Data zaznamenaná pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|---|--|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 2 minut před vzletem ve stínu | 19,51 | 40,17 |
| | Interval 2 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu ve stínu | 19,05 | 41,38 |
| | Interval 9 minut počínající uplynutím 1. minuty po přeletu do oblasti slunečního svitu | 19,85 | 39,64 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po přeletu do oblasti slunečního svitu – průměr před vzletem ve stínu) | | 0,34 | -0,53 |

Tabulka 17 - Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci B1 [autor práce]

Situace B2 ($T \approx 30 \text{ °C}$)



Graf 18 - Teplota pro situaci B2 [autor práce]



Graf 19 - Relativní vlhkost pro situaci B2 [autor práce]

| Data zaznamenaná pomocí multikoptéry | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|---|--|--------------|-----------------------|
| Průměrná hodnota měřených hodnot | Interval 2 minut před vzletem ve stínu | 29,75 | 45,67 |
| | Interval 2 minut počínající uplynutím 1. minuty po vzletu ve stínu | 29,46 | 46,52 |
| | Interval 9 minut počínající uplynutím 1. minuty po přeletu do oblasti slunečního svitu | 31,20 | 42,05 |
| Rozdíl průměrných hodnot (průměr po přeletu do oblasti slunečního svitu – průměr před vzletem ve stínu) | | 1,45 | -3,62 |

Tabulka 18 - Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci B2 [autor práce]

Interpretace naměřených dat

Z grafů a tabulek naměřených dat je zcela evidentní, že i přes silné ochlazování senzorů vlivem proudícího vzduchu urychleného vrtulemi multikoptéry, má sluneční radiace na výsledné měřené hodnoty vliv. Při používání takto koncipovaného zařízení pro měření hodnot pod přímým slunečním svitem je tedy nutné počítat s tím, že zaznamenávané hodnoty budou o něco vyšší, než je jejich skutečná hodnota v prostředí. Nicméně ani nejvyšší naměřený rozdíl teplot zaznamenaný při reálné teplotě ve stínu blízké 30 °C, který činil 1,45 °C, nevylučuje využití

takovéhoto zařízení k této formě měření. Jen je nezbytné zmíněný vliv při měření zohlednit. Naměřená data relativní vlhkosti opět pouze korelovala se změnami zaznamenané teploty.

5.4 Měření ve 30 metrech nad zemí

Konečné měření bylo provedeno v okolí rozhledny Špulka ležící ve výšce 530 metrů nad mořem ve Středočeském kraji. Za účelem eliminace vlivu slunečního záření byla data zaznamenávána po západu slunce v časech občanského soumraku dne 22.07.2020. Cílem bylo naměřit a porovnat data zaznamenaná s pomocí multikoptéry s daty naměřenými druhým měřicím zařízením umístěným ve 30 metrech nad zemí. Multikoptéra se vyskytovala v průběhu měření ve stejné výšce nedaleko od rozhledny. Rozhledna Špulka je k vidění v pozadí obrázku 23.



Obrázek 23 - Měření u rozhledny Špulka [autor práce]

Jak již z minulých měření vyplynulo, měřené hodnoty obou zařízení vykazují určité vzájemné odchylky, tudíž bylo nejprve nutné ověřit, jak velký byl vzájemný rozdíl v zaznamenaných datech mezi oběma zařízeními v klidovém stavu v daných podmínkách. Obě zařízení tak byla nejprve umístěna na rozhlednu do výšky 30 metrů nad zemí a zaznamenávala data po dobu 3 minut v intervalech 10 sekund. Toto měření je znázorněno na obrázku 24.



Obrázek 24 - Porovnání měřených hodnot [autor práce]

V tabulce 19 jsou zaznamenané rozdíly uvedeny.

| | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota 3minutového intervalu měření | Multikoptéra | 18,09 | 52,03 | 952,85 |
| | Kontrolní měřicí zařízení | 18,35 | 52,91 | 952,65 |
| Průměrný rozdíl zaznamenávaných hodnot (průměr zaznamenaný multikoptérou - průměr kontrolního zařízení) | | -0,26 | -0,88 | 0,2 |

Tabulka 19 - Porovnání zaznamenávaných dat v klidovém stavu [autor práce]

Po provedení tohoto měření bylo provedeno měření konečné, kdy byla již data zaznamenávána po dobu 5 minut multikoptérou za letu. Interval mezi záznamy dat činil opět 10 sekund. V tabulce 20 jsou výsledné hodnoty uvedeny.

| | | Teplota [°C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
|--|------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| Průměrná hodnota 5minutového intervalu měření | Multikoptéra | 17,65 | 53,15 | 952,81 |
| | Kontrolní měřicí zařízení | 18,08 | 53,44 | 952,72 |
| Průměrný rozdíl zaznamenávaných hodnot (průměr kontrolního zařízení – průměr zaznamenaný multikoptérou) | | -0,43 | -0,29 | 0,09 |
| Výsledný rozdíl zaznamenaných dat (průměrný rozdíl zaznamenaný při měření s multikoptérou za letu – průměrný rozdíl zaznamenaný při srovnávacím měření z tabulky 18) | | -0,17 | 0,59 | -0,11 |

Tabulka 20 - Porovnání naměřených dat při letu multikoptéry [autor práce]

Z uvedených dat vyplývá, že byla multikoptérou zaznamenávaná data opět velice blízká datům kontrolního měření a hodnoty uvedených rozdílů veskrze odpovídaly uvedeným stavům v předchozích kapitolách. V tomto případě byl rozdíl mezi teplotou zaznamenanou s pomocí multikoptéry a teplotou zaznamenanou kontrolním měřicím zařízením dokonce nejnižší ze všech uvedených měření. Tento stav mohl být zapříčiněn povětrnostními podmínkami, které v místě umístění senzoru v danou chvíli panovaly, a díky kterým tak mohl zaznamenávat o něco málo nižší teplotu i senzor kontrolního měření.

Zároveň byla tímto měřením ověřena stabilita a ovladatelnost multikoptéry doplněné o měřicí zařízení, a to i za zmíněných větrných podmínek.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo analyzovat využití bezpilotních letadel k provádění meteorologických měření a pozorování a následně provedení a zhodnocení praktického měření právě za pomoci bezpilotního letadla.

V teoretické části práce je tak uvedeno souhrnné zmapování příkladů aerologických měření, která byla za pomoci bezpilotních letadel v minulosti provedena, a zároveň nastíněn možný budoucí vývoj v této oblasti. Teoretická část této práce tedy nejprve nabídla čtenáři možnost se seznámit se základními informacemi o aerologických měřeních. Dále byl zmíněn popis dění v mezní vrstvě atmosféry, která je pro značné množství aerologických měření klíčovou oblastí. Posléze bylo uvedeno základní dělení bezpilotních letadel následované popisem konkrétních druhů, které se pro aerologická pozorování v současnosti primárně využívají. Poslední kapitola teoretické části práce byla věnována konkrétním příkladům využití bezpilotních letadel v meteorologii. V této kapitole byl nejprve uveden detailní popis formy aerologických měření prováděných Českým hydrometeorologickým ústavem následovaný popisem úspěchů, kterých lidstvo dosáhlo při pozorování tropických cyklon s bezpilotními letadly. Dále byl popsán možný způsob, jakým bude v budoucnu pozorován vývoj oblačnosti, za jakými účely a s pomocí jakých bezpilotních letadel provádí pozorování americký úřad NASA, k čemu slouží multikoptéry společnosti Meteomatics, poté byl zmíněn popis bezpilotního letadla SUMO a na závěr byly uvedeny příklady využití bezpilotních vzducholodí k meteorologickým účelům.

Jak tedy z teoretické části práce plyne, aerologická měření prováděná s pomocí meteorologických balónů jsou pouze jednou z mnoha forem využití bezpilotních letadel k meteorologickým pozorováním. Vzhledem ke svým charakteristickým vlastnostem, uvedeným v této práci, o svou pozici v oblasti aerologie pravděpodobně nepřijdou, nicméně lze očekávat, že budou postupně v určitých případech stále více nahrazovány jinými druhy bezpilotních letadel.

Praktická část práce věnovaná sestrojení meteorologického měřicího zařízení pak poukazuje na to, že i z běžně dostupné multikoptéry lze bez větších překážek sestrojít spolehlivé bezpilotní meteorologické letadlo, s pomocí kterého je možné provádět aerologická měření. V této části práce byl nejprve uveden detailní popis postupu sestrojení celého zařízení následovaný sérií několika měření, která toto tvrzení prokazují. Nejprve tedy bylo nutné zvolit vhodný měřicí hardware, který by bylo možné bezpečně připevnit k multikoptéře DJI Mavic Pro. Tím se stal mikrokontrolér Arduino doplněný o dvojici patřičných senzorů, které zaznamenávaly hodnoty teploty, relativní vlhkosti a lokálního tlaku. Následně byl vytvořen kód, díky kterému bylo nadefinováno chování měřicího zařízení podle předem stanovených požadavků. V práci je dále uveden popis multikoptéry, která posloužila jako nosič již zmíněného měřicího zařízení. Při samotných měřeních bylo nejprve nalezeno vhodné umístění senzorů na multikoptéře, následně ověřena velikost chyb zavedených do měření za různých podmínek, poté prozkoumán vliv sluneční radiace na měřené hodnoty a na závěr provedeno měření ve 30 metrech nad zemským povrchem. Jak plyne ze zaznamenaných dat, i přes to, že rozvířená vzduchová hmota v bezprostředním okolí multikoptéry může mít na výsledné měřené hodnoty určitý negativní vliv, není využití takového zařízení nikterak vyloučeno.

Během všech provedených měření nenastal jediný problém s obratností a stabilitou multikoptéry, tudíž ani toto není překážkou pro případné využití takového zařízení. Jeden z mála problémů vidím pouze v omezeném dostupu a výdrži současných multikoptér. Zejména pak právě tyto údaje v současnosti rozhodují pro jaký druh aerologických měření jsou multikoptéry, jako bezpilotní letadla, vhodné a pro jaký nikoliv. Nicméně i v této oblasti lze vzhledem k neustále rostoucí popularitě multikoptér očekávat do budoucna určité zlepšení.

Seznam použité literatury:

- [1] STOVER, Elizabeth. The History of Weather Balloons. *Sciencing* [online]. [vid. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://sciencing.com/history-weather-balloons-5050060.html>
- [2] VYSOUDIL, Miroslav. *Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2004. ISBN 978-80-244-0875-0.
- [3] KLEPÁRNÍK, Jan. *Odporové snímače teploty* [online]. [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_teodporove.htm
- [4] KUČERA, Pavel. *Palubní přístroje I*. Praha, 2001. Diplomová práce. Fakulta dopravní ČVUT v Praze.
- [5] NESE, Martin a Björn Erik SEEBERG. Silicon MEMS Pressure Sensors for Aerospace Applications. In: *CANEUS 2006: MNT for Aerospace Applications: CANEUS2006: MNT for Aerospace Applications* [online]. Toulouse, France: ASMEDC, 2006, s. 195–198 [vid. 2020-02-03]. ISBN 978-0-7918-4254-6. Dostupné z: [doi:10.1115/CANEUS2006-11044](https://doi.org/10.1115/CANEUS2006-11044)
- [6] Pressure Sensors. *STMicroelectronics* [online]. [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/pressure-sensors.html>
- [7] DEJAN. DHT11 & DHT22 Sensor Temperature and Humidity Tutorial. *HowToMechatronics* [online]. 13. leden 2016 [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/dht11-dht22-sensors-temperature-and-humidity-tutorial-using-arduino/>
- [8] US DEPARTMENT OF COMMERCE, NOAA. A Brief History of Upper-air Observations. *NOAA* [online]. [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.weather.gov/upperair/reqdahdr>
- [9] RAUTENBERG, Alexander, Martin S. GRAF, Norman WILDMANN, Andreas PLATIS a Jens BANGE. Reviewing Wind Measurement Approaches for Fixed-Wing Unmanned Aircraft. *Atmosphere* [online]. 2018, 9(11), 422 [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: [doi:10.3390/atmos9110422](https://doi.org/10.3390/atmos9110422)
- [10] UAV Ultrasonic Wind Sensors | Drone Anemometers | FT Technologies. *Unmanned Systems Technology* [online]. [vid. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/ft-technologies/>
- [11] Aerologie - měření ozonu. *ČHMÚ* [online]. [vid. 2020-03-19]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_ozon.html
- [12] Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně. *FN Motol* [online]. [vid. 2020-02-11]. Dostupné z: <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospele/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-1/oddeleni-radiologicke-fyziky/obecne-informace-o-radioaktivite-a-radiacni-ochran/>
- [13] Aerologie - měření radioaktivity. *ČHMÚ* [online]. [vid. 2020-03-19]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_radac.html

- [14] KAIMAL, J. C. a J. J. FINNIGAN. *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. New York: Oxford University Press, 1994. ISBN 978-0-19-506239-7.
- [15] CHALOUPECKÁ, Hana. *Proudění a difúze uvnitř městské zástavby*. Praha, 2012. Diplomová práce. Katedra meteorologie a ochrany prostředí Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.
- [16] BEDNÁŘ, Jan a Otakar ZIKMUNDA. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Praha: Academia, 1985.
- [17] FOSTER, Kristina. *Physics of the Atmosphere Physik der Atmosphäre SS 2010 Ulrich Platt Institut f. Umweltphysik R. 424* [online]. [vid. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/7374064/>
- [18] MAYER, Stephanie, Anne SANDVIK, Marius O. JONASSEN a Joachim REUDER. Atmospheric profiling with the UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. *Meteorology and Atmospheric Physics* [online]. 2012, **116**(1–2), 15–26 [vid. 2019-12-30]. ISSN 0177-7971, 1436-5065. Dostupné z: doi:10.1007/s00703-010-0063-2
- [19] *v-3.jpg (1280×763)* [online]. [vid. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.liaz-uav.com/assets/images/v-3.jpg>
- [20] *balon.jpg (319×435)* [online]. [vid. 2020-08-03]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/balon.jpg>
- [21] KUTHAN, Aleš. *Analýza rizik u bezpilotních systémů*. Praha, 2019. Bakalářská práce. Fakulta dopravní ČVUT v Praze.
- [22] *ed13-0399-17.jpg (985×657)* [online]. [vid. 2020-08-03]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/sites/default/files/styles/full_width/public/thumbnails/image/ed13-0399-17.jpg?itok=gglLuq7B
- [23] KELLER, Ladislav. Učební texty pro piloty UAS. *Dronim*. 2017.
- [24] NONAMI, Kenzo. Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV. *Journal of System Design and Dynamics* [online]. 2007, **1**(2), 120–128 [vid. 2020-02-10]. ISSN 1881-3046. Dostupné z: doi:10.1299/jsdd.1.120
- [25] WATTS, Adam C., Vincent G. AMBROSIA a Everett A. HINKLEY. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing* [online]. 2012, **4**(6), 1671–1692 [vid. 2020-02-10]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs4061671
- [26] GREENE, Brian, Antonio SEGALES, Tyler BELL, Elizabeth PILLAR-LITTLE a Phillip CHILSON. Environmental and Sensor Integration Influences on Temperature Measurements by Rotary-Wing Unmanned Aircraft Systems. *Sensors* [online]. 2019, **19**(6), 1470 [vid. 2020-02-10]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19061470

- [27] KARAS, Jakub. *222 tipů a triků pro drony*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4874-7.
- [28] Aerologická měření. *AirshipClub* [online]. [vid. 2020-02-11]. Dostupné z: <http://www.airshipclub.com/mereni.php>
- [29] KRISCH, Joshua A. Modern Research Borne on a Relic. *The New York Times* [online]. 2014 [vid. 2020-02-08]. ISSN 0362-4331. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2014/08/26/science/airships-that-carry-science-into-the-stratosphere.html>
- [30] Základní aerologické měření. *ČHMÚ* [online]. [vid. 2020-03-20]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_PTU_vitr.html
- [31] Informace o aerologických měřeních. *ČHMÚ* [online]. [vid. 2020-03-19]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_info.html
- [32] Radiosondy. *ČHMÚ* [online]. [vid. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimovosti/nalezli-jste-radiosondu>
- [33] Aktuální aerologická měření stanice Praha - Libuš. *ČHMÚ* [online]. [vid. 2020-03-20]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/ptu_grafy.html
- [34] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie 2017*. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [35] KEPRTOVÁ, Pavlína. *Charakteristiky konvektivního prostředí v atmosféře*. Praha, 2013. Diplomová práce. Katedra meteorologie a ochrany prostředí Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.
- [36] Hurricane Hunters. *NOAA* [online]. [vid. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.oma.noaa.gov/learn/aircraft-operations/about/hurricane-hunters>
- [37] LIN, Po-Hsiung a Cheng-Shang LEE. The Eyewall-Penetration Reconnaissance Observation of Typhoon Longwang (2005) with Unmanned Aerial Vehicle, Aerosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* [online]. 2008, **25**(1), 15–25 [vid. 2020-04-07]. ISSN 1520-0426, 0739-0572. Dostupné z: doi:10.1175/2007JTECHA914.1
- [38] NOAA Advances Hurricane Research Technology with Improved Unmanned Aerial Vehicles. *NOAA* [online]. [vid. 2020-04-07]. Dostupné z: [/improved-unmanned-aerial-vehicles/](#)
- [39] BRAUN, Scott A., Ramesh KAKAR, Edward ZIPSER, Gerald HEYMSFIELD, Ceres ALBERS, Shannon BROWN, Stephen L. DURDEN, Stephen GUIMOND, Jeffery HALVERSON, Andrew HEYMSFIELD, Syed ISMAIL, Bjorn LAMBRIGTSEN, Timothy MILLER, Simone TANELLI, Janel THOMAS a Jon ZAWISLAK. NASA's Genesis and Rapid Intensification Processes (GRIP) Field Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2013, **94**(3), 345–363 [vid. 2020-04-08]. ISSN 0003-0007, 1520-0477. Dostupné z: doi:10.1175/BAMS-D-11-00232.1

- [40] KENUL, Philip Matthew, John Joseph COFFEY, John WALKER, Andy ROBERTS a Jim HUNING. Sensing Hazards with Operational Unmanned Technology :: Cost study of Global Hawk unmanned aircraft system operations for high impact weather observations, final report. [online]. 2018 [vid. 2020-04-08]. Dostupné z: doi:10.7289/V5/TM-OAR-UAS-003
- [41] RENZAGLIA, Alessandro, Christophe REYMANN a Simon LACROIX. Monitoring the Evolution of Clouds with UAVs. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [online]. 2016, s. 278–283 [vid. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01275324>
- [42] COX, Timothy H. Somers. *Earth Observations and the Role of UAVs: A Capabilities Assessment. Version 1.1* [online]. 2006 [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070022505>
- [43] Helios Prototype. *NASA* [online]. [vid. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/news/ResearchUpdate/Helios/>
- [44] Infrasound Sensor Technology. *NASA* [online]. [vid. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-106>
- [45] High Altitude UAV for Monitoring Meteorological Parameters. *NASA* [online]. [vid. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-281>
- [46] QAMAR A. SHAMS a NEIL C. COFFEY. High Altitude UAV for Monitoring Meteorological Parameters [online]. US 2019 / 0154874 A1. 23. březen 2019. USA. [vid. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/63/8e/e6a2f02f5f3af3/US20190154874A1.pdf>
- [47] *How Meteodrones Contribute to Weather Forecasting* [online]. B.m.: Meteomatics. 2020 [vid. 2020-04-11]. Dostupné z: https://www.meteomatics.com/wp-content/uploads/2020/03/Meteomatics_Whitepaper_Meteodrones_20.03.2020.pdf
- [48] Mitigating the impact of coronavirus with Meteomatics weather drones (Meteodrones). *Meteomatics* [online]. [vid. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.meteomatics.com/en/mitigating-the-impact-of-coronavirus-with-meteomatics-weather-drones-meteodrones/>
- [49] *meteodrone_sse.jpg* [online]. [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.meteomatics.com/wp-content/uploads/2019/01/meteodrone_sse.jpg
- [50] REUDER, Joachim, Pascal BRISSET, Marius Müller JONASSEN a Stephanie MAYER. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Meteorologische Zeitschrift* [online]. 2009, **18**(2), 141–147 [vid. 2019-12-20]. ISSN 0941-2948. Dostupné z: doi:10.1127/0941-2948/2009/0363
- [51] MAYER, Stephanie, Marius O. JONASSEN, Anne SANDVIK a Joachim REUDER. Profiling the Arctic Stable Boundary Layer in Advent Valley, Svalbard: Measurements and Simulations. *Boundary-Layer Meteorology* [online]. 2012, **143**(3), 507–526 [vid. 2020-01-10]. ISSN 0006-8314, 1573-1472. Dostupné z: doi:10.1007/s10546-012-9709-6

- [52] *Sumo_tall_tower1.jpg* [online]. [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: https://blog.paparazziuav.org/wp-content/uploads/2015/07/Sumo_tall_tower1.jpg
- [53] SUMO Flights. *CIRES* [online]. [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://ciresblogs.colorado.edu/antarcticuavs/2016/09/09/sumo-flights/>
- [54] O nás. *AirshipClub* [online]. [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <http://www.airshipclub.com/index.php>
- [55] PAVEC, Michal. Vzducholodě z Dejvic měří těžařům znečištění. Stojí o ně i v Ostravě. *Hospodářské noviny* [online]. 26. červen 2013 [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-60135520-vzducholode-z-dejvic-meri-tezarum-znecisten-stoji-o-ne-i-v-ostrave>
- [56] KOBRZEK, Filip. Telefonický rozhovor. 30. duben 2020
- [57] Stratospheric Airships. *Raven Aerostar* [online]. 26. červenec 2020 [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://ravenaerostar.com/products/balloons-airships/stratospheric-airships>
- [58] *Digitální senzor teploty a vlhkosti HTU21D* [online]. [vid. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/docs/produkty/0/369/1484094054.pdf>
- [59] *BMP180 Barometric Pressure Sensor Hookup* [online]. [vid. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-155.1.pdf>
- [60] DJI Mavic Pro – Specs, Tutorials & Guides – DJI. *DJI Official* [online]. [vid. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/mavic/info>

Seznam obrázků, tabulek a grafů

| | |
|-------------------|--|
| Obrázek 1 | Tlakový MEMS senzor s křemíkovou membránou [6] |
| Obrázek 2 | Schéma kapacitního vlhkoměru [7] |
| Obrázek 3 | DJI Phantom s anemometrem [10] |
| Obrázek 4 | Schéma podvrstev mezní vrstvy atmosféry [17] |
| Obrázek 5 | Bezpilotní vrtulník LIAZ SkySpotter 150 [19] |
| Obrázek 6 | Bezpilotní meteorologický balón ČHMÚ [20] |
| Obrázek 7 | Bezpilotní vzducholoď AirshipClub X15 hybrid [21] |
| Obrázek 8 | Bezpilotní letoun RQ-4 Global Hawk [22] |
| Obrázek 9 | Emagram do hladiny 100 hPa [33] |
| Obrázek 10 | Skew-T diagram do hladiny 100 hPa [33] |
| Obrázek 11 | Možný vliv využití zařízení společnosti Meteomatics ke zpřesnění meteorologické předpovědi [47] |
| Obrázek 12 | Multikoptéra společnosti Meteomatics [49] |
| Obrázek 13 | Údaje o teplotě dne 13.08.2007 [18] |
| Obrázek 14 | Údaje o teplotě 18.08.2007 [18] |
| Obrázek 15 | Údaje o vlhkosti dne 13.08.2007 [18] |
| Obrázek 16 | Údaje o vlhkosti dne 18.08.2007 [18] |
| Obrázek 17 | Zařízení SUMO během měření na Antarktidě [52] |
| Obrázek 18 | Zapojení měřicího zařízení [autor práce] |
| Obrázek 19 | DJI Mavic Pro s měřicím modulem [autor práce] |
| Obrázek 20 | Umístění měřicích senzorů pod tělem multikoptéry [autor práce] |
| Obrázek 21 | Umístění senzorů pod rameno multikoptéry [autor práce] |
| Obrázek 22 | Umístění senzorů pod motor multikoptéry [autor práce] |
| Obrázek 23 | Měření u rozhledny Špulka [autor práce] |
| Obrázek 24 | Porovnání měřených hodnot [autor práce] |
| Tabulka 1 | Rozdělení bezpilotních letadel [21] |
| Tabulka 2 | Příklady NASA programů s využitím bezpilotních letadel [42] |
| Tabulka 3 | Kontrolní srovnání měřených hodnot teploty a vlhkosti [autor práce] |
| Tabulka 4 | Data zaznamenaná multikoptérou pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce] |
| Tabulka 5 | Data kontrolního měření pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce] |
| Tabulka 6 | Data zaznamenaná multikoptérou pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce] |
| Tabulka 7 | Data kontrolního měření pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce] |
| Tabulka 8 | Data zaznamenaná multikoptérou pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce] |
| Tabulka 9 | Data kontrolního měření pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce] |
| Tabulka 10 | Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci A1 [autor práce] |
| Tabulka 11 | Data kontrolního měření pro situaci A1 [autor práce] |
| Tabulka 12 | Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci A2 [autor práce] |

| | |
|-------------------|---|
| Tabulka 13 | Data kontrolního měření pro situaci A2 [autor práce] |
| Tabulka 14 | Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci A3 [autor práce] |
| Tabulka 15 | Data kontrolního měření pro situaci A3 [autor práce] |
| Tabulka 16 | Zaznamenané rozdíly dat v jednotlivých situacích [autor práce] |
| Tabulka 17 | Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci B1 [autor práce] |
| Tabulka 18 | Data zaznamenaná multikoptérou pro situaci B2 [autor práce] |
| Tabulka 19 | Porovnání zaznamenávaných dat v klidovém stavu [autor práce] |
| Tabulka 20 | Porovnání naměřených dat při letu multikoptéry [autor práce] |
| | |
| Graf 1 | Teplota pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce] |
| Graf 2 | Relativní vlhkost pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce] |
| Graf 3 | Lokální tlak pro umístění senzorů pod centrální částí multikoptéry [autor práce] |
| Graf 4 | Teplota pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce] |
| Graf 5 | Relativní vlhkost pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce] |
| Graf 6 | Lokální tlak pro umístění senzorů pod ramenem multikoptéry [autor práce] |
| Graf 7 | Teplota pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce] |
| Graf 8 | Relativní vlhkost pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce] |
| Graf 9 | Lokální tlak pro umístění senzorů pod motorem multikoptéry [autor práce] |
| Graf 10 | Teplota pro situaci A1 [autor práce] |
| Graf 11 | Relativní vlhkost pro situaci A1 [autor práce] |
| Graf 12 | Teplota pro situaci A2 [autor práce] |
| Graf 13 | Relativní vlhkost pro situaci A2 [autor práce] |
| Graf 14 | Teplota pro situaci A3 [autor práce] |
| Graf 15 | Relativní vlhkost pro situaci A3 [autor práce] |
| Graf 16 | Teplota pro situaci B1 [autor práce] |
| Graf 17 | Relativní vlhkost pro situaci B1 [autor práce] |
| Graf 18 | Teplota pro situaci B2 [autor práce] |
| Graf 19 | Relativní vlhkost pro situaci B2 [autor práce] |

Seznam příloh

| | |
|--------------------|--|
| Příloha č.1 | Kód měřicího zařízení |
| Příloha č.2 | Kalibrační list dataloggeru Garni GAR 195 |
| Příloha č.3 | Ukázka zaznamenávaných dat ve formátu txt |
| Příloha č.4 | Ukázka zaznamenávaných dat ve formátu xlsx |

Příloha č.1 - Kód měřicího zařízení

```
#include <Wire.h>
#include <SparkFunHTU21D.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "RTClib.h"

HTU21D htu;
Adafruit_BMP085 bmp;
RTC_DS1307 DS1307;

const int sd_CS = 10;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  bmp.begin();
  htu.begin();
  DS1307.begin();
  SD.begin(sd_CS);
  Serial.println("Pocatek mereni");

  String data1 = "Pocatek mereni";
  File zapisDat = SD.open("mereni.txt", FILE_WRITE);
  zapisDat.println(data1);
  zapisDat.close();
}

void loop() {
  float vlhkost = htu.readHumidity();
  float teplota = htu.readTemperature();
  float tlak = bmp.readPressure();
  float tlakhpa = tlak/100;
  DateTime datumCas = DS1307.now();

  Serial.print(datumCas.day());
  Serial.print(".");
  Serial.print(datumCas.month());
  Serial.print(".");
  Serial.print(datumCas.year());
  Serial.print(" ");
  Serial.print(datumCas.hour());
  Serial.print(":");
  Serial.print(datumCas.minute());
  Serial.print(":");
  Serial.print(datumCas.second());
  Serial.println();

  Serial.print("Teplota ");
  Serial.print(teplota);
  Serial.println(" C");
  Serial.print("Vlhkost ");
  Serial.print(vlhkost);
  Serial.println(" %");
  Serial.print("Lokalni tlak ");
  Serial.print(tlakhpa);
  Serial.println(" hPa");

  String data2;
  data2 += String(datumCas.day()) + "."
  + String(datumCas.month()) + "."
  + String(datumCas.year()) + " "
  + String(datumCas.hour()) + ":"
  + String(datumCas.minute()) + ":"
  + String(datumCas.second()) + " ";
  data2 += "Teplota: " + String(teplota) + " C ";
  data2 += "Vlhkost: " + String(vlhkost) + " % ";
  data2 += "Lokalni tlak: " + String(tlakhpa) + " hPa ";

  File zapisDat = SD.open("mereni.txt", FILE_WRITE);

  if (zapisDat) {
    zapisDat.println(data2);
    zapisDat.close();
    Serial.println("Zapis na kartu uspesny.");
  }
  else {
    Serial.println("Chyba pri otevreni souboru mereni.txt.");
  }
  Serial.println();
  delay(10000);
}
```

Příloha č.2 - Kalibrační list dataloggeru Garni GAR 195

KALIST AKL s.r.o., Kalibrační laboratoř
Kalibrační laboratoř č. 2394 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005
Třebětice 8, 769 01 Holešov
www.kalist.cz, kalist@kalist.cz, tel. 577 700 004, 778 489 783



KALIBRAČNÍ LIST

Strana 1 z 1

Číslo kalibračního listu: **KLT - 18K - 2810**
Datum vystavení: 26.6.2018
Kalibrační list schválil: Ing. Gabriela Adamcová, vedoucí laboratoře



Zákazník: Metroservis s. r. o.
Kladenská 49, 273 53 Hostouň

Kalibrované měřidlo: datalogger teploty a vlhkosti

typ-označení: GAR 195
výrobce: Garni
výrobní / eviden. číslo: 160520228 / -
rozsah měřidla (°C): -40 až 70

Umístění měřidla: Metroservis s. r. o. - provoz

Použité etalony: El. digitální teploměr, typ F100-A-2, v. č. 011861/03, sonda
v. č.: 351166-2, kal. list č. 6036-KL-E0090-16

Kalibrační postup: KP-03

Místo měření: KALIST AKL s.r.o., Třebětice 8, 769 01 Holešov

Podmínky při měření: teplota vzduchu: 22,3 °C

Výsledky měření ve °C:

| etalon laboratoře | kalibrované měřidlo | nejistota | chyba měřidla | poznámka |
|-------------------|---------------------|-----------|---------------|----------|
| -20,00 | -19,3 | 0,5 | 0,7 | |
| -18,00 | -17,4 | 0,5 | 0,6 | |
| 0,00 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | |
| 7,00 | 7,2 | 0,5 | 0,2 | |

Chyba měřidla je hodnota měřidla minus hodnota etalonu.

Rozšířená nejistota uvedená v tabulce naměřených hodnot je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$. Pro normální rozdělení odpovídá pokrytí přibližně 95% pravděpodobnosti. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.

Datum kalibrace: 26.6.2018

Tento dokument nesmí být bez písemného schválení laboratoře rozmnožován jinak, než celý a beze změn. Naměřené údaje a hodnoty se vztahují ke dni a místu, ve kterých byla kalibrace provedena.

--- Konec kalibračního listu ---

Příloha č.3 – Ukázka zaznamenávaných dat ve formátu txt

Pocatek mereni

```
21.5.2020 12:5:0 Teplota: 19.93 C Vlhkost: 52.90 % Lokalni tlak: 970.20 hPa
21.5.2020 12:5:10 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.91 % Lokalni tlak: 970.25 hPa
21.5.2020 12:5:20 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.93 % Lokalni tlak: 970.22 hPa
21.5.2020 12:5:30 Teplota: 19.93 C Vlhkost: 52.90 % Lokalni tlak: 970.25 hPa
21.5.2020 12:5:41 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.86 % Lokalni tlak: 970.20 hPa
21.5.2020 12:5:51 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.91 % Lokalni tlak: 970.19 hPa
21.5.2020 12:6:1 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.92 % Lokalni tlak: 970.18 hPa
21.5.2020 12:6:11 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.88 % Lokalni tlak: 970.20 hPa
21.5.2020 12:6:21 Teplota: 19.90 C Vlhkost: 52.87 % Lokalni tlak: 970.15 hPa
21.5.2020 12:6:31 Teplota: 19.89 C Vlhkost: 52.89 % Lokalni tlak: 970.14 hPa
21.5.2020 12:6:42 Teplota: 19.89 C Vlhkost: 52.93 % Lokalni tlak: 970.19 hPa
21.5.2020 12:6:52 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.90 % Lokalni tlak: 970.12 hPa
21.5.2020 12:7:2 Teplota: 19.90 C Vlhkost: 52.95 % Lokalni tlak: 970.13 hPa
21.5.2020 12:7:12 Teplota: 19.90 C Vlhkost: 52.97 % Lokalni tlak: 970.15 hPa
21.5.2020 12:7:22 Teplota: 19.90 C Vlhkost: 52.95 % Lokalni tlak: 970.13 hPa
21.5.2020 12:7:33 Teplota: 19.93 C Vlhkost: 52.96 % Lokalni tlak: 970.19 hPa
21.5.2020 12:7:43 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.91 % Lokalni tlak: 970.18 hPa
21.5.2020 12:7:53 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.92 % Lokalni tlak: 970.21 hPa
21.5.2020 12:8:3 Teplota: 19.90 C Vlhkost: 52.95 % Lokalni tlak: 970.20 hPa
21.5.2020 12:8:13 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.86 % Lokalni tlak: 970.17 hPa
21.5.2020 12:8:24 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.89 % Lokalni tlak: 970.18 hPa
21.5.2020 12:8:34 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.84 % Lokalni tlak: 970.13 hPa
21.5.2020 12:8:44 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.88 % Lokalni tlak: 970.19 hPa
21.5.2020 12:8:54 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.91 % Lokalni tlak: 970.12 hPa
21.5.2020 12:9:4 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.96 % Lokalni tlak: 970.15 hPa
21.5.2020 12:9:15 Teplota: 19.93 C Vlhkost: 52.89 % Lokalni tlak: 970.09 hPa
21.5.2020 12:9:25 Teplota: 19.92 C Vlhkost: 52.92 % Lokalni tlak: 970.20 hPa
21.5.2020 12:9:35 Teplota: 19.90 C Vlhkost: 52.96 % Lokalni tlak: 970.22 hPa
21.5.2020 12:9:45 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.95 % Lokalni tlak: 970.24 hPa
21.5.2020 12:9:55 Teplota: 19.91 C Vlhkost: 52.93 % Lokalni tlak: 970.25 hPa
21.5.2020 12:10:6 Teplota: 19.85 C Vlhkost: 52.98 % Lokalni tlak: 970.18 hPa
21.5.2020 12:10:16 Teplota: 19.76 C Vlhkost: 53.05 % Lokalni tlak: 970.09 hPa
21.5.2020 12:10:26 Teplota: 19.66 C Vlhkost: 53.19 % Lokalni tlak: 970.07 hPa
21.5.2020 12:10:36 Teplota: 19.57 C Vlhkost: 53.35 % Lokalni tlak: 970.10 hPa
21.5.2020 12:10:46 Teplota: 19.46 C Vlhkost: 53.59 % Lokalni tlak: 970.15 hPa
21.5.2020 12:10:56 Teplota: 19.35 C Vlhkost: 53.85 % Lokalni tlak: 970.16 hPa
21.5.2020 12:11:7 Teplota: 19.29 C Vlhkost: 53.96 % Lokalni tlak: 970.12 hPa
21.5.2020 12:11:17 Teplota: 19.25 C Vlhkost: 54.11 % Lokalni tlak: 970.13 hPa
21.5.2020 12:11:27 Teplota: 19.21 C Vlhkost: 54.28 % Lokalni tlak: 970.15 hPa
21.5.2020 12:11:37 Teplota: 19.17 C Vlhkost: 54.39 % Lokalni tlak: 970.10 hPa
21.5.2020 12:11:47 Teplota: 19.17 C Vlhkost: 54.58 % Lokalni tlak: 970.13 hPa
21.5.2020 12:11:58 Teplota: 19.16 C Vlhkost: 54.65 % Lokalni tlak: 970.08 hPa
21.5.2020 12:12:8 Teplota: 19.14 C Vlhkost: 54.88 % Lokalni tlak: 970.03 hPa
21.5.2020 12:12:18 Teplota: 19.18 C Vlhkost: 55.00 % Lokalni tlak: 970.10 hPa
21.5.2020 12:12:28 Teplota: 19.14 C Vlhkost: 54.96 % Lokalni tlak: 970.05 hPa
21.5.2020 12:12:38 Teplota: 19.09 C Vlhkost: 55.05 % Lokalni tlak: 970.08 hPa
21.5.2020 12:12:49 Teplota: 19.13 C Vlhkost: 55.08 % Lokalni tlak: 970.16 hPa
21.5.2020 12:12:59 Teplota: 19.14 C Vlhkost: 55.15 % Lokalni tlak: 970.14 hPa
21.5.2020 12:13:9 Teplota: 19.13 C Vlhkost: 55.19 % Lokalni tlak: 970.20 hPa
21.5.2020 12:13:19 Teplota: 19.16 C Vlhkost: 55.15 % Lokalni tlak: 970.16 hPa
21.5.2020 12:13:29 Teplota: 19.15 C Vlhkost: 55.26 % Lokalni tlak: 970.21 hPa
21.5.2020 12:13:40 Teplota: 19.10 C Vlhkost: 55.31 % Lokalni tlak: 970.10 hPa
21.5.2020 12:13:50 Teplota: 19.13 C Vlhkost: 55.32 % Lokalni tlak: 970.11 hPa
21.5.2020 12:14:0 Teplota: 19.14 C Vlhkost: 55.20 % Lokalni tlak: 970.15 hPa
21.5.2020 12:14:10 Teplota: 19.12 C Vlhkost: 55.29 % Lokalni tlak: 970.12 hPa
21.5.2020 12:14:20 Teplota: 19.10 C Vlhkost: 55.35 % Lokalni tlak: 970.16 hPa
21.5.2020 12:14:31 Teplota: 19.08 C Vlhkost: 55.25 % Lokalni tlak: 970.14 hPa
21.5.2020 12:14:41 Teplota: 19.11 C Vlhkost: 55.37 % Lokalni tlak: 970.10 hPa
21.5.2020 12:14:51 Teplota: 19.09 C Vlhkost: 55.31 % Lokalni tlak: 970.11 hPa
21.5.2020 12:15:1 Teplota: 19.06 C Vlhkost: 55.29 % Lokalni tlak: 970.10 hPa
```

Příloha č.4 – Ukázka zaznamenávaných dat ve formátu xlsx

| | A | B | C | D | E |
|----|------------|----------|-------------|-----------------------|--------------------|
| 1 | Datum | Čas | Teplota [C] | Relativní vlhkost [%] | Lokální tlak [hPa] |
| 2 | 21.05.2020 | 12:05:00 | 19.93 | 52.90 | 970.20 |
| 3 | 21.05.2020 | 12:05:10 | 19.92 | 52.91 | 970.25 |
| 4 | 21.05.2020 | 12:05:20 | 19.92 | 52.93 | 970.22 |
| 5 | 21.05.2020 | 12:05:30 | 19.93 | 52.90 | 970.25 |
| 6 | 21.05.2020 | 12:05:41 | 19.92 | 52.86 | 970.20 |
| 7 | 21.05.2020 | 12:05:51 | 19.91 | 52.91 | 970.19 |
| 8 | 21.05.2020 | 12:06:01 | 19.91 | 52.92 | 970.18 |
| 9 | 21.05.2020 | 12:06:11 | 19.92 | 52.88 | 970.20 |
| 10 | 21.05.2020 | 12:06:21 | 19.90 | 52.87 | 970.15 |
| 11 | 21.05.2020 | 12:06:31 | 19.89 | 52.89 | 970.14 |
| 12 | 21.05.2020 | 12:06:42 | 19.89 | 52.93 | 970.19 |
| 13 | 21.05.2020 | 12:06:52 | 19.91 | 52.90 | 970.12 |
| 14 | 21.05.2020 | 12:07:02 | 19.90 | 52.95 | 970.13 |
| 15 | 21.05.2020 | 12:07:12 | 19.90 | 52.97 | 970.15 |
| 16 | 21.05.2020 | 12:07:22 | 19.90 | 52.95 | 970.13 |
| 17 | 21.05.2020 | 12:07:33 | 19.93 | 52.96 | 970.19 |
| 18 | 21.05.2020 | 12:07:43 | 19.91 | 52.91 | 970.18 |
| 19 | 21.05.2020 | 12:07:53 | 19.92 | 52.92 | 970.21 |
| 20 | 21.05.2020 | 12:08:03 | 19.90 | 52.95 | 970.20 |
| 21 | 21.05.2020 | 12:08:13 | 19.91 | 52.86 | 970.17 |
| 22 | 21.05.2020 | 12:08:24 | 19.91 | 52.89 | 970.18 |
| 23 | 21.05.2020 | 12:08:34 | 19.91 | 52.84 | 970.13 |
| 24 | 21.05.2020 | 12:08:44 | 19.92 | 52.88 | 970.19 |
| 25 | 21.05.2020 | 12:08:54 | 19.92 | 52.91 | 970.12 |
| 26 | 21.05.2020 | 12:09:04 | 19.91 | 52.96 | 970.15 |
| 27 | 21.05.2020 | 12:09:15 | 19.93 | 52.89 | 970.09 |
| 28 | 21.05.2020 | 12:09:25 | 19.92 | 52.92 | 970.20 |
| 29 | 21.05.2020 | 12:09:35 | 19.90 | 52.96 | 970.22 |
| 30 | 21.05.2020 | 12:09:45 | 19.91 | 52.95 | 970.24 |
| 31 | 21.05.2020 | 12:09:55 | 19.91 | 52.93 | 970.25 |
| 32 | 21.05.2020 | 12:10:06 | 19.85 | 52.98 | 970.18 |
| 33 | 21.05.2020 | 12:10:16 | 19.76 | 53.05 | 970.09 |
| 34 | 21.05.2020 | 12:10:26 | 19.66 | 53.19 | 970.07 |
| 35 | 21.05.2020 | 12:10:36 | 19.57 | 53.35 | 970.10 |
| 36 | 21.05.2020 | 12:10:46 | 19.46 | 53.59 | 970.15 |
| 37 | 21.05.2020 | 12:10:56 | 19.35 | 53.85 | 970.16 |
| 38 | 21.05.2020 | 12:11:07 | 19.29 | 53.96 | 970.12 |
| 39 | 21.05.2020 | 12:11:17 | 19.25 | 54.11 | 970.13 |
| 40 | 21.05.2020 | 12:11:27 | 19.21 | 54.28 | 970.15 |
| 41 | 21.05.2020 | 12:11:37 | 19.17 | 54.39 | 970.10 |
| 42 | 21.05.2020 | 12:11:47 | 19.17 | 54.58 | 970.13 |
| 43 | 21.05.2020 | 12:11:58 | 19.16 | 54.65 | 970.08 |
| 44 | 21.05.2020 | 12:12:08 | 19.14 | 54.88 | 970.03 |
| 45 | 21.05.2020 | 12:12:18 | 19.18 | 55.00 | 970.10 |
| 46 | 21.05.2020 | 12:12:28 | 19.14 | 54.96 | 970.05 |
| 47 | 21.05.2020 | 12:12:38 | 19.09 | 55.05 | 970.08 |
| 48 | 21.05.2020 | 12:12:49 | 19.13 | 55.08 | 970.16 |
| 49 | 21.05.2020 | 12:12:59 | 19.14 | 55.15 | 970.14 |
| 50 | 21.05.2020 | 12:13:09 | 19.13 | 55.19 | 970.20 |
| 51 | 21.05.2020 | 12:13:19 | 19.16 | 55.15 | 970.16 |
| 52 | 21.05.2020 | 12:13:29 | 19.15 | 55.26 | 970.21 |
| 53 | 21.05.2020 | 12:13:40 | 19.10 | 55.31 | 970.10 |
| 54 | 21.05.2020 | 12:13:50 | 19.13 | 55.32 | 970.11 |
| 55 | 21.05.2020 | 12:14:00 | 19.14 | 55.20 | 970.15 |
| 56 | 21.05.2020 | 12:14:10 | 19.12 | 55.29 | 970.12 |
| 57 | 21.05.2020 | 12:14:20 | 19.10 | 55.35 | 970.16 |
| 58 | 21.05.2020 | 12:14:31 | 19.08 | 55.25 | 970.14 |
| 59 | 21.05.2020 | 12:14:41 | 19.11 | 55.37 | 970.10 |
| 60 | 21.05.2020 | 12:14:51 | 19.09 | 55.31 | 970.11 |
| 61 | 21.05.2020 | 12:15:01 | 19.06 | 55.29 | 970.10 |