



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

Bc. Martin Luner

**Analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích  
multikoptéry**

Diplomová práce

**2021**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621** ..... **Ústav letecké dopravy**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Martin Luner**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér**

Název tématu (anglicky): **Analysis of the Conditions of Icing on the Multicopter Propellers**

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je provést analýzu podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér a navrhnout opatření pro minimalizování pravděpodobnosti vzniku námrazy na vrtulích multikoptér
- Popište podmínky vzniku námrazy a jejich druhy obecně i se zaměřením se na multikoptéry
- Proveďte rešerši odborných a vědeckých zdrojů zabývajících se tvorbou námrazy na vrtulích obecně i na vrtulích multikoptér
- Vykonejte návrh experimentu, provedení a vyhodnocení experimentu
- Navrhněte opatření pro minimalizování pravděpodobnosti vzniku námrazy na vrtulích multikoptér



- Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: P.F. Lester: Aviation Weather  
L.Keller: Učební texty pro piloty  
P. Dvořák: Letecká meteorologie

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ladislav Keller**  
**doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **17. července 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 diplomové práce: **17. května 2021**  
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 diplomové práce.

Bc. Martin Luner  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 2. prosince 2020

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svým vedoucím diplomové práce panu Ing. Ladislavu Kellerovi a panu doc. Ing. Jakubovi Krausovi, Ph.D za věcné rady, odborný přístup a trpělivost s mými dotazy během psaní diplomové práce. Rád bych rovněž poděkoval všem odborníkům, s kterými jsem měl tu čest komunikovat a vyslechnout si jejich názory a postřehy. Dále nemohu zapomenout na podporu z okruhu mých přátel, kteří mi poskytli podporu a kritický pohled. Poslední příjemnou povinností je poděkovat mé přítelkyni a celé rodině, kteří mi během psaní diplomové práce i během celého studia poskytovali značnou morální i materiální podporu.

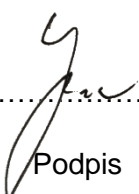
## **Prohlášení**

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 dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný 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 17. květen 2021

  
.....  
Podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

## ANALÝZA PODMÍNEK VZNIKU NÁMRAZY NA VRTULÍCH MULTIKOPTÉRY

Diplomová práce

květen 2021

**Klíčová slova:** UA, UAV, Bezpilotní letoun, Multikoptéra, Podmínky vzniku námrazy, Námraza multikoptér, Nehody multikoptér způsobené námrazou, Adiabatické ochlazování vrtule.

**Keywords:** Unmanned aircraft, Unmanned Aerial Vehicle, Multicopter, Condition of icing, Icing of multicopter, Accident of multicopter caused by icing, adiabatic cooling of the propeller.

### ABSTRAKT

Diplomová práce „Analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry“ pojednává o námrazových podmínkách a jejich vlivu na bezpilotní letadla, se zaměřením na multikoptéry. Cílem práce je analyzovat podmínky, při kterých dochází k námraze vrtulí multikoptér a následné vyhodnocení jejich nehod s námrazou spojené. V závěru práce probíhá experimentální měření vlivu adiabatického ochlazování na teplotu vrtule a ověření, za jakých podmínek k námraze dochází. Součástí práce je doporučení pro minimalizaci vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry.

### ABSTRACT

The diploma thesis "Analysis of the Condition of Icing on the Multicopter Propellers" deals with icing conditions and their impact on unmanned aircraft, especially multicopters. The main object of this thesis is to analyse the conditions under which icing of multicopters propellers occurs and the subsequent evaluation of their accidents associated with icing. At the end of the thesis, there is an experimental measurement of the adiabatic cooling effect affecting on the propeller temperature and verification of the conditions under which icing occurs. Part of the work is dealing with recommendation for minimizing the effect of icing on the multicopter propellers.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1. METEOROLOGICKÉ PRVKY A JEVY.....</b>	<b>10</b>
1.1 METEOROLOGICKÉ PRVKY.....	10
1.1.1 <i>Teplota</i> .....	10
1.1.2 <i>Vlhkost</i> .....	16
1.1.3 <i>Tlak</i> .....	18
1.2 METEOROLOGICKÉ JEVY.....	19
1.2.1 <i>Meteor</i> .....	19
1.2.2 <i>Mlha</i> .....	21
1.2.3 <i>Námraza</i> .....	23
1.2.4 <i>Námraza vrtulových letadel</i> .....	32
1.2.5 <i>Námraza multikoptér</i> .....	33
1.2.6 <i>Rešerše studií zaměřené na vznik námrazy</i> .....	37
1.3 ADIABATICKÝ DĚJ.....	40
<b>2. BEZPILOTNÍ LETADLO.....</b>	<b>42</b>
2.1 MULTIKOPTÉRA.....	42
2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI MULTIKOPTÉRY.....	43
2.3 ANALÝZA NEHOD MULTIKOPTÉR ZPŮSOBENÝCH NÁMRAZOU.....	48
<b>3. TECHNICKÉ OPATŘENÍ PRO ZAMEZENÍ VZNIKU NÁMRAZY.....</b>	<b>59</b>
3.1 TEPELNÁ OCHRANA.....	59
3.2 PNEUMATICKÁ OCHRANA.....	61
3.3 CHEMICKÁ OCHRANA.....	62
3.4 STUDIE ZABÝVAJÍCÍ SE PROTINÁMRAZOVÝM OPATŘENÍM.....	63
3.5 NÁVRH PROTINÁMRAZOVÉHO OPATŘENÍ.....	66
<b>4. METODIKA MĚŘENÍ ADIABATICKÉHO OCHLAZOVÁNÍ.....</b>	<b>70</b>
4.1 KOMPONENTY POUŽITÉ K MĚŘENÍ.....	70
4.2 PROTOKOL PRO ZÁZNAM MĚŘENÍ.....	76
4.3 MĚŘENÍ Č. 1.....	78
4.4 MĚŘENÍ Č. 2.....	80
<b>5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>	<b>83</b>
<b>6. DISKUSE.....</b>	<b>90</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>94</b>

REFERENCE.....	96
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	100
SEZNAM TABULEK.....	102
SEZNAM GRAFŮ.....	103
SEZNAM PŘÍLOH.....	104

## Seznam použitých zkratek

<b>AC</b>	Vyvýšená kupa	Alto cumulus
<b>AS</b>	Vyvýšená sloha	Alto stratus
<b>AGL</b>	Výška nad zemí	Above ground level
<b>CB</b>	Dešťová kupa	Cumulonimbus
<b>CU</b>	Kupa	Cumulus
<b>DC</b>	Stejnoseměrný proud	Direct Current
<b>ESC</b>	Elektronický regulátor otáček	Electronic Speed Controllers
<b>FullHD</b>	Vysoké rozlišení	High-definition
<b>GNSS</b>	Globální satelitní navigační systém	Global Navigation Satellite System
<b>Km</b>	Kilometr	Kilometer
<b>kHz</b>	Kilohertz	Kilohertz
<b>LiPO-3S</b>	Lithium-polymerová baterie (3.články)	Lithium-Polymer 3S
<b>LWC</b>	Vodnost	Liquid Water Content
<b>mAh</b>	Miliampérhodina	Milliampere hour
<b>mm</b>	Milimetr	Millimeter
<b>mmHg</b>	Milimetr rtuťového sloupce	Millimetre of mercury
<b>nm</b>	Nanometr	Nanometre
<b>NS</b>	Dešťová sloha	Nimbostratus
<b>PCO</b>	Ochrana proti nadměrnému vybití	Power Cut-Off system
<b>RP</b>	Vzdálený pilot	Remote pilot
<b>RPS</b>	Vzdálený pilotní systém	Remote pilot system
<b>SC</b>	Slohová kupa	Stratocumulus
<b>ST</b>	Sloha	Stratus
<b>UA</b>	Bezpilotní letadlo	Unmanned Aircraft
<b>UAV</b>	Bezpilotní letadlo (USA)	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UZPLN</b>	Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod	Air accidents investigation institute
<b>V</b>	Volt	Volt
<b>WLAN</b>	Bezdrátová síť	Wireless Local Area Network
<b>ε</b>	Emisivita	Emissivity



# Úvod

Provoz multikoptér zažívá v posledních letech značný rozmach a postupně proniká do širšího spektra napříč mnoha odvětvími. Multikoptéry jsou svou povahou velmi užitečná zařízení, která dnes nachází uplatnění především mezi běžnými uživateli, zejména díky stále lepší dostupnosti. Jsou využívány k vědeckým měřením, v logistice (přeprava balíků) a ke zpestření života technickým nadšencům.

Nárůst provozu a navýšení počtu uživatelů má významný dopad na jeho bezpečnost. Velká část uživatelů nemá hlubší povědomí o základní problematice multikoptér a některých jejich limitacích, které mohou snadno vést až k nehodě. Stejně jak je tomu v leteckém provozu, je nejzásadnější limitací multikoptér právě počasí. V této diplomové práci se zaměřuji především na vznik námrazy, která může negativně ovlivnit letové vlastnosti multikoptér, které nejsou schopné těmto podmínkám čelit. Potenciální expanze multikoptér do různých průmyslových odvětvích, přikládá na vážnosti tématu vzniku námrazy, které není v případě multikoptér podrobněji prozkoumáno. Na základě vzniklých nehod spojených s námrazou bylo zjištěno, že negativní vliv námrazy na provoz multikoptér se stává závažnou překážkou pro jejich každodenní provoz.

Tato diplomová práce si klade za cíl provést analýzu podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér a experimentálně ověřit vliv adiabatického ochlazování na povrchovou teplotu pohonných vrtulí. Současně je nutné identifikovat příčiny vzniku nehod multikoptér spojené s námrazou. Teoretická část má za úkol přiblížit čtenáři problematiku meteorologických dějů a objasnit princip vzniku námrazy. Diplomová práce je doplněna o rešerše analogických studií a podrobnou analýzu nehod způsobených námrazou. Dílčí cíl je zaměřen na sestavení vhodné měřicí soustavy požadované k uskutečnění experimentálního měření s podrobným metodickým postupem.

Výsledkem diplomové práce je podrobná analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér, její spojitosti s provozem a vyhodnocení naměřených údajů v rámci experimentu, který může prokázat vliv adiabatického ochlazování na vznik námrazy na povrchu listů vrtule. V závěru je práce rozšířena o podrobnou analýzu protinámrazové ochrany a rovněž se zabývá návrhem vhodného protinámrazového opatření.

# 1. Meteorologické prvky a jevy

Tato kapitola má za úkol přiblížit čtenáři problematiku meteorologie a vysvětlit odborné termíny které jsou v práci použity. Obor meteorologie využívá souhrn fyzikálních poznatků, které nám umožňují lépe porozumět chování zemské atmosféry, analyzovat meteorologické děje a exaktně předpovídat počasí. Soubor všech meteorologických poznatků se dělí do kategorií meteorologických prvků a jevů. V závěru kapitoly je popsána problematika adiabatického děje, která je neméně důležitou součástí odborných požadavků pro porozumění dalších částí textu.

## 1.1 Meteorologické prvky

Meteorologické prvky charakterizují fyzikální stav atmosféry a atmosférických jevů, které popisují charakter počasí. Fyzikální stav atmosféry je vyjádřen prostřednictvím měřitelných veličin jako je teplota, sluneční záření, vlhkost a atmosférický tlak.

### 1.1.1 Teplota

#### Teplota vzduchu

Teplota je jedním z významných činitelů ovlivňující počasí v atmosféře. Jedná se o termodynamickou veličinu vyjadřující energetický stav molekul, který je závislý na dodané nebo odebrané vnější energii. Příslušná teplota je rovna odpovídajícímu stavu vnitřní energie, která se projevuje množstvím tepelného záření tělesa a hybností molekul. Dodáním vnější energie dochází ke zvýšení hybnosti molekul a tím se vnitřní energie zvýší. Současně s ní roste celková teplota daného tělesa.

#### Teplotní stupnice

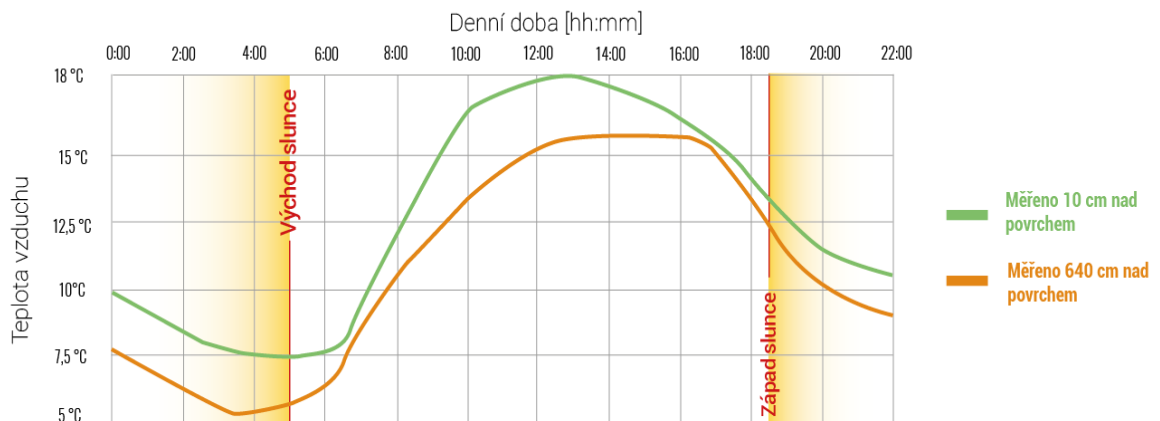
Teplotní stupnice charakterizuje stav vnitřní energie, která je popsána škálou definovaných teplot, jejíž hodnoty jsou popsány v *Tabulce 1*. Teplota je v soustavě SI vyjádřena prostřednictvím jednotky Kelvin, která je mnohem významnější ve fyzikálních oborech. V odborné meteorologické praxi se nejčastěji využívá stupnice Celsiova, která popisuje rozsah mezi bodem varu s hodnotou 100° a bodem tuhnutí s hodnotou 0° [1]. Fahrenheitova stupnice používá jiné referenční hodnoty a je standardem spíše ve Spojeném království, USA nebo v Kanadě. V našich zeměpisných šířkách není tato stupnice příliš obvyklá.

Tabulka 1 Druhy teplotních stupnic [2]

DRUH STUPNICE	BOD TUHNUTÍ VODY	BOD VARU VODY
CELSIUS	0 °C	100 °C
FAHRENHEIT	32 °F	212 °F
KELVIN	273,16 K	373,16 K

### Průběh denních teplot

Vertikální vývoje teplot má od povrchu klesající trend. V průběhu dne zahřívá sluneční záření převážně zemský povrch, samotný vzduch se chová spíše jako izolant. Zahřátý povrch vyzařuje tepelnou energii do okolí a zahřívá přilehlé vrstvy vzduchu, které jsou povrchovou teplotou ovlivněny. Pravidelný cyklus tepelné výměny mezi povrchem a vzduchovou vrstvou způsobuje periodickou změnu teploty během dne. V České republice dosahuje teplota nejvyšších hodnot kolem 13. hodiny (zelená linie), nejnižších před východem Slunce, jak lze vidět na *Obrázku 1* [3]. Vodní plochy dosahují svých teplotních extrémů se zpožděním několika hodin, což je způsobeno velkou tepelnou kapacitou vody, která energii dokáže déle akumulovat. Teplota vzduchu je přímo závislá na geografické poloze a času.

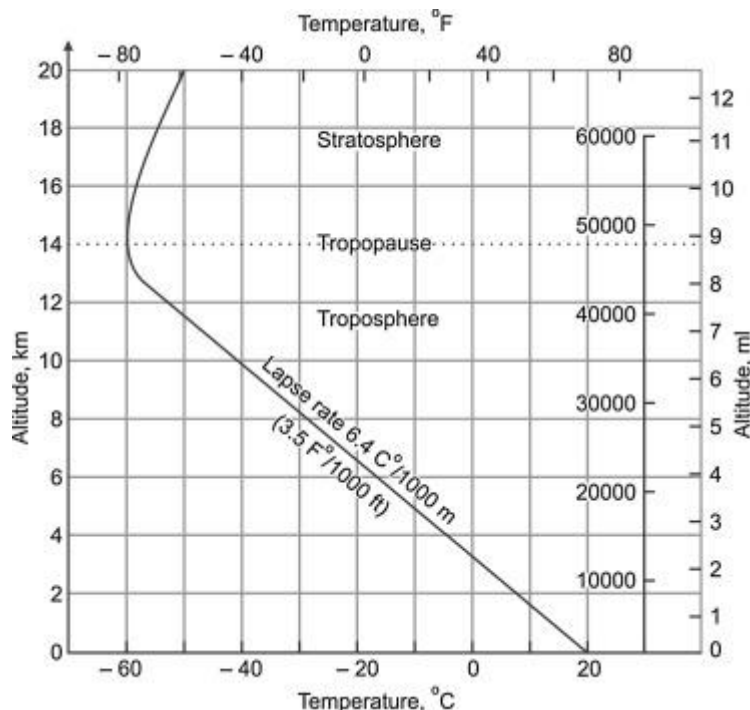


Obrázek 1 Ukázka průběhu průměrných denních teplot pro ČR [3]

### Vertikální teplotní gradient

Pohyb vzduchových hmot v atmosféře je primárně ovlivněn teplotou vzduchu (prohřátým povrchem) a hustotou atmosféry (atmosférickým tlakem). Hodnota vertikálního teplotního gradientu vyjadřuje pokles teploty s výškou, způsobený rozpínáním stoupajícího vzduchu. Průměrný pokles teploty vzduchu je v troposféře 0,64 °C na 100 m [4], jak je znázorněno na *Obrázku 2*. Tendence poklesu vertikální teploty závisí taktéž na ostatních faktorech jako je

poloha, denní nebo roční doba či nasycení vzduchu vodními parami. V případě dostatečné nasycenosti vzduchu vodními parami, mluvíme o vlhkoadiabatickém výstupu, který uvolňuje značné množství latentního tepla kondenzací vody vznikající při fázové přeměně. Uvolněné latentní teplo zmirňuje pokles hodnoty vertikálního teplotního gradientu na  $0,60\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  [4].



Obrázek 2 Schéma poklesu teploty s výškou v atmosféře [4]

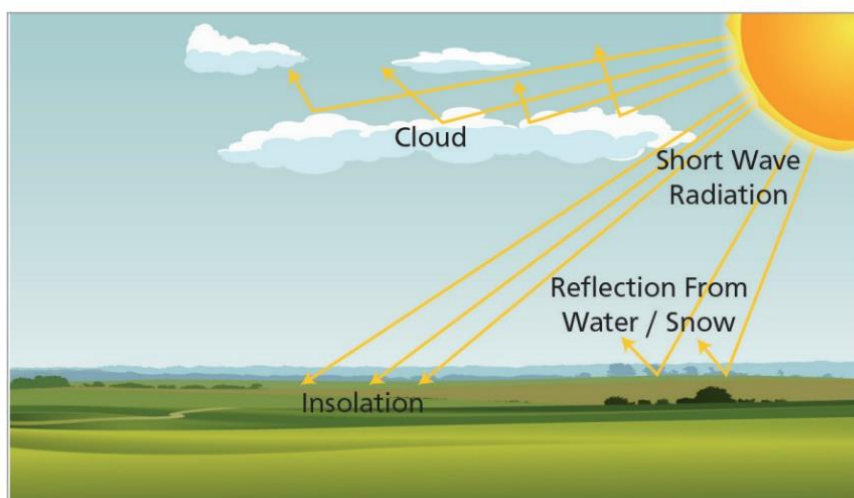
V případě suchoadiabatického děje pro nenasycený vzduch je pokles teploty o  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  na 100 metrů výšky. Vyšší pokles teploty je způsoben absencí latentního tepla uvolňovaného během kondenzace vodních par, které se v suchém vzduchu nevyskytují. Vývoj vertikálního teplotního gradientu má lineární charakteristiku až na hranici tropopauzy, jak lze vidět na *Obrázku 2*. V některých případech může v rovníkových oblastech klesnout teplota v úrovni tropopauzy na hodnotu  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1]. Nad touto výškou začne teplota přechodně stoupat.

### Zahřívání atmosféry

Tepelná energie má značný vliv na veškeré termodynamické procesy odehrávající se v zemské atmosféře. Hlavním zdrojem spouštějící tyto procesy je Slunce, které zahřívá atmosféru a zároveň zemský povrch. Při vstupu paprsků do atmosféry se část svazku rozptýlí, část pohltí a část projde až k zemskému povrchu, jak je znázorněno na *Obrázku 3*. Významným efektem při průchodu atmosférou je rozptyl světla, který má značný vliv na zahřívání zemského povrchu a výslednou barvu viditelného světla. Sluneční záření, které dopadá na zemský povrch je krátkovlnného charakteru, zatímco vyzařování zemského

povrchu je dlouhovlnného. Převážná část radiačního spektra dopadajícího záření tvoří viditelné (48 %) a infračervené (45 %) záření [1].

Na základě Wienova posunovacího zákona, který popisuje posun radiačního spektra ve vztahu k velikosti zdroje radiace, se zemský povrch podílí na zahřívání atmosféry oproti Slunci převážně v infračerveném spektru. Jeho vyzařovací maximum je nejvyšší na vlnové délce 9829 nm [5].



Obrázek 3 Sluneční radiace [2]

### Přenos tepelné energie

Přenos tepelné energie v atmosféře probíhá prostřednictvím několika druhů tepelných procesů, které jsou uvedeny níže.

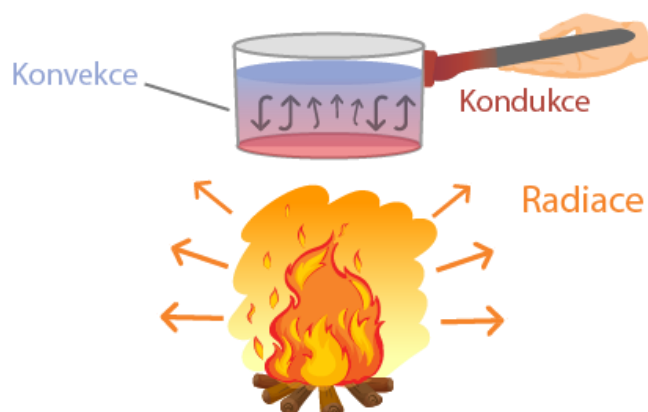
- Radiace
- Kondukce
- Konvekce
- Kondenzace

Tepelná energie je na zemský povrch přenášena radiací ze Slunce, které má primární vliv na veškeré tepelné děje vznikající v atmosféře. Část dopadající energie se odrazí zpět do vesmíru a část je absorbována zemským povrchem. Tepelná energie zvyšuje hybnost atomů a tím i teplotu. Vzájemnými srážkami atomů dochází k šíření tepelné energie do okolí a přispívají k tepelným výměnám napříč atmosférou. Tepelné přenosy jsou uskutečněny na základě fyzikálních procesů, které se odehrávají v atmosféře a jsou znázorněny na *Obrázku 4*. Tepelné

děje jsou současně ovlivněny lokální teplotou povrchu a tlakem atmosféry, taktéž denní dobou. Přenos tepelné energie je způsoben rozdílem teploty vzduchových sloupců, které se snaží dosáhnout tepelné rovnováhy. Přenos tepelné energie může v atmosféře probíhat prostřednictvím konvekce, kondukce, radiace případně ze vzniku latentního tepla.

## Radiace

Radiace vyzařuje tepelnou energii prostřednictvím elektromagnetických vln, která je šířena do okolí prostřednictvím výkonného zářiče. Výkon vyzařujícího tělesa je závislý na jeho teplotě a velikosti povrchu. Výkonným zářičem, jehož prostřednictvím je dodávána tepelná energie zemskému povrchu, je Slunce. Tepelná energie od slunce je k zemskému povrchu šířena radiací, která ho při dopadu zahřívá. Některé paprsky jsou odraženy od svrchní hranice oblaků nebo od vodních ploch a některé pohlceny atmosférou. Zemský povrch je schopen slunečního záření kumulovat a později vyzařovat. Radiace povrchu tak může být značně proměnlivá, během dne je potlačena přímým nebo rozptýleným slunečním zářením a v noci její záření převažuje z důvodu útlumu slunečního záření. Zemská radiace má velmi malý vliv na tepelné děje, vzhledem k teplotě tělesa a velikosti povrchu.



Obrázek 4 Konvekce, kondukce a radiace [vlastní]

## Kondukce

Kondukcí se rozumí vzájemná interakce mezi atomy, které přenášejí tepelnou energii k chladnějším částem v hmotném prostředí. Pokud je energie do systému dodána, zvýší se vnitřní energie a tím dochází k intenzivnějším kmitům atomů, které se srážejí s atomy sousedními a získanou energii vedou dále do částí s nižší energií, dokud nenastane energetická bilance. Tím je zajištěn přenos tepelné energie napříč prostředím rozdílných teplot. V praxi se můžeme s kondukcí setkat během střídání dne a noci. Vzduch působí jako špatný vodič a na tepelné změny reaguje mnohem pomaleji než zemský povrch, který v průběhu dne nakumuluje podstatné množství tepelné energie a v noci rychle vychladá. Vzduch v blízkosti zemského povrchu je v průběhu dne zahříván zemským povrchem. Během noci je

zemský povrch chladnější než okolní vzduch, a proto je ochlazován od povrchu. Výměna mezi vrstvami vzduchu probíhá kondukcí, která se taktéž podílí na tvorbě inverze, o které je pojednáno dále.

### Konvekce

U konvekce probíhá přenos tepla prouděním látek, v meteorologii se vyznačuje cirkulací teplého a studeného vzduchu ve vertikálním směru. Proudění umožňuje výměnu tepla mezi jednotlivými částmi atmosféry. Nejčastěji ke konvekci dochází u látek v kapalném a plynném skupenství.

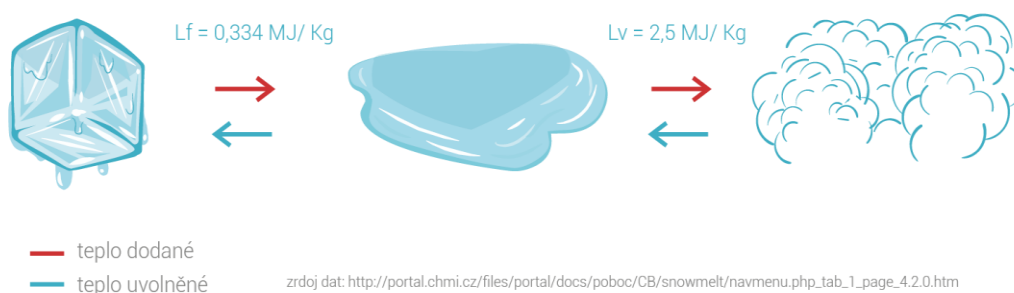
Při meteorologické konvekci dochází k vertikálnímu výstupu teplého vzduchu, který se rozpíná a ochlazuje. Dokud se jeho teplota nevyrovná s teplotou okolí, pokračuje do vyšších pater atmosféry. Tam se mísí se chladným vzduchem, který naopak klesá dolů. Teplý vzduch se v atmosféře spojuje do masivnější výstupných proudů, které nazýváme termika. Termické výstupné proudy zajišťují tepelnou bilanci, při které dochází k cirkulaci studeného a teplého vzduchu.

### Kondenzace

Při kondenzaci dochází k fázové přeměně vodních par do kapalného stavu. Teplý vzduch je přirozenou konvekcí tlačěn vzhůru a adiabaticky se ochlazuje. Kondenzace je podmíněna poklesem teploty do stavu absolutního nasycení vzduchu vodními parami, kdy není možné vodní obsah v plynu udržet a dochází k přeměně páry do kapalného stavu. Výsledkem kondenzace je vznik latentního tepla, které zvyšuje teplotu okolní atmosféry.

### Latentní teplo

Latentní teplo popisuje množství energie, které se uvolní nebo je třeba dodat při fázové přeměně, aniž by došlo ke změně teploty samotné látky. Tyto děje se v atmosféře odehrávají formou vypařování nebo kondenzací. V některých případech dochází k přímé přeměně pevné látky do plynného stavu (sublimace) nebo k přímé přeměně vodních par na led. Energeticky nejnáročnější přeměnou je výpar do plynného skupenství, jak lze vidět na *Obrázku 5*.



Obrázek 5 Odevzdané a přijaté teplo, během fázové přeměny [3]

## 1.1.2 Vlhkost

Vzduchová hmota je v atmosféře zastoupena třemi základními složkami, mezi které patří vodní páry, vodní srážky (kapalné i pevné) a suchý vzduch. Vodní páry patří mezi nejvýznamnější prvky v atmosféře, které ovlivňují tepelné přenosy probíhající prostřednictvím fázových přechodů, konvekce nebo velkoprostorové cirkulace. Smíšením vodních par se suchým vzduchem dostaneme vzduch vlhký, jehož poměr je označen jako vlhkost vzduchu.

Termín vlhkost vzduchu popisuje množství vodních par obsažených v atmosféře, které jsou úzce spojeny s teplotou. Vzduch je při dané teplotě schopný pojmout určité množství vodních par, se vzrůstající teplotou toto množství kvadraticky roste. V okamžiku, kdy není vzduch schopen pojmout větší množství vodních par, stává se plně nasyceným. Pokud je vzduch vodními parami přesycen dochází k jejich kondenzaci. Při teplotách 0 °C a nižších může docházet ke vzniku námrazy.

Obsah přítomné vlhkosti ve vzduchu je jeden ze základních faktorů při tvorbě počasí. Pokud by v atmosféře nebyla přítomna žádná vlhkost v podobě vodních par, neodehrávaly by se v ní žádné atmosférické jevy, jako je vznik srážek, mlhy, oblačnosti nebo námrazy.

Vlhkost se v atmosféře tvoří převážně z výparů rozsáhlých vodních ploch, vegetace nebo přímo ze zemského povrchu. Vlhkost rovněž vzniká odpařováním vodních srážek, oblačnosti nebo sublimací sněhové pokrývky. Vzdušné proudy dokážou šířit vodní obsah na velké vzdálenosti jak ve vertikálním, tak i v horizontálním směru.

### Změna skupenství vody

Voda je v atmosféře zastoupena v několika skupenstvích, jejichž forma je závislá především na teplotě, která má přímý vliv na její molekulární stav. Prostřednictvím vody dochází v atmosféře k velmi důležitým energetickým přenosům, které jsou popsány jako fázové přechody mezi skupenstvími. Ke změně skupenství dochází formou tání, tuhnutí, kondenzací, vypařováním nebo přímým přechodem prostřednictvím sublimace nebo desublimace. Změna jednotlivých stavů neboli skupenství uvolňuje nebo spotřebovává energii, kterou nazýváme latentní teplo.

### Význam vlhkosti v letecké meteorologii

V letecké meteorologii patří mezi nejdůležitější ukazatele obsahu vodních par v suchém vzduchu relativní vlhkost. Vzrůstající relativní vlhkost indikuje pravděpodobnost vzniku mlhy nebo nízké položené oblačnosti, což může mít vliv na bezpečnost letového provozu. Každé letiště má jasně definovanou kritickou hodnotu relativní vlhkosti, která spouští odpovídající opatření. Kritická relativní vlhkost se obecně pohybuje od hodnot 90 % do 98 %, při překročení



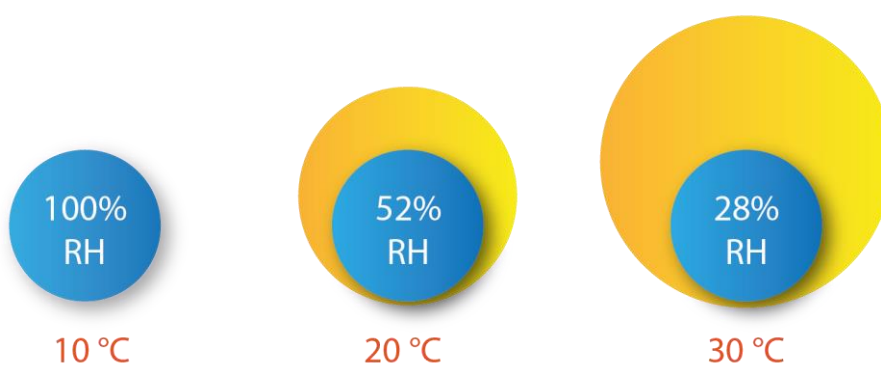
horní hranice nastává omezení letového provozu, které může znemožnit vzlety a přistání. Množství vodních par s narůstající výškou rychle ubývá, pokud se nejedná o inverzní oblačnost, u které je vývoj teploty opačný. Přítomnost vodních par v atmosféře a vysoká relativní vlhkost může značně zkomplikovat letový provoz. Zejména jevy jako déšť, sníh, mrholení, mlha nebo kouřmo mohou způsobit omezení příslušných letišť a následnou komplikaci provozu.

### **Absolutní vlhkost**

Absolutní vlhkost ( $\text{g/m}^3$ ) vyjadřuje množství vodních par obsažených v jednotce objemu vzduchu. Vzduch je schopný za dané teploty pojmout určité množství par, jejichž množství koresponduje s příslušnou teplotou vzduchu. Nad touto hodnotou již nemůže obsah vodních par dále stoupat. Absolutní vlhkost je v reálných podmínkách špatně měřitelná, protože je velmi ovlivněna dynamickými procesy odehrávajícími se v atmosféře, které způsobují neustálý pohyb vzduchu a mají značný vliv na nestálost teploty a tlaku. Pro vyjádření vlhkosti se proto častěji využívá termín relativní vlhkost a rosný bod.

### **Relativní vlhkost**

Relativní vlhkost vyjadřuje poměr skutečného množství vodních par ve vzduchové hmotě vůči absolutnímu množství, při kterém dochází ke kondenzaci vodních par při dané teplotě a tlaku. Relativní vlhkost indikuje, jak blízko je vzduchová částice k absolutnímu stavu nasycení. Rostoucí teplota umožňuje vzduchové částici udržet větší množství vodních par na základě čehož relativní vlhkost klesá, jak je ilustrováno na *Obrázku 6*.



Obrázek 6 Relativní vlhkost při různých teplotách [vlastní]

### **Vodnost oblačnosti**

Vodnost oblačnosti je označována anglickým termínem LWC (Liquid water content), který vyjadřuje hmotnost kapalných a tuhých částic vody ve vzduchovém objemu oblaku. Množství

vodního obsahu (LWC) je závislé na teplotě vzduchu a současně na výšce základny oblačnosti. Vysoký obsah vodních kapek nalezneme v oblačnosti s níže položenou základnou, která dosahuje vyšších teplot. Vysoká vodnost je nejzřetelnější u vrstevnaté nebo konvekční oblačnosti. Hodnota vodnosti vzduchu vypovídá o budoucím vývoji oblačnosti, jejím druhu nebo o intenzitě námrazy. Taktéž se používá jako indikátor množství vodního obsahu vzduchu během experimentálních studií námrazy.

### **Rosný bod**

Rosný bod vyjadřuje teplotu, při které vlhký vzduch dosáhne svého plného nasycení za konstantního tlaku a vodní páry zkondenzují do kapalného stavu. Nízký rozdíl hodnot mezi teplotou rosného bodu a teplotou vzduchu popisuje vysokou vlhkost vzduchu, která se může projevit ve formě nízké oblačnosti nebo mlhy.

### **Měření vlhkosti**

V praxi se nejčastěji měří teplota rosného bodu a relativní vlhkost. K měření těchto hodnot se používá zařízení zvané vlhkoměr (hygrometr). V odborné meteorologii probíhá měření vlhkosti na základě roztažnosti lidského vlasu nebo živočišné membrány, která na vlhkost vzduchu reaguje. Dále je k profesionálnímu měření určen Augustův psychometr. Pro širokou veřejnost jsou tyto přístroje značně nevhodné a jsou zastoupeny automatickými čidly.

### **1.1.3 Tlak**

Tlak patří mezi další významné prvky ovlivňující dynamické procesy v atmosféře a přesněji je označován jako tlak atmosférický. Atmosférický tlak je definován jako tlaková síla vzduchového sloupce, která působí ve vertikálním směru na zemský povrch a klesá s rostoucí výškou. Současně jeho hodnota závisí na teplotě, což lze odvodit ze stavové rovnice. Na základě různorodého rozdělení tlakových sloupců vzniká větrné proudění, které podněcuje vznik větších tlakových celků jako jsou tlakové útvary nazvané cyklóny a anticyklóny. Výraznější pokles tlaku je patrný v případě sloupce studeného vzduchu, který disponuje větší hustotou molekul na  $m^3$ . Dle mezinárodní standardní atmosféry je průměrný atmosférický tlak 1013,25 milibarů na úrovni hladiny moře nebo častěji uváděných 1013,25 hektopascalů [6]. V anglosaských zemích můžeme nalézt označení velikost rtuťového sloupce, které má hodnotu 29.92 mmHg [6]. Nejčastěji je tlak měřen rtuťovými tlakoměry nebo aneroidy, které pracují na základě roztažnosti kovových částí.

## 1.2 Meteorologické jevy

Meteorologické jevy označují veškeré děje probíhající na zemském povrchu nebo v atmosféře, které jsou pozorovány na meteorologických stanicích. Patří k nim především meteory, které se objevují ve formě dešťových srážek, bouřek, mlhy, sněhové pokrývky a ostatní jevy jako je například vítr. U meteorologických jevů můžeme určit nominální hodnotu měření, například časový údaj, intenzitu nebo vzdálenost.

### 1.2.1 Meteor

Název meteor popisuje určitý druh jevu nebo úkazu objevující se v atmosféře. Může se jednat o úkazy elektrické nebo optické povahy anebo úkazy charakteru vodních srážek.

#### Izoterma

Izoterma spojuje místa se shodnou teplotou. V letecké meteorologii je pro nás podstatnější termín nulová izoterma, která vyjadřuje spojitou hladinu nulových teplot. V této hladině se již začínají tvořit námrazové podmínky. Výška nulová izotermy je závislá na ročním období, v zimních měsících je v důsledku nízkých teplot položena níže, než je tomu v letních měsících. Z toho důvodu jsou pro zimu typické srážky v podobě sněžení. Srážky padají z nízké oblačnosti s teplotami vzduchu kolem bodu mrazu. Padající srážka se nestačí dostatečně ohřát a dopadne na povrch ve formě sněhové vločky.

#### Inverze teploty

Inverze znamená obrácený průběh změny teploty s narůstající výškou, než je v reálné atmosféře obvyklé. V takzvané inverzní vrstvě roste společně s výškou i teplota. Podle výšky inverzní vrstvy rozlišujeme, zdali se jedná o inverzi přízemní nebo ve volné atmosféře. Inverze zpomaluje horizontální i vertikální míchání vzduchu. V průmyslových oblastech může vést ke zvýšené koncentraci skleníkových plynů.

Přízemní inverze často vzniká radiačním ochlazením během noci. V případě nedostatku tepelného záření se přilehlá vrstva vzduchu aktivně ochlazuje od zemského povrchu a tím se stává chladnější oproti vyšším vrstvám vzduchu. Tento jev se projevuje opačným trendem při vývoji vertikální teploty. Příčiny vzniku inverze jsou následující:

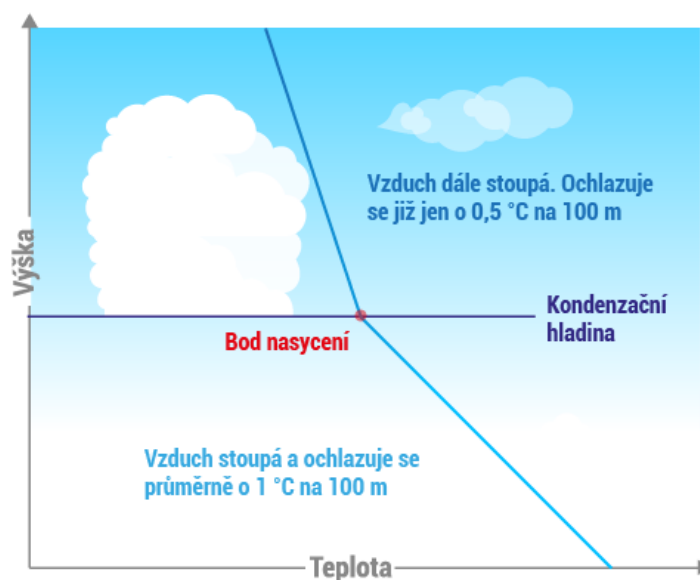
- Ochlazování vzduchu od horní hranice oblačnosti (Radiální).
- Nasunutím teplejší vrstvy na vrstvu chladnějšího vzduchu (Subsidenční).
- Nasunutí vlhkého vzduchu pod teplejší vrstvu (Pasátové).
- Z vlivu turbulentního proudění (Turbulentní).

## Kondenzace vodních par v atmosféře a vznik oblačnosti

Kondenzací vodních par se rozumí změna skupenství vody z plynného do kapalného skupenství. Zemský povrch se během dne prohřívá a dochází k odpařování vody z jeho povrchu. Zahřáté vodní páry proto začnou stoupat vzhůru, rozpínají se, a tím se ochlazují. V důsledku klesající okolní teploty s výškou roste hodnota jejich nasycení. V okamžiku, kdy dosáhne teplota stoupajícího vzduchového elementu hodnoty rosného bodu, dochází ke kondenzaci. Vodní pára se přemění na drobné kapičky nebo desublimuje přímo do pevného stavu v podobě ledových krystalků, avšak k desublimaci dochází pouze při teplotách pod bodem mrazu. Transformaci vodních par do kapalného skupenství můžeme pozorovat na tzv. kondenzační hladině.

### Kondenzační hladina

kondenzační hladina je výška, ve které se stává vzduch přesycen vodními parami, následkem poklesu teploty na teplotu rosného bodu. V okamžiku přesycení vzduchu vodními parami během vertikálního výstupu dochází k jejich kondenzaci. Nad úrovní kondenzační hladiny lze zřetelně pozorovat vznik základny oblačnosti obsahující viditelné vodní kapky, jak je zobrazeno na *Obrázku 7*. Následný vertikální růst oblačnosti je tvořen vodním obsahem ve vyšších patrech ledovými krystalky a množstvím přechlazených vodních kapiček.



Obrázek 7 Kondenzační hladina a vznik oblačnosti [vlastní]

## **Vznik oblačnosti**

Vznik oblačnosti je podmíněn ochlazením vzduchu na úroveň teploty rosného bodu během vzestupného vertikálního pohybu nad kondenzační hladinu. Oblak je tvořený množstvím drobných kapiček vody nebo ledových krystalů. Ve spodní části oblaku se nejčastěji vyskytují vodní kapky, ve svrchních částech převažuje výskyt ledových krystalků. Skupenství oblačnosti je závislé na teplotě vzduchu, která je ovlivněna výškou.

### **1.2.2 Mlha**

Mlha vzniká nahromaděním drobných kapiček vody, které se objevují v přízemní vrstvě z důvodu přesycení vzduchu vodními parami nebo smíšením teplého a studeného vzduchu, který je takřka nasycen vodními parami. Často je mlha označována jako oblak se základnou nízko nad zemí. Vysoká koncentrace vodních kapek přítomných ve vzduchu snižuje viditelnost do výše několika stovek metrů.

#### **Radiační mlhy**

Radiační mlhy vznikají při bezoblačném počasí, kdy dochází k poklesu teploty zemského povrchu, která postupně ochlazuje přilehlé vrstvy vzduchu. Nejčastěji vzniká radiační mlha během noci za nízkých teplot s rostoucí relativní vlhkostí až k bodu nasycení, kdy dochází ke kondenzaci. Tím vznikají drobné kapičky nebo ledové krystalky, které jsou ve vzduchu viditelné.

Radiační mlhy se často tvoří v níže položených místech, které jsou bohaté na přízemní vlhkost. Nejčastěji vznikají v druhé polovině noci těsně před východem slunce, kdy dosahuje zemský povrch nejnižších teplot. Přítomnost radiační mlhy je krátká, s východem slunce se mlha rozpustí.

## Advekční mlhy

Advekční mlhy vznikají ochlazením teplého a vlhkého oceánské vzduchu, který se nasouvá na studený zemský povrch, jak lze vidět na *Obrázku 8*. Pokud je teplota zemského povrchu nižší než teplota rosného bodu oceánského vzduchu, vzduch se prudce ochladí. Dosáhne tím absolutního maxima nasycení a vodní páry zkondenzují. Na zemském povrchu se pak vytvoří mlha značného horizontálního rozsahu, která bývá doprovázena mrholením. Advekční mlhy se tvoří v libovolné denní a noční době. Jejich účinek může být zesílen radiační mlhou.



Obrázek 8 Advekční mlha typická pro San Francisco [2]

## Mlhy z vypařování

Mlhy z vypařování vznikají v přítomnosti rozsáhlých vodních ploch, které mají vyšší teplotu než jejich okolí. Nad povrchem vodních ploch dochází k odpařování vodních par, které se při nižší teplotě nasatí a zkondenzují. V průmyslových oblastech může být vznik mlhy vyvolán vysokou koncentrací kondenzačních jader, jako jsou nečistoty, prach a produkty spalování z výroby.

## Frontální mlhy

Frontální mlha vzniká při zvýšené vlhkosti vzduchu a souvisí s pohybem frontálního systému. V případě teplé fronty hovoříme o předfrontální mlze, která vypařováním teplých dešťových srážek zvyšuje vlhkost vzduchu a typicky vzniká před frontou. Zafrontální mlha postupuje společně se studenou frontou a vzniká na rozhraní studeného a teplého vzduchu, který uzavírá studenou frontu.

## Kouřmo

Jedná se o atmosférický aerosol, připomínající mlhu, tvořený množstvím mikroskopických vodních kapiček, které snižují vodorovnou dohlednost. Kouřmo nabývá velmi vysokých hodnot relativní vlhkosti, avšak nedosahuje absolutního nasycení. Dohlednost je snížena na vzdálenost v rozmezí 1 až 10 km [7].

## **Mrholení**

Mrholení je definováno jako druh tekuté srážky s průměrem mezi 0,025 až 0,250 mm [8]. Vyznačuje se velmi drobnými vodními kapičkami, které jsou obsaženy ve vzduchu. Mrholení vzniká ve vrstevnaté oblačnosti bez výstupných proudů, kde nenarůstá velikosti vodních kapek. Proti tíze vodních kapek působí odpor vzduchu, který znemožňuje volný pád, jak je tomu srážek. Kapky se vzájemně shlukují do větších celků a nabývají na své váze, později mohou spadnout až k zemi.

### **1.2.3 Námraza**

Námraza patří mezi jeden z nejnebezpečnějších meteorologických jevů v letecké dopravě, který může způsobit vážné letecké nehody se smrtícími následky. Námrazou se rozumí jakékoli usazování ledu nebo vznik ledové vrstvy na povrchu letadla, který je podchlazený do záporných teplot a přišel do kontaktu s přechlazenými kapkami vody, které na něm zamrzly.

Usazováním ledové vrstvy na povrchu letadla dochází ke zvýšení hmotnosti, spotřeby paliva a změně aerodynamických vlastností. Nejčastější následky vzniklé námrazy za letu je redukce vztlaku, rychlosti a zvýšení aerodynamického odporu draku. Současně dochází k omezené funkčnosti pohyblivých nosných ploch, které zajišťují ovladatelnost letadla. Námraza nejdříve vzniká na místech vyznačovaných tenkým profilem, jako jsou náběžné hrany křídel, listů vrtule nebo vyčnívající antény. U těchto částí dochází ke vzniku námrazy nejintenzivněji. Při silné intenzitě námrazy se mění těžiště letounu, které přispívá ke zhoršené stabilitě a k ztížené říditelnosti.

Nejčastěji se můžeme setkat s námrazou v podmínkách konvekční a slohové oblačnosti, při teplotách 0 až -12 °C [9], kde je četnost přechlazených vodních kapek největší. Závažnější nebezpečí během letu představují kapky větších velikostí. Vznik námrazy může být prvotně indikován na listech vrtule nebo na předním skle.

#### **Podmínky vzniku námrazy**

Vznik námrazy podléhá několika faktorům, které se navzájem kombinují. Vznik námrazy je podmíněn přítomností následujících meteorologických jevů:

- Teplota povrchu je 0 °C nebo nižší [5].
- Přítomnost přechlazených vodních kapek (podmíněno vysokou vlhkostí vzduchu).

## Vznik námrazy

Vznik námrazy je především ovlivněn druhem oblačnosti, teplotou a množstvím přechlazených vodních kapek přítomných ve vzduchu. Nejčastěji se můžeme s námrazou setkat v konvekční a slohovitě oblačnosti s teplotami v rozmezí od 0 °C do -12 °C, kde lze očekávat významný výskyt velkých přechlazených vodních kapek [9]. Při teplotách nižších než -12 °C se voda v kapalně formě téměř nevyskytuje. V ojedinělých případech může námraza vzniknout při teplotě až -40 °C [9]. Výskyt námrazy může být podmíněn zeměpisnou oblastí, výškou a úrovní znečištění vzduchu (prachové částice).

V prostředí bohatém na přechlazené vodní kapky, kdy se teplota povrchu letadla dostane do záporných hodnot, dochází při střetu podchlazeného povrchu s vodními kapkami k okamžitému zmrznutí. Malé kapky zmrznou okamžitě, velké kapky se rozlijí do tenké vrstvy a pokračují podél profilu, dokud nezmrznou. Při velmi nízkých teplotách se led usazuje pouze v blízkosti náběžných hran. Četnost střetů s povrchem letadla roste, se stoupající rychlostí a velikostí kapek. Nejvyšší koncentrace zmrzlých kapek je na náběžných hranách, kde se dále vrství v ledové nánosy.

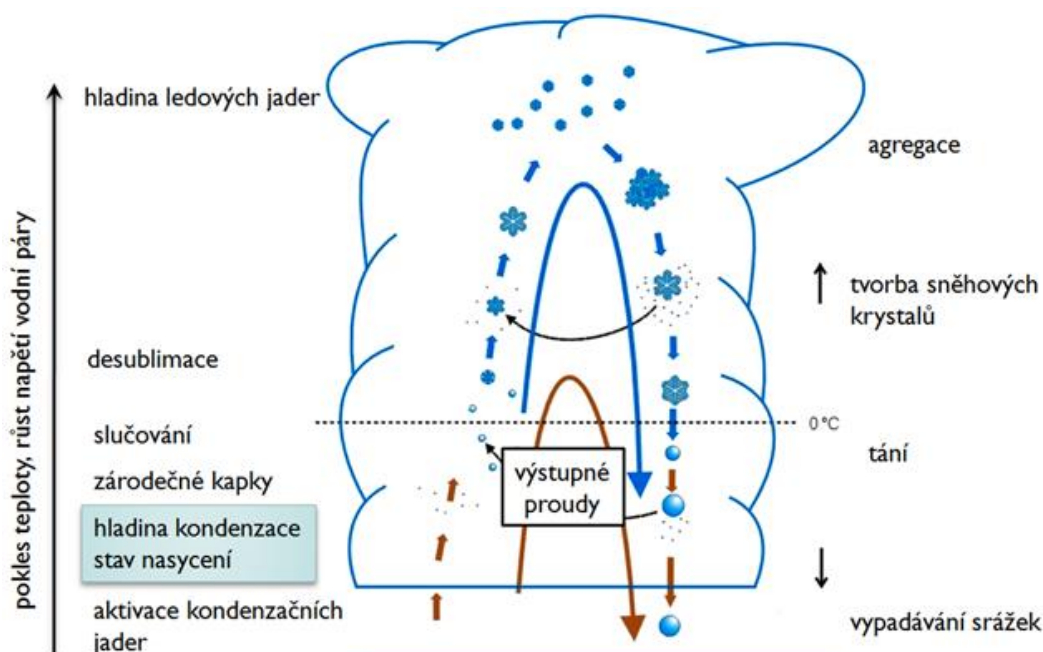
Výsledné množství a rychlost tvorby námrazy nejvíce závisí na teplotě a vzdušné vlhkosti. Rychlost vzniku námrazy je také ovlivněna tvarem objektu, který je vystaven nabíhajícímu vzduchu. Námraza se častěji tvoří u pomaleji letících těles, kde není povrch aerodynamicky zahříván následkem vysokých rychlostí.

Námraza nemusí vzniknout při záporné teplotě vzduchu, v případě, kdy povrchová teplota samotného letadla záporných hodnot dosahuje. Při letu ve vlhkém prostředí mohou vodní kapky na povrchu, který zůstává setrvačností v záporných teplotách, zamrznout.



## Vznik ledových jader v oblačnosti

Vzduch obsahující vodní páry stoupá vzhůru, postupně ztrácí svoji energii a teplotu. Dochází k jeho rozpínání a ochlazování. Vodní páry přechází v úrovni kondenzační hladiny do kapalného stavu ve formě mikroskopických kapiček a dále se shlukují do větších celků. V případě poklesu okolní teploty vzduchu do záporných hodnot, narůstá pravděpodobnost výskytu ledových jader. Tuto výšku nazýváme hladinou nulové izotermy. Přeměna přechlazených vodních kapek do pevného skupenství probíhá na základě dostatečného množství krystalizačních jader v okolí, na které mohou vodní kapky namrznout a vytvoří ledové krystalky. Popsaný proces můžeme vidět na obrázku číslo 9. Nejběžnější formu krystalizačních jader představují různé nečistoty, prachové částice nebo vodní kapky, či ostatní ledové krystalky, které vlivem vertikálních proudů v oblaku cirkulují. Do určité výšky je obsah oblaku smíšený, voda se zde objevuje v kapalné i pevné formě. S rostoucí výškou se zvyšuje vodní obsah ledových krystalů až do hladiny ledových jader. V této hladině je oblak tvořen převážně ledovými a dosahuje teploty přibližně  $-12\text{ °C}$  [9].

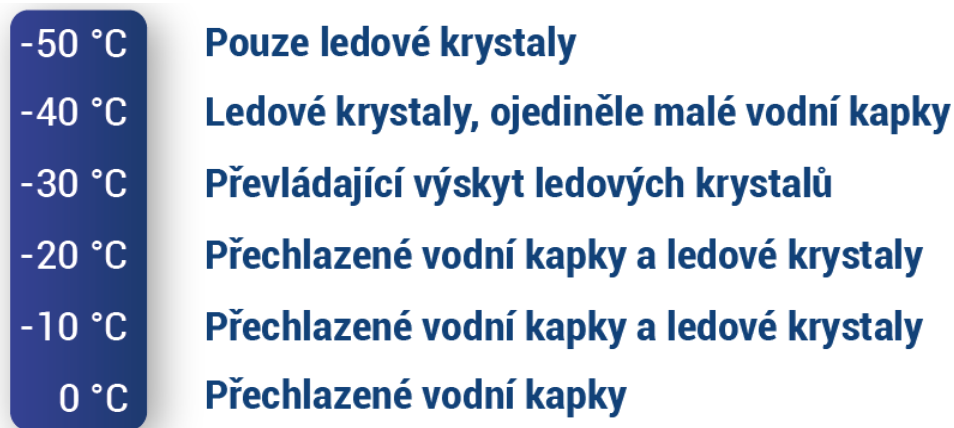


Obrázek 9 Změna skupenství vody v oblačnosti [7]

## Přechlazené vodní kapky

Jedná se o stav vody, která se nachází v kapalném skupenství při teplotách pod bodem mrazu. Přechlazené vodní kapky nemrznou ve volném ovzduší okamžitě, ale při teplotách mnohem nižších pohybující se od  $-10\text{ °C}$  [9]. Pokud nejsou v okolí drobné částice (krystalizační jádra), voda zůstává v ojedinělých případech přechlazená v kapalném stavu až do teploty  $-40\text{ °C}$ , především díky uvolněnému latentnímu teplu [9]. Při této teplotě mají kapky mikroskopický

rozměr a jejich atomy krystalizují sami od sebe. Při teplotách vzduchu pod touto hranicí se již kapky v kapalné formě volně nevyskytují. Skupenství vody v případě teploty pod bodem mrazu je zobrazeno na *Obrázku 10*. Výskyt přechlazených vodních kapek je nejčastější v konvekční oblačnosti s teplotami od 0 °C do -12 °C [2].



Obrázek 10 Skupenství vody při záporných teplotách [vlastní]

Velikost vodních kapek je závislá na teplotě, výšce oblačnosti a druhu oblačnosti, jak je uvedeno v *Tabulce 2*. Teplota vzduchu ovlivňuje skupenství vodního obsahu oblaku. Výška základny má vliv na počáteční skupenský stav vertikálního vývoje oblačnosti.

Tabulka 2 Velikost vodních kapek a jejich podmínky [2]

VELIKOST KAPEK	TEPLOTA VÝSKYTU	DRUH OBLAČNOSTI
Velké přechlazené vodní kapky	při teplotách od 0 °C až do -20 °C.	Kumulus (CU), Kumulonimbus (CB) a Nimbostratus (NS)
Malé přechlazené vodní kapky	při teplotách od 0 °C až do -40 °C	Stratus (ST), Stratokumulus (SC), Altostratus (AS) a Altokumulus AC
	při teplotách od -20 °C až do -40 °C	ve vrchních patrech oblačnosti typu CU, CB a NS

### Intenzita námrazy

Intenzita námrazy popisuje množství vzniklé ledové vrstvy za jednotku času. Závisí především na koncentraci přechlazených vodních kapek přítomných ve vzduchu, na jejich velikosti a rychlosti letu. S klesající výškou základny oblačnosti, stoupá vodní obsah oblaku a jeho teplota. Intenzita bude na základě množství vodního obsahu růst. Pokud je oblak složen pouze z ledových krystalků, můžeme skrze něj proletět, aniž by došlo ke střetu s přechlazenou vodní kapkou. Většinou tomu tak je ve vrchních patrech oblačnosti.

S přibývajícím množstvím námrazy se zmenšuje poloměr zakřivení náběžných hran. Změna poloměru zakřivení způsobí, že se na profil zachytává větší množství vodních kapek a intenzita množství námrazy tak prudce roste. Zakřivení menších poloměrů příliš neovlivňuje laminární proudění, proto dochází k intenzivnějšímu zachytávání přechlazených vodních kapek na povrch. Nejintenzivněji se bude námraza tvořit právě na tenkých profilech, které jsou schopné zachytit větší množství kapek než profil tlustý, což je ovlivněno převážně již zmíněným laminárního proudění, které usazování ledu do určité míry zabraňuje.

Tabulka 3 Tabulka intenzity námrazy

Intenzita	Intenzita	Kumulace ledu
<b>Slabá námraza</b>	do 0,6 mm/min	Viditelná vrstva ledu, není nebezpečná a lze ji odstranit dostupnými odmrazovacími prostředky
<b>Mírná</b>	0,6 -1,0 mm/min	Míra intenzity vzniku námrazy není v krátkodobém časové horizontu příliš nebezpečná. Při delším letu (více než 1 hodinu) může představovat značné riziko nahromadění množství ledu, pokud nebudou použity odmrazovací prostředky,
<b>Silná</b>	1,0-2,0 mm/min	Nárůst množství námrazy za časovou jednotku je značně vysoký a ke vzniku dochází ve velmi krátkém časovém sledu. Použití odmrazovacích prostředků je v tomto případě nutné.
<b>Velmi silná</b>	nad 2,0 mm/min	Nárůst ledu představuje takovou rychlost, u které je nemožné zabránit vzniku dostupnými odmrazovacími prostředky a musí dojít k okamžité změně trasy letu.

### Druhy námrazy

na základě několika faktorů, jako je velikost přechlazených kapek, rychlosti letu a teplota vzduchu, rozlišujeme námrazu do tří základních kategorií.

### Jinovatka

Jinovatka je druh lehké námrazy, která je výsledkem sublimace vodních par na povrchu radiačním ochlazením. Nejčastěji vzniká na povrchu stojících letadel, eventuelně může vzniknout během letu přechodem mezi vrstvami vzduchu se zápornou teplotou a vrstvou s teplotou nad bodem mrazu. Povrch tak zůstane podchlazený a vodní obsah na něm zmrzne. Jinovatka tvoří souvislý tenký film ledových krystalků na povrchu v podmínkách vysoké vlhkosti vzduchu.

- **Vznik jinovatky na zemi** je podmíněn radiačním ochlazením vzduchu. Nejčastějším projevem je tenká vrstva na povrchu stojících letadel, což lze vidět na *Obrázku 11*.
- **Vznik jinovatky za letu** je obvyklý jev při přechodu z vrstvy vzduchu se zápornou teplotou do vrstvy s teplotou kladnou. Těleso zůstává stále podchlazené a dochází k sublimaci vodních par na jeho povrchu, což vede ke vzniku ledových krystalků.

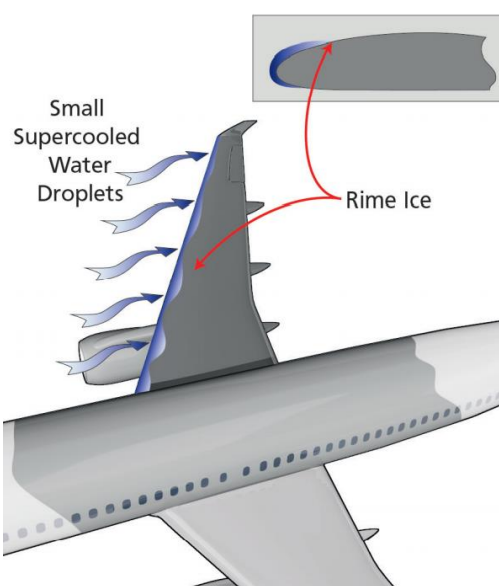
Jinovatka nezpůsobuje významné nebezpečí, ale může být vhodným základem k usazování jiných druhů námrazy.



Obrázek 11 Jinovatka na stojícím letadle [38]

### Zrnitá námraza (Rime Ice)

Zrnitá námraza je druh námrazy složený z drobných přechlazených kapek, které při kontaktu s povrchem letadla okamžitě zamrznou. Tvoří se při nízkých teplotách v rozmezí 0 °C až -40 °C, nejčastěji však při teplotách od -10 °C do -20 °C, ve kterých jsou přechlazené kapky menší a méně početné [1]. Struktura ledu je tvořena drobnými kapkami téměř kulovitého tvaru, které mezi sebe uzavírají vzduchové bubliny, které při kontaktu s povrchem společně okamžitě zamrznou. Zrnitá námraza má podobu mléčného, drsného a neprůhledného ledu a usazuje se pouze v oblasti náběžných hran, nešíří se do větších vzdáleností směrem po profilu, což je znázorněno na *Obrázku 12*. Nejčastěji zrnitá námraza vzniká v oblačném systému teplých front během zimy a ve vyšších patrech oblačnosti, kde je kumulace drobných přechlazených kapek největší. Zrnitá námraza je méně nebezpečná než ledovka.



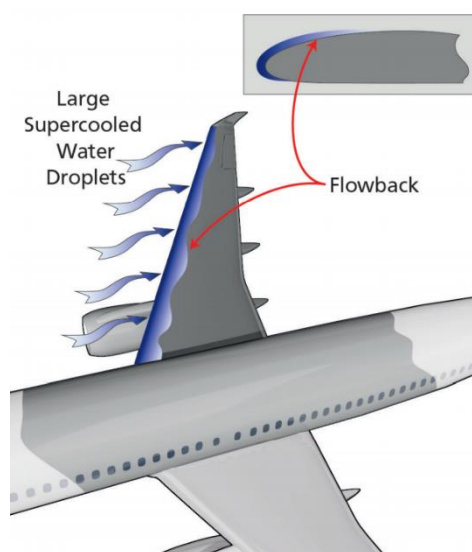
Obrázek 12 Vznik zrnité námrazy na profilu

### Ledovka (Clear/Glaze Ice)

Ledovka je čistá a průhledná forma námrazy tvořená velkými přechlazenými kapkami, které tvoří vrstvu souvislého hladkého ledového filmu. Ledovka vzniká nárazem vodních kapek na povrch letadla, což je zobrazeno na Obrázku 13. V důsledku uvolnění latentního tepla během skupenské přeměny se proces mrznutí oddálí a vodní kapka se rozlije po povrchu a až poté zmrzne.

Ledovka vzniká v prostředí tvořeném nižšími vrstvami oblačnosti, které obsahují více přechlazených kapek s větším průměrem. Teplota, při které ledovka nejčastěji vzniká je slabě pod bodem mrazu a méně často při teplotách nejvýše do  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]. Vznik námrazy může být podpořen meteorologickými jevy jako je mrholení, mrznoucí déšť nebo v prostředí bohatém na vodní obsah jako je konvekční oblačnost typu Cu a Cb. [9]

Ledovka se formuje velmi rychle a dochází tím ke kumulaci jednotlivých vrstev. Výrazně ovlivňují obtékání profilu, zvyšují odpor a hmotnost letadla. Tento druh námrazy patří k nejnebezpečnějším druhům a musí být proti němu zakročeno vhodným proti námrazovým opatřením.



Obrázek 13 Vznik ledovky na profilu [5]

### Tvar námrazy

Tvar ledu může mít na náběžné hraně různou podobu, která závisí hlavně na teplotě, vzdušné vlhkosti a na typu oblačnosti. Námraza může být ovlivněna aerodynamickým ohřevem, který se projevuje u rychlostí vyšších než  $500\text{ km/h}$  [9]. To může ovlivnit její celkový tvar. Při nižších rychlostech námraza se stoupající rychlostí narůstá.

### **Profilová námraza**

Tento tvar námrazy vzniká při velmi nízkých teplotách kolem  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  prudkým nárazem drobných přechlazených kapek v oblasti náběžných hran a povrchu okamžitě přilnou [1]. Led se rovnoměrně usazuje po celé délce náběžné hrany a zachovává tvar původního profilu, jak je vidět na *Obrázku 14*. Při profilové námraze nedochází k redukci aerodynamických vlastností letadla a k vážnému ohrožení bezpečnosti letu.



Obrázek 14 Profilová námraza [vlastní]

### **Žlábková námraza**

Tento tvar námrazy vzniká při vyšších teplotách od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  a současně při vysokých rychlostech letu [9]. Následkem aerodynamického ohřevu nabývá náběžná hrana kladné teploty, zatímco teplota jejího okolí zůstává v záporných teplotách. Kapky tak nemohou zmrznout hned při nárazu a jsou pak unášeny proudem vzduchu do chladnějších částí podél profilu. Tam zamrznou a vytvoří charakteristický tvar žlábků, který můžete vidět na *Obrázku 15*. Žlábková námraza je velice nebezpečná forma námrazy ovlivňující odpor a aerodynamické vlastnosti profilu.



Obrázek 15 Žlábková námraza [Vlastní]

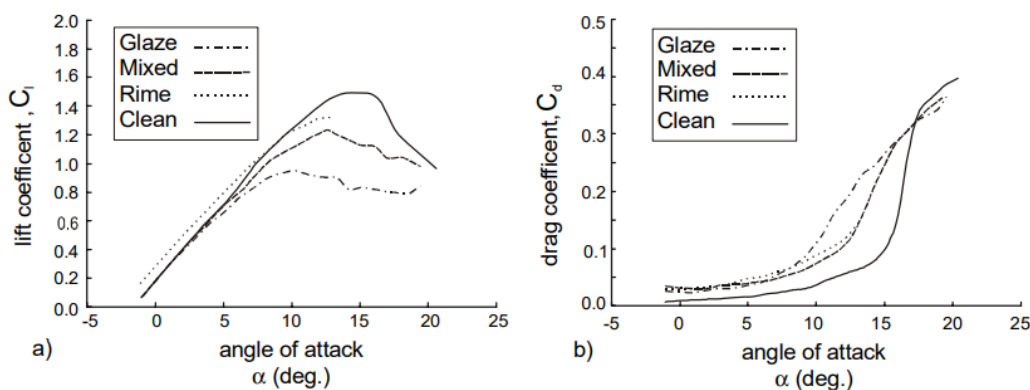
### **Beztvará námraza**

Tento tvar námrazy je běžný za poměrně vysokých teplot lehce pod bodem mrazu ( $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a teplotách povrchu pod bodem mrazu [9]. Vzniká při vyšších rychlostech, kde se již projevuje aerodynamický ohřev. Beztvará námraza se tvoří při letu ve smíšené oblačnosti, která obsahuje vysokou koncentraci vodních kapek a ledových krystalků. Ty jsou následně unášeny podél profilu, ochlazují povrch letadla a usazují se na ostatních vrstvách. Jakmile je povrch dostatečně podchlazen, vrstvy zmrznou. Nejčastější vznik toho druhu námrazy je během stoupání smíšenou oblačností.

## Účinky vzniku námrazy

### Obtékání profilu

Námraza se nejčastěji zachytává na náběžných hranách, kde naruší aerodynamický profil. Výsledkem účinku námrazy je snížení vztlaku, zvýšení odporu, zvýšení hmotnosti, zvýšení pádové rychlosti a zvýšení spotřeby paliva. Poměrně tenký nános ledu s hrubým povrchem snižuje vztlak o 30 % a odpor o 40 % [2]. Závažnost vlivu námrazy na profil obtékání závisí na druhu vzniklé námrazy a je graficky zobrazen na *Obrázku 16*.



Obrázek 16 Vliv námrazy na profil podle jednotlivých druhů [22]

### Navýšení hmotnosti

V důsledku vzniku námrazy na jednotlivých profilech úměrně k množství ledu narůstá hmotnost celého letadla. To může vést ke ztrátě stability, vlivem posunutého těžiště, jelikož se led po celém draku usazuje nerovnoměrně. Úlomky ledu mohou způsobit poškození povrchu letadla.

### Nefunkčnost přístrojů

Usazený led může způsobit nefunkčnost některých letových přístrojů jako je třeba výškoměr nebo variometr. Nejohroženější jsou v tomto směru komponenty, které významně vyčnívají z povrchu draku. Nejčastěji tak zamrzají antény, vystupující čidla nebo například pitotova trubice. To může vést k měření chybných dat a k následné nefunkčnosti palubních přístrojů

### Motory

#### Pístový

Námraza pístového motoru může způsobit zastavení jeho chodu. Nejčastěji vzniká námraza v karburátoru, na vstupních částech přívodu vzduchu do motoru nebo zamrznutím vody v palivu. Námraza karburátoru patří mezi nejnebezpečnější jevy spojené s námrazou, jelikož se může objevit i při kladných teplotách. Námraza karburátoru je způsobena:

- Náhlým poklesem teploty v důsledku absorbování latentního tepla během odpařování paliva.
- Poklesem teploty v důsledku adiabatického rozpínání vzduchu při průchodu potrubím.

### **Proudový**

Proudové motory jsou na námrazu velmi náchylné a pokud dojde jejímu vzniku na vstupní části dmychadla, dojde ke snížení výkonu a účinnosti celé pohonné jednotky. Drobné úlomky ze vstupní části mohou vniknout do jádra motoru, což způsobuje pumpáž a může dojít k jeho poškození.

Proudový motor je na námrazu nejnáchylnější především při vysokých otáčkách a nízké dopředné rychlosti. Adiabatické ochlazování může způsobit pokles teploty až o 5 °C [2]. V důsledku těchto skutečností je nutné, během průletu oblastí s vysokým výskytem vodních srážek a venkovní teplotou nižší než + 10 °C, zapnout dostupné protinámrazové opatření [2].

## **1.2.4 Námraza vrtulových letadel**

V průběhu letu nedosahují vrtulová letadla příliš vysokých rychlostí, a proto jsou na námrazu mnohem náchylnější než letadla proudová. Při rychlostech do 500 km/h nedochází k aerodynamickému zahřívání jejich povrchu a intenzita námrazy tak roste společně s rychlostí [10]. Nejvíce jsou námrazou ohroženy části, které mají tenký profil a jejich rychlost se blíží k této hranici.

Mezi nejnáchylnější části patří právě vrtule, která má velmi tenký profil. Led se na listech vrtule usazuje mnohem rychleji než na křídlech, jelikož je její profil mnohem tenčí. Námraza vrtule patří mezi počáteční indikátor vzniku námrazy na ostatních částech letounu.

Z počátku se námraza tvoří ve středu vrtulového náboje a následně zamrzají i vrtulové listy. Led vzniká především na náběžných hranách listů, podobně jako je tomu u křidel. Vlivem vysokých rychlostí dochází k aerodynamickému ohřevu, jehož následkem se námraza z počátku netvoří na koncích vrtulových listů. Prostřednictvím odstředivých sil dochází k odlamování nebo odtrhávání ledu v radiálním směru. Úlomky ledu mohou poškodit povrch letadla nebo mohou vniknout přímo do motoru.

Námraza vrtule zhoršuje aerodynamické vlastnosti, snižuje její účinnost a celkový tah. Přechlazené vodní kapky se na ní usazují mnohem více než na křídlech a zvyšují hmotnost jednotlivých listů. Usazený led je rozprostřen na každém listu nerovnoměrně a působí na něj rozdílným zatížením. To vyvolává asymetrické obtékání vzduchu na dílčích profilech listů a tím

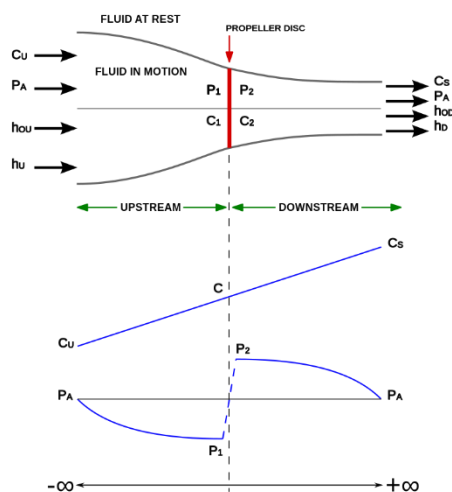


vznikají silné vibrace. Vibrace způsobí podstatné namáhaní listů a dále se přenáší i na lože motoru, což může zapříčinit poruchu pohonné jednotky.

## 1.2.5 Námraza multikoptér

Námraza představuje společným problémem dotýkající se všech letadel včetně těch bezpilotních. Vznik námrazy multikoptér představuje mnohem závažnějším riziko, než je tomu letadel s pevnými křídly. Námraza vzniká nejdříve na nejtenčích profilech, mezi které se řadí listy vrtule. V případě multikoptér slouží vrtule zároveň jako soustava nosných ploch, které při vzniku námrazy okamžitě ztratí svoji funkci, dojde ke ztrátě tahu a následnému k pádu zařízení.

Námraza nejčastěji vzniká v podmínkách nasyceného vzduchu s viditelnou vodní vlhkostí (mlha, kouřmo, mrholení) a při teplotě vzduchu pohybující se kolem 0 °C. V průběhu letu ulpívají přechlazené vodní kapky na povrchu listu a v okamžiku dosažení teploty povrchu pod 0 °C mohou způsobit námrazu. Tenká vrstva námrazy může zapříčinit zásadní změnu aerodynamického obtékání profilu listu. Vrtule nedosahují požadované efektivity a snižuje se



Obrázek 17 Poměr tlaků protékajícího vzduchu vrtulí [46]

tím jejich produkovaný tah, který je ovlivněn ledovým nánosem. Pokles povrchové teploty listu vrtule vzniká rozdílným poměrem tlaků na přítokové a odtokové hraně, který je způsobený vysokou rychlostí otáček vrtule. Přítok vzduchu střetávající se s vrtulovými listy způsobuje úbytek tlaku před vrtulí, což se projeví snížením teploty (Obrázek 17).

Teplota protékajícího vzduchu může být i o několik stupňů nižší, než je teplota okolí. Průtok urychleného vzduchu závisí na vlastnostech vrtule a není ovlivněn výměnou vzduchu s okolím (adiabatický děj). Pokud je ve vzduchu dostatečná vodní vlhkost a teplota povrchu listů vrtule klesne pod 0 °C, vodní kapky na povrchu okamžitě zmrznou, jak lze vidět na obrázku č.18. Nižší tah způsobený námrazou elektronika kompenzuje vyšším výkonem, který vede k nárůstu

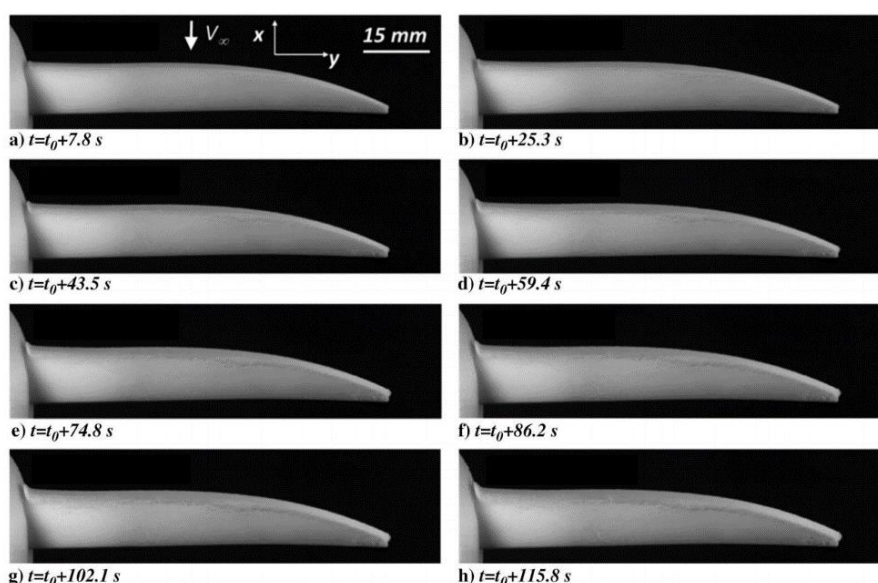
odběru proudu z akumulátorů. Během letu může mít námraza značný vliv na spotřebu energie, což vede k redukci energie nutné k dokončení letu a případnému pádu multikoptéry.



Obrázek 18 Vzniklá námraza na listu multikoptéry

### Vznik zrnité námrazy na vrtulích multikoptér

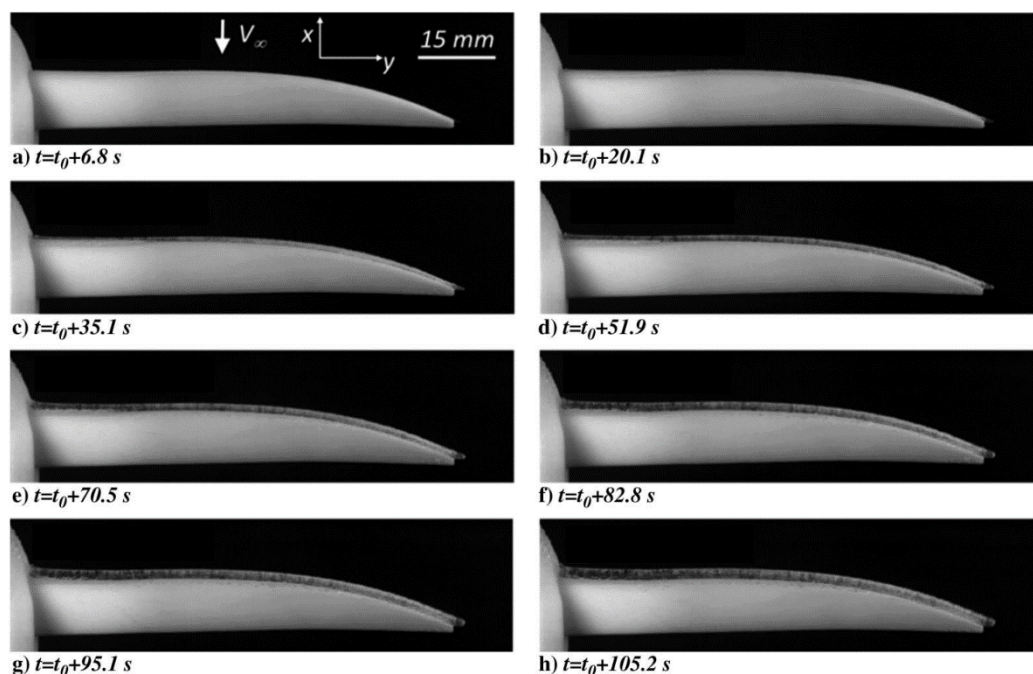
Zrnitá námraza nejčastěji vzniká v podmínkách velmi nízkých teplot vzduchu od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nižších, kde je výskyt přechlazených vodních kapek poměrně vzácný. Pokud je let vykonán v prostředí s dostatečnou vlhkostí, přechlazené vodní kapky narážejí na podchlazených povrch vrtulového listu, kde dochází k velmi rychlé výměně tepla prostřednictvím kondukce. Fázovou přeměnou se uvolní veškeré latentní teplo, které nemá při těchto teplotách větší účinek a rozptýlí do okolí. Vzhledem k nízkým teplotám vzduchu a velmi malému rozměru kapek nedochází k unášení vodního obsahu po ploše listu vlivem odstředivých sil a námraza vzniká takřka okamžitě při dopadu. Nejčastěji se zrnitá námraza koncentruje na náběžné hraně, jelikož kapky ihned zamrzají a nejsou tak ovlivněny odstředivou silou. Největší tloušťky dosahuje námraza na konci listů, jak je vidět na *Obrázku 19*.



Obrázek 19 Vznik zrnité námrazy na vrtuli multikoptéry [43]

## Vznik smíšené námrazy na vrtulích multikoptér

Smíšená námraza vzniká při teplotě vzduchu nejvýše do  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při těchto teplotách je ve vzduchu dostatečná koncentrace přechlazených vodních kapek větších rozměrů. Jakmile se přechlazené vodní kapky dostanou do kontaktu s povrchem listu, dochází k výměně tepla prostřednictvím kondukce a konvekce. Při změně skupenství vodních kapek je uvolněno latentní teplo, které umožňuje větším kapkám zůstat déle v kapalné formě. Ty menší ihned zamrzají na náběžné hraně. Ostatní vodní kapky, které zůstávají stále v kapalné formě jsou unášeny dále po profilu vlivem rotačních sil pohybující se vrtule. Tam postupně zamrzají a tvoří tak monolitickou plochu rovnoměrně po celé ploše vrtulového listu. Smíšená námraza má poloprůhledný vzhled a hladký povrch. Vzniklý tvar ledové vrstvy kopíruje profil listu a na jeho vrcholu může námraza lehce přesahovat, jak je vidět na *Obrázku 20*.

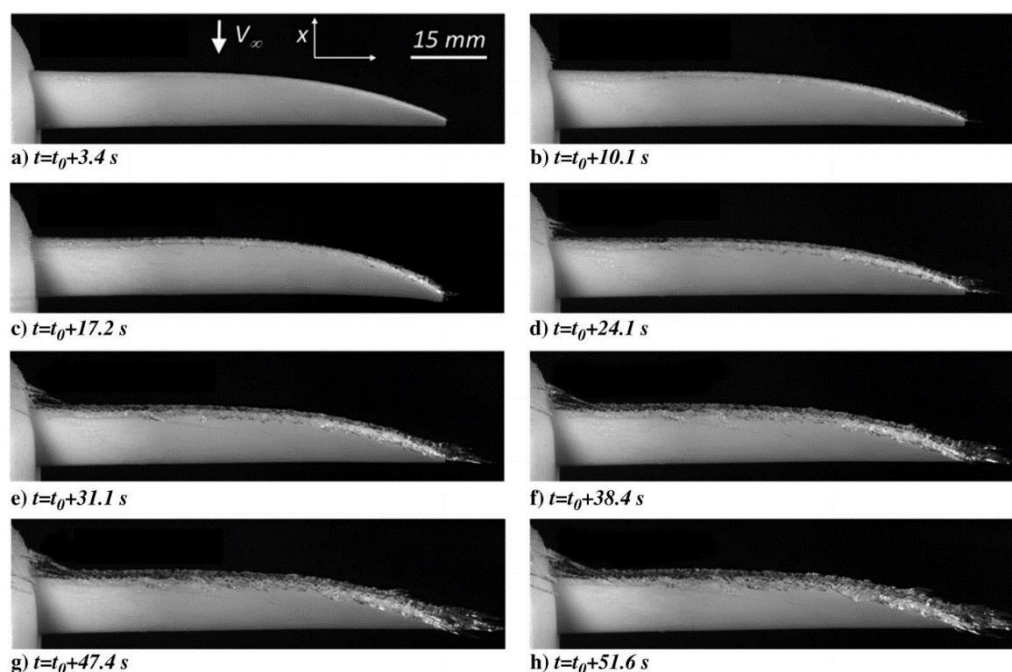


Obrázek 20 Vznik smíšené námrazy na vrtulích multikoptér [43]

## Vznik ledovky na vrtulích multikoptér

Teplota vzduchu při vzniku ledovky by měla dosahovat maximálně  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ledovka vzniká při velmi vysoké vlhkosti vzduchu, udávaná vodnost prostředí LWC (Liquid Water Content) vhodné pro vznik ledovky je  $2\text{ g/m}^3$ . Vznik ledovky má shodný mechanismus, jako předchozí druhy námrazy. Přechlazené vodní kapičky ulpívají po nárazu na náběžné hraně vrtulového listu. Přechlazené vodní kapičky jsou zastoupeny v mnohem větší koncentraci a velikosti než u předchozích typů námrazy, na povrchu se tak mohou společně slučovat. Tepelná výměna s okolím probíhá prostřednictvím konvekce a kondukce, avšak přenos není dostatečně rychlý, proto nebylo veškeré latentní teplo uvolněno do okolí. Převážní část vodních kapek proto

zůstává stále v kapalně formě a rozlévají se po povrchu, dokud nezmrznou. Z tohoto důvodu nejdříve zamrzají drobné kapky na náběžné hraně, zatímco vodní kapky větších rozměrů zamrznou mnohem později. Nárůst ledové vrstvy je zřetelný na celém povrchu, kde vzniká průhledný hrubý ledový film. Na náběžné hraně vzniká ledovka nejrychleji a postupně se šíří vlivem rotačních a aerodynamických sil radiálním směrem po povrchu. Vodní vrstva tvořená shlukem přechlazených vodních kapek pokryje celistvou část plochy listu. Ledovka je nejvýraznější na konci vrtulových listů, což je způsobeno ztenčující se tloušťkou směrem od náboje listu a poměrně vysokou rychlostí rotačního pohybu, který utváří jehlovitou charakteristiku námrazy na konci listů. Jednotlivé časová stádia vzniku ledovky jsou zobrazena na *Obrázku 21*.



Obrázek 21 Vznik ledovky na vrtulích multikoptér [43]

## 1.2.6 Rešerše studií zaměřené na vznik námrazy.

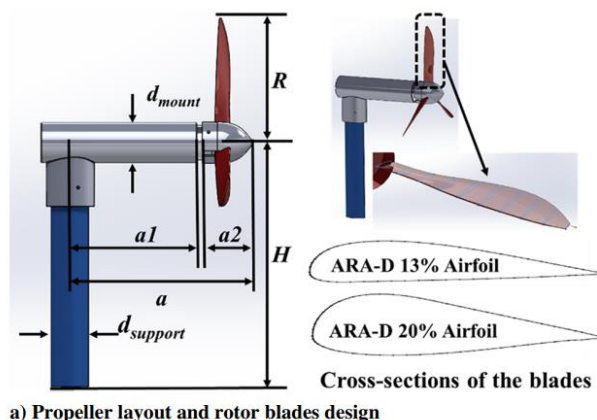
Námraza u malých bezpilotních letadel (multikoptér) je zatím značně neprobádanou oblastí, která je zastíněna problematikou námrazy větších letadel, helikoptér a v některých případech i větrných turbín. Zatím není k dispozici dostatečné množství odborné literatury, informací, analýz nebo experimentálních dat, které se námrazou na těchto zařízeních zabývají. V rámci vědeckých publikací bylo nalezeno několik zdrojů, které se svým obsahem shodují s problematikou této diplomové práce a jsou podrobněji popsány na následujících stránkách.

Experimentální výzkum u těchto studií je ve většině případů prováděn ve specializovaných laboratořích, které jsou schopné zajistit optimální podmínky k simulaci různých druhů námrazy. Převážná část výstupních dat je získána experimentálním měřením v umělých podmínkách. V rámci výzkumu diplomové práce budou veškeré experimenty měřeny a prováděny ve skutečných podmínkách založených na aktuální meteorologické situaci s přihlédnutím na požadavky nastavených parametrů dle zadání práce.

### **Experimentální zkoumání dynamického procesu vzniku námrazy na vrtulovém modelu**

Experimentální studie zaměřená na vyšetřování dynamického procesu vzniku námrazy na vrtulovém modelu byla provedena na *IOWA State university*. Tato studie nejvíce koresponduje s obsahem výzkumu této diplomové práce, ačkoli její měření probíhá v laboratorních podmínkách, které mohou být značně odlišné. Cílem této studie bylo provést analýzu procesu vzniku námrazy na povrchu listů vrtule multikoptér. Experiment byl proveden během vybraných meteorologických podmínek, které simulovaly vznik několika různých druhů námrazy (*zrnité, smíšené, ledovky*). Studie byla doplněna o analýzu vlivu námrazy na výkon multikoptéry, avšak v důsledku působení odstředivých sil způsobených rotací vrtule a finálním působením aerodynamických sil, bylo značně komplikované určení přesných výsledků. Měření námrazy probíhalo v aerodynamickém tunelu, který nabízel vhodné podmínky k provedení požadovaných měření. V počátku každého měření bylo nutné vytvořit vhodné prostředí s předem definovanými meteorologickými podmínkami a teplotou vzduchu  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a následně  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [11]. Během měření byla vrtule vystavena nabíhajícímu proudu vzduchu o rychlosti  $16\text{ m/s}$ . Vlhkost vzduchu byla regulována prostřednictvím soustavy rozprašovacích trubic umístěných ve stropní části a mohla být libovolně regulovatelná v rozmezí od  $0,1\text{ g/m}^3$  do  $5\text{ g/m}^3$  obsahu vodní složky (LWC) [11]. Pro účely studie byla zvolena hodnota  $1\text{ g/m}^3$  a  $2\text{ g/m}^3$  [11]. Popsanými parametry tohoto experimentu lze věrohodně simulovat reálné atmosférické podmínky. V závěru studie bylo zjištěno, že k šíření námrazy dochází převážně v radiálním směru postupně od středu náboje vlivem odstředivých sil. Vzniklá námraza svým tvarem kopíruje profil listu a největší nárůst můžeme zaznamenat u náběžných hran na konci listů. To může způsobit významnou změnu aerodynamického profilu. Redukce výkonu vrtule může být

v některých případech námrazy až o 70% původní hodnoty. Testovací model lze vidět na Obrázku 22 [11].



Obrázek 22 Testovací model vrtule multikoptéry [11]

### Experimentální vyhodnocení provozu více rotorové UAV v podmínkách námrazy

Studie zabývající se experimentálním vyhodnocením provozu multikoptér v námrazových podmínkách byla publikována prostřednictvím The Pennsylvania State University. Cílem studie bylo zjistit jakým vlivem se podílí námraza na provozu bezpilotních letadel. Experiment byl rozdělen do dvou částí, které jsou měřené v uzavřeném aerodynamickém tunelu a námrazové komoře. K měření v uměle vytvořených námrazových podmínkách bylo využito komerčně dostupné kvadrokoptéry DJI Mavic PRO. K simulaci byly využity dva typy řídicích algoritmů umožňujících regulaci otáček vrtulí. První algoritmus udržoval konstantní otáčky po dobu 60 sekund v prostředí bohatém na přechlazené vodní kapky. Druhý algoritmus udržoval otáčky do doby odtrhnutí ledu z lopatek vrtulí multikoptéry. V případě konstantních otáček docházelo ke zvyšování výkonu a současně ke snížení tahu korelující s dobou vznikající námrazy. V případě konstantního tahu dochází k růstu požadovaného výkonu společně s rostoucím počtem otáček. Průběh růstu (otáček a výkonu) lze popsat lineární křivkou až do doby odtržení ledové vrstvy z listu vrtulí. V rámci experimentu bylo zjištěno, že se vznikem námrazy dochází k prudkému poklesu výkonu v důsledku snížení tahu. Studie rovněž odhalila skutečnost, že krátce po vzniku námrazy se elektromotory dostávají na nadlimitní hodnoty vstupního proudu, nadměrně se zahřívají a dochází tím k roztavení izolace vodičů. Následkem může být zničení baterie nebo elektromotoru, což způsobí pád a zničení multikoptéry v okamžiku letu.

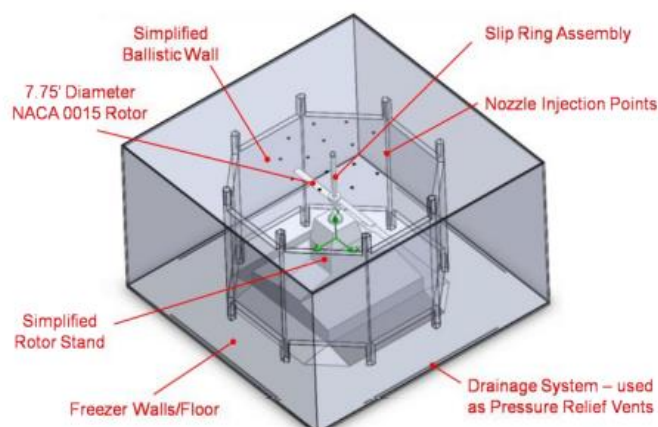


## **Experimentální vyhodnocení a letová simulace bezpilotního letadla s koaxiálními rotory v námrazových podmínkách**

Studie se zabývá experimentálním měřením vlivu námrazy působící na koaxiální rotory menších průměrů (do 0,5 m) během letu. Koaxiální konfigurace rotorů je použita pouze u některých druhů bezpilotních letadel, v případě multikoptér není tato konfigurace příliš obvyklá. Výzkum byl proveden na The Pennsylvania State University se zaměřením na analýzu výkonnosti bezpilotních letadel během letu v námrazových podmínkách. Pro potřeby výzkumu byl vyvinut číselný model zahrnující parametry točivého momentu a produkovaného tahu, které jsou v závislosti na počtu otáček a rychlosti vzniku námrazy. Využitím těchto dat byly provedena simulace letu v námrazových podmínkách. Uskutečněné simulace ukazují na lineární růst točivého momentu a diametrální pokles tahu za konstantních otáček adekvátní množství vzniklé námrazy. Studie rovněž vypovídá o rozdílné intenzitě námrazy v podtlakové a přetlakové části profilu. V horní podtlakové části listu vzniká námraza mnohem rychleji. Uskutečněné simulace letu prokázaly riziko ztráty řízení a schopnosti vodorovného letu souběžně s kumulací námrazy. Potíže s řízením vznikly zpravidla do 40 s od vzniku námrazy. Během simulace bylo zjištěno, že odtržením ledové vrstvy z povrchu vrtule došlo ke skokové změně otáček, která měla vliv na destabilizaci zařízení a v konečném důsledku způsobila ztrátu výšky případně nehodu.

## **Experimentální vyšetřování vzniku námrazy a její odlamování z rotoru**

Pensylvánská univerzita provedla studii zaměřenou na výzkum vzniku námrazy na rotorových zařízeních. Námraza představuje závažnou komplikaci pro provoz vrtulových letadel, jelikož dochází ke snížení výkonu doprovázenou vysokým nárůstem otáček vrtulí. Náhodné odlamování ledu, způsobené odstředivou silou rotace, snižuje vztlakovou účinnost jednotlivých ploch a vytváří vysoké vibrace, které mají vliv na změnu aerodynamických vlastností jednotlivých listů. Studie byla zaměřena na návrh počítačového modelu, na kterém lze předpovědět vznik námrazy, včetně odlamování ledových vrstev z listů vrtule. Další část výzkumu měla za úkol ověřit navržený model ve skutečných podmínkách s korelací naměřených dat vycházejících ze simulací. Nový simulační model byl vyvinut k predikci vzniku námrazy a k detekci odtrhávání ledu. Výstupní data simulačního modelu by měla být shodná s daty, která byla naměřena během uskutečněných měření. Tento výzkum porovnává simulovaná data s experimentálně naměřenými daty skutečného modelu, jehož výstupem je ověření korelace všech dat. Testy probíhaly simulací skutečných podmínek ve speciální komoře na plnohodnotném rotorové modelu, soustav je zobrazena na *Obrázku 23*. V horní části komory byla umístěna skupina trysek, které měly na starost regulaci vlhkosti vzduchu.



Obrázek 23 Měřicí komora s vodními tryskami simulující vlhkost [11]

Vyvinutý model byl schopný předpovědět přibližně 20 % naměřených hodnot, vyšší chybovost byla zaznamenána na konci vrtulových listů [12]. Predikce odlamování ledu byla ve studii detekována od 0,7R do 0,9R profilu, jak je uvedeno v *tabulce číslo 3*. Přesnost predikce časové jednotky a poloměru odlomení se shodovala v 25 % případů ve srovnání s naměřenými hodnotami [12].

Tabulka 4 Predikce odlamování ledu: Skutečné měření/ Simulace/ Simulace s korekcí

Shed Event	AERTS Experimental		ARISP		ARISP with Corrections	
	Time (s)	%R	Time (s)	%R	Time (s)	%R
Case 31						
1	215	0.82	130	0.82	160	0.81
Case 33						
1	352	0.77r	100	0.93	150	0.92
2			210	0.64	300	0.72
3			320	0.93		
Case 34						
1	272	0.88	70	0.97	120	0.90

### 1.3 Adiabatický děj

Během adiabatického děje nedochází k tepelné interakci soustavy s okolím. Adiabatický děj probíhá za předpokladu, že je systém zcela izolován od okolí nebo děj proběhne tak rychle, že k žádné tepelné výměně nedejde. Teplo je v systému zcela izolováno a nemůžeme ho do něj dodat ani odebrat. Změny vnitřního stavu energie ( $dU$ ) lze docílit pouze vykonáním nebo odebráním práce. V praxi můžeme adiabatický popsat na příkladu izolovaného válce, který



vlivem zvýšení svého objemu, způsobí pokles teploty a tlaku v soustavě. Pokud systém vykoná práci, sníží se vnitřní energie tohoto systému. Vnitřní energie je tedy přímo úměrná na dodané nebo odebrané práci, která je popsána prvním termodynamickým zákonem.

Vztah mezi dodaným teplem a prací je odvozen z prvního termodynamického zákona a je znázorněn vzorcem číslo 1.

$$dU = dQ - dW \quad (1)$$

( $dU$  – změna vnitřní energie,  $dQ$  – odevzdané nebo přijaté teplo,  $dW$  – vykonaná práce) [6]

Pokud se jedná o adiabatický děj, dodané teplo je nulové, tedy  $dQ = 0$ . Pro adiabatický děj platí následující vztah znázorněn vzorcem číslo 2.

$$dU = -dW \quad (2)$$

( $dU$  – změna vnitřní energie,  $dW$  – vykonaná práce) [6]

Adiabatický děj je značně vzdálen od reality, jelikož není možné zajistit takové podmínky, abychom tepelnou interakci s okolím zcela zamezili.

## 2. Bezpilotní letadlo

Bezpilotní letadlo je druh letadla, které je provozováno bez přítomnosti pilota na palubě a je ovládáno z dálkové řídicí stanice RPS (**R**emote **P**ilot **S**tation). Bezpilotní letadlo se v angličtině označuje jako UA (**U**nmaned **A**ircraft) nebo zkratkou UAV (**U**nmaned **A**erial **V**ehicle) používanou v USA. Osoba, která je pověřena řízením UA, se odborně nazývá dálkově řídicí pilot RP (**R**emote **P**ilot). Všechny tyto jednotlivé složky tvoří bezpilotní systém UAS (**U**nmaned **A**ircraft **S**ystem), který se skládá z bezpilotního letadla, řídicí stanice a veškerých dalších prvků, které jsou nezbytné k vykonání letu.

Bezpilotní letadla hrála velkou roli ve vojenském odvětví, kde se využívala ke sledování, průzkumu a ke strategicko-analytické činnosti. K historicky prvnímu nasazení došlo během druhé světové války, prostřednictvím dálkově řízené střely V1 s plochou dráhou letu, která byla určena k destrukční činnosti. Výhodou použití UA byla eliminace rizika ztráty lidských životů. Původní modely byly poháněny spalovacími nebo proudovými motory, což v měřítku komerčního použití nebylo příliš vhodné. Na základě nasazení výkonnějších baterií, bezkartáčových elektromotorů nebo pokročilé elektroniky došlo k prudkému rozvoji bezpilotních letadel pro širší veřejnost v posledním desetiletí, jelikož dříve tyto komponenty nebyly na takové technické úrovni.

Bezpilotní letadla se dělí do několika kategorií, u nichž mají nejpočetnější zastoupení multikoptéry. Multikoptéra je nejdostupnější a nejčastěji používané bezpilotní letadlo mezi širokou veřejností. Vynikají velmi dobrou ovladatelností, přesností polohy zásluhou GNSS a uživatelskou přívětivostí. Často jsou širokou veřejností nazývány drony. Z anglického překladu slova „DRONE“ může být pojmenování poněkud zavádějící, jelikož se v překladu jedná o hukot, bzukot nebo bzučení.

### 2.1 Multikoptéra

Multikoptéra je dálkově ovládané bezpilotní letadlo (UA), jehož vztlak je vyvozován na nosných vrtulových listech se svislou osou rotace. Pohyb multikoptéry je řízen dálkově pověřenou osobou (RP) skrze RPS, která ovládá pohyb zařízení změnou otáček jednotlivých vrtulí. Pohyb je zajištěn v horizontální i vertikální rovině s možností kolmého startu nebo přistání.

Název zařízení vychází z počtu pohonných jednotek, jedná se tedy o vícemotorové zařízení. V praxi se nejčastěji používají kvadrokoptéry, které disponují čtyřmi vrtulami a shodným počtem pohonných jednotek. Počet jednotek není omezen a záleží pouze na provozovateli,

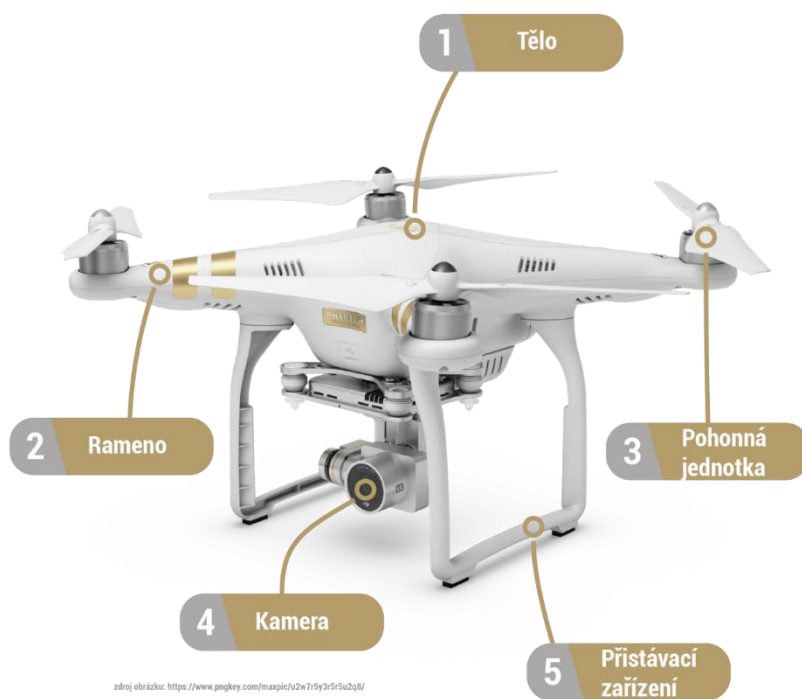
jakou konfiguraci si zvolí na základě svých požadavků. Počet pohonných jednotek roste s vyšší předpokládaného provozního nákladu, jako je zátěž v podobě kamery s těžkým objektivem.

Odvětví, ve kterém dnes najdou multikoptéry využití, je velmi rozsáhlé. Jedná se o různorodou činnost, zabývající se monitorováním životního prostředí (trasování ledových ker, detekce požárů lesů, meteorologie), záchranou a vyhledáváním, geografii, dopravní analýzou anebo vědeckým výzkumem. V blízké budoucnosti se očekává vysoký nárůst využití multikoptér v různých průmyslovém odvětví, výrazně především v logistice. Velké společnosti jako je Amazon, Google nebo DHL plánují využití bezpilotních letadel ve velkém měřítku pro různou činnost, například pro doručování zásilek.

Pro širokou škálu nasazení multikoptér v běžném provozu je zapotřebí dalšího vývoje, zlepšení spolehlivosti, bezpečnosti a zvýšení technické vyspělosti. K širšímu komerčnímu využití musí být především minimalizovány pořizovací a provozní náklady. Nezbytně nutná je, kromě pokročení technických a komerčních výzev, legislativní integrace UA a začlenění bezpilotních letounů do mezinárodního vzdušného prostoru.

## 2.2 Základní části multikoptéry

Multikoptéry jsou důležitou součástí bezpilotního systému včetně řídicí stanice a ostatního příslušenství. Je rozdělena na několik částí, které se liší dle požadavků nebo druhu využití a jsou zobrazeny na *Obrázku 24*. Hlavní část, tělo (1) obsahuje veškerou elektroniku, senzory a pohonnou baterii. Z hlavní části vystupují ramena (2), která jsou oporou pohonným



Obrázek 24. Popis těla multikoptéry [vlastní]

jednotkám (3) a jsou v nich uloženy regulátory. Počet ramen se liší v závislosti na počtu použitých pohonných jednotek. K bezpečnému vzletu a přistání jsou multikoptéry vybaveny přistávacím zařízením (5), které zajišťuje podpůrnou činnost v době prostoje a umožňuje zavěšení užitečného nákladu jako je kamera nebo fotoaparát.

### **Tělo multikoptéry (1)**

Jedná se o hlavní část draku, která zajišťuje výslednou pevnost a vzhled zařízení. Tělo je důležitá integrální část, která spojuje veškeré komponenty. V jeho útrokách nalezneme veškerou řídicí elektroniku a senzory, které vyhodnocují letová data. Na základě těchto dat a dat přijatých z RPS je umožněno ovládní pohybu zařízení ve vzduchu. Vysílač od RP přenáší kódovaný radiový signál skrze přijímač do řídicí jednotky, která signál zpracuje a předá povely regulátorům, které řídí množství otáček pohonných jednotek. Množství otáček na konkrétních pohonných jednotkách ovlivňuje výsledný pohyb multikoptéry.

Jednotlivé části mohou být vyrobeny z různých materiálů, které mají zásadní vliv na výslednou pevnost a hmotnost multikoptéry. U amatérských konstrukcí se jedná o dřevěné překližky anebo plastové části. Materiál použitý k výrobě konstrukce těla je nejčastěji plast, který může být vyztužen uhlíkovým vláknem, kompozitními materiály nebo použitými částmi z hořčíkových slitin. V konstrukci multikoptéry mohou být použity tyto materiály.

- Dřevo – použití dřevěných částí bývá levným řešením a pokud dojde ke zničení lze ji rychle a snadno nahradit. Její výroba a opracování je značně náročné a prakticky se nepoužívá.
- Plast – Je nejčastěji zastoupený materiál použitý u všech komerčních multikoptér. Vyniká příznivou cenou a vysokou odolností.
- Uhlíkový kompozit – Je velice lehký a zároveň velmi tvrdý materiál, což je vykoupeno vyššími pořizovacími náklady. Uhlíkové vlákno brání prostupu vysokofrekvenčního signálu, proto je třeba zvážit jeho použití v blízkosti elektronických komponentů.
- G10 – Materiál G10 je tvořen skelnými vlákny a jeho vlastnosti jsou podobné vláknům uhlíkovým. Cena tohoto materiálu je však nižší.
- Hořčíková slitina – jedná se o levný a snadno dostupný materiál, který vyniká nízkou hmotností, avšak nedosahuje takové hmotnosti jako kompozitní materiály. Slitina může být použita k vytvoření celého těla anebo ke zpevnění některých exponovaných částí.

## Rameno (2)

Rameno poskytuje oporu pohonným jednotkám a napojuje je k hlavní části, tělu. Většina běžně používaných multikoptér je nejčastěji tvořena čtyřmi, šesti nebo osmi rameny a však můžeme narazit na konstrukce tvořené pouze třemi rameny. Počet ramen je shodný s počtem pohonných jednotek, které jsou umístěny na jejich koncích rovnoměrně po obvodu kruhu.

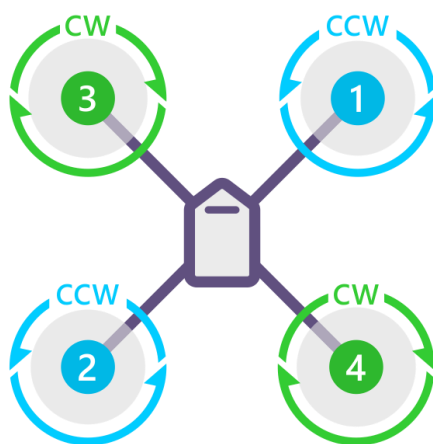
Obecně lze říci, že s počtem ramen a současným navýšením pohonných jednotek roste její složitost, pořizovací cena a hmotnost. Výhodou je, že v případě selhání pohonné jednotky lze lépe kompenzovat ztracený výkon a nemusí dojít k zřícení. Větší počet ramen je používá, jestliže není výkon jednotlivých pohonných jednotek dostatečný, používá se větší počet ramen s pohonnými jednotkami, k zajištění požadovaného výkonu, který roste s výší užitečného zatížení.

Jako nejideálnější a nejrozšířenější řešení se z tohoto pohledu jeví konstrukce typu kvadroptéra (4 ramena). Chytrým konstrukčním řešením je umístění regulátoru do nevyužitého prostoru uvnitř ramen.

## Pohonná jednotka (3)

Pohonná jednotka je jedna z nejdůležitějších částí multikoptéry, která zajišťuje pohyb ve všech směrech. Pohonnou jednotku tvoří vrtule, elektromotor a regulátor, nejčastější variantou pohonu je elektřina. Tyto části budou podrobně popsány v dalších podkapitolách.

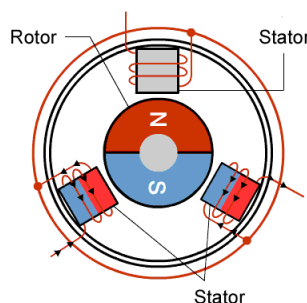
Počet pohonných jednotek je závislý na použitém konstrukčním řešení, tedy na počtu ramen. Ty musí tvořit vyrovnaný kroutící moment, proto je jejich smysl otáčení stabilně rozložen, jak můžete vidět na *Obrázku 25*. Energie je dodávána z pohonné baterie, která v závislosti na své kapacitě ovlivňuje dobu provozu.



Obrázek 25 Smysl otáčení vrtulí UA [39]

## Elektromotor

Elektromotor je zařízení, které mění elektrickou energii na energii mechanickou. To se projevuje otáčkami připevněných vrtulí. Elektromotor je složen z magnetů a cívek, které řídí tok magnetického pole prostřednictvím množství přitékajícího proudu. Vzájemnými silami mezi magnety a cívkami dochází k posunu magnetických částí, které začnou rotovat, zvenčí se tento pohyb jeví jako otáčení. Vzájemné uspořádání magnetů a cívek závisí na druhu použitého elektromotoru. Mezi základní typy patří komutátorový (brushed) a bezkomutátorový (brushless). Mezi nejčastěji používané patří právě bezkomutátorový stejnosměrný motor (brushless motor DC), který je také označován jako bezkartáčový. Stejnoscenný proud je veden fixními cívkami, prostřednictvím elektromagnetického pole dochází k rotaci magnetů kolem středu, jak lze vidět na *Obrázku 26*. Průběh otáček motoru je díky protékajícímu stejnosměrnému proudu krokový. Výhodou použití, tohoto typu motoru, je vyšší životnost a účinnost za cenu vyšších nákladů.



Obrázek 26. Princip funkce elektromotoru [41]

## Regulátor

Regulátor se stará o řízení výstupního proudu, který je přiváděn na elektromotor. Elektronická regulace otáček (ESC), zajišťuje přepínání proudu mezi cívkami motoru, které uvedou do pohybu magnety. ESC je náhradou mechanického regulátoru, který je připojen ke zdroji a skrze pohonnou jednotku zajišťuje otáčení vrtule. Regulátor má zásadní vliv na počet otáček motoru, které jsou řízeny přes řídicí jednotku skrze RPS anebo jiný ovládací prvek.

## Vrtule

Vrtule je posledním důležitým prvkem, který je součástí pohonného ústrojí multikoptéry. Vrtule převádí mechanickou sílu elektromotoru na sílu aerodynamickou, kterou je urychlován vzduch. Vrtule slouží jako hlavní pohonné ústrojí, které umožní pohyb multikoptéry ve vertikální a horizontálním směru. Charakteristika letu je pak ovlivněna velikostí listu. Menší listy dosahují většího zrychlení a zpomalení, než je tomu u listů s větším průměrem. Malé vrtulové listy najdou využití spíše u sportovního létání, kde je brán zřetel na rychlejší reakce, naopak větší

lopatky mají výhodu zachování větší stability během letu. Nejčastěji jsou na multikoptérách používány plastové dvoulisté vrtule. Vrtule mohou být vyrobeny i z jiného druhu materiálu, mezi které patří dřevo nebo kompozit.

### **Pohonná baterie**

Výše popsané komponenty tvoří dohromady primární celek hlavního pohonného ústrojí. Bez dodání energie do pohonné jednotky by nebyla multikoptéra schopna provozu. O dodávku elektrické energie se starají akumulátory, které mohou být integrovány v těle multikoptéry nebo připojeny externě. Nejčastějším typem používané baterie jsou Lithium polymerové (Li-Pol) články, jejichž počet závisí na velikosti multikoptéry a počtu pohonných jednotek. Zpravidla se používá dva až šest článků v jedné baterii. Lithium polymerová baterie vyniká vysokou koncentrací elektrického náboje, nízkou hmotností a netrpí paměťovým efektem. Bohužel jsou citlivé na mezní extrémy jako je přebíjení nebo úplné vybití, což může velmi zkrátit životnost akumulátoru.

### **Přistávací zařízení (4)**

Jedná se o část konstrukce, která stabilizuje multikoptéru během fáze vzletu nebo přistání ze země. Přistávací zařízení může být integrováno přímo do rámu formou ližin, které mohou být pevné nebo polohovatelné. Typy řešení přistávacího zařízení se liší podle konstrukce multikoptéry. Můžeme se také setkat s automatizovaným polohovacím zařízením, které přesunou po vzletu nohy do horizontální polohy a před přistáním do vertikální.

### **Kamera (5)**

Součástí konstrukce mnoha komerčních multikoptér je integrovaná kamera, která poskytuje přenos obrazu v reálném čase, využitím bezdrátové technologie WLAN. Současně umožňuje záznam videosekvencí nebo pořizování fotografií, standardem je záznam videa v kvalitě FullHD nebo 4K. Během letu dochází k drobným vibracím, které mají vliv na kvalitu pořízených videí. K utlumení těchto vibrací slouží zařízení zvané Gimbal, které zajišťuje zavěšení kamery na Kardanově závěsu, který nežádoucí vibrace utlumí.

## 2.3 Analýza nehod multikoptér způsobených námrazou

K leteckým nehodám dochází v mnohem menším měřítku, než tomu bylo dříve. Je to především díky pokročilejší technice a vyšší bezpečnosti, na kterou je brán značný zřetel. V minulosti nebylo letectví nijak regulováno, a proto docházelo k častým nehodám s tragickými následky, vinnou technických závad, lidského faktoru a v neposlední řadě selháním systémových opatření. V dnešní době jsou tyto nedostatky značně eliminovány a letectví se stává velmi bezpečným odvětvím dopravy, ačkoli se v roce 2019 pravděpodobnost smrtelné nehody mírně zvýšila, stále dosahuje pravděpodobnosti jedné nehody na 5,58 milionu provedených letů [13].

Na rozdíl od letecké přepravy cestujících, nepředstavují bezpilotní letadla zásadní riziko ohrožení lidského života a jejich nehody jsou proto vcelku opomíjené. Rozvoj a rozšíření bezpilotních letadel v mnoha odvětvích může v budoucnu vytvořit požadavek na zvýšení bezpečnosti u letadel tohoto typu. V České republice se leteckými nehodami bezpilotních letadel zabývá předpis L-13, který je univerzálním pro všechny typy letadel.

### **Odborné zjišťování příčin letecké nehody.**

Pokud vznikne událost, která inklinuje ke změně stavu oproti původnímu bezchybnému, jedná se o leteckou nehodu nebo incident. Tato skutečnost je podrobně popsána v předpise L-13 [14], který se leteckými nehodami zabývá a vztahuje se na provoz bezpilotních letadel se schválenou konstrukcí nebo provozním povolením. Pokud se jedná o rekreačně sportovní použití, nevzniká ohlašovací povinnost a událost není oficiálně zaznamenána.

### **Incident**

Za incident se považuje událost, která svou povahou neovlivňuje bezpečnost letového provozu. Jedná se o drobnou výchylku od standardního průběhu, která je zapříčiněna chybou lidského činitele nebo techniky, ale jejím důsledkem není nutnost předčasného ukončení letu nebo nutnost vykonání nouzových postupů. Mezi incidenty se zařazují i nepředvídatelné příčiny přírodní povahy jako je srážka s ptáky nebo elektrický výboj.

### **Vážný incident**

Vážný incident je událost spojená s vysokou pravděpodobností vedoucí k letecké nehodě během provozu, kdy je letadlo připraveno k pohybu pro účely letu a dobou kdy již není v provozu a pohonná soustava již nekoná svoji činnost.



## **Letecká nehoda**

Letecká nehoda je vztažena k době, kdy je letadlo připraveno k pohybu pro účely letu a dobou kdy již není v provozu a pohonná soustava nekoná svoji činnost. Klasifikace letecké nehody je definována na základě tří podmínek. Alespoň jedna z nich musí být splněna.

- Osoba byla smrtelně nebo těžce zraněna v době provozu.
- Bezpilotní letadlo bylo zničeno nebo poškozeno tak, že jeho poškození není slučitelné s dalším provozem a potřebuje větší opravu.
- Bepilotní letadlo je nezvěstné nebo je na nedostupném místě.

## **Popis incidentu č. 1**

### **Informační přehled**

Vykonaný let byl rekreačního charakteru, jelikož operátor v podmínkách námrazy létá velmi ojedinelé. Tomuto incidentu předcházely zkušenosti s provedením několika letů za mnohem nižších teplot v horách, během sněhové bouře, které nebyly nijak problematické

### **Průběh letu**

Let byl uskutečněn na kvadrokoptěře DJI Mavic PRO ve vzdálenosti přibližně 400 m od operátora. Do několika desítek vteřin byl operátor informován varovnými zprávami a následně došlo ke zřícení kvadrokoptéry k zemi.

### **Meteorologické podmínky**

Meteorologické podmínky v blízkém okolí nebyly příliš příznivé k provedení letu. V místě byla mlha a teplota vzduchu se pohybovala kolem 0 °C [15].

### **Provedení letu**

Provedení letu bylo v přímé dohlednosti od operátora, který krátce po startu obdržel výstražnou zprávu. Zpráva obsahovala informace o problému s napětím pohonné jednotky a doporučení kontroly vrtulí. Následně se objevila varovná zpráva „over-voltage battery discharge“ (přepětí, baterie se vybíjí) [15].

Operátor provedl potřebný zásah do řízení a zadal povel pro návrat zpět do místa vzletu. Kvadrokoptéra ovšem na povely nereagovala let začal být nestabilní. Následně došlo k prudkému poklesu výšky a neřízenému pádu k zemi. Kvadrokoptéra dokázala v poslední chvíli reagovat a operátorovi se podařilo navést stroj na přilehlou mýtinu pokrytou měkkým sněhem, kde se po dopadu převrátila.

## Závěr

Po dopadu a ohledání byly zjištěny nánosy ledu na odtokové hraně vrtulí a spodní části zařízení. Následně po odstranění vzniklé námrazy byl proveden další krátký let, u kterého se problémy již znovu neobjevily.

Tabulka 5 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [15]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
do 2 minut	Nespecifikováno	Mlha	Nespecifikováno	0 °C	Spodní část a vrtule.

## Popis incidentu č. 2

### Informační přehled

Let byl proveden s kvadrokoptérou DJI Mavic Pro. Operátor měl předchozí zkušenost s letem v podmínkách velmi nízkých teplot (až -20 °C), ve kterých se neobjevily žádné závažné problémy [16].

### Meteorologické podmínky

Během letu byla nízká mlha a teplota vzduchu kolem -2°C. Po dobu letu docházelo k opakovanému průletu nízkou oblačností [16].

### Průběh a provedení letu

Let trval přibližně 15 minut během kterých operátor nezaznamenal nějaké závažnější problémy. Kvadrokoptéra se pohybovala v podmínkách nízké oblačnosti včetně průletů skrze ni. Po přistání byla na vrtulích objevena námraza.

## Závěr

Námraza vznikla po celé ploše povrchu vrtulových listů. Součástí incidentu byla přiložena fotodokumentace, kterou můžeme vidět na *Obrázku 27*.

Tabulka 6 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [16].

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
15 minut	Nespecifikováno	Mlha	Nízká oblačnost	-2 °C	Celá horní strana vrtulí



Obrázek 27 Námraza listů vrtule [16]

### **Popis letecké nehody č. 3**

#### **Informační přehled**

Let by uskutečněn na modelu hexakoptéry blíže nespecifikovaného typu spevnými karbonovými dvoulistými vrtulemi. Řídicí jednotka byla vyrobena firmou DJI typ A2, maximální vzletová hmotnost byla 6,95 Kg [17]. Let byl proveden na modelářském letišti Sobínka, přibližně 5 km od mezinárodního letiště Praha [17].

#### **Průběh letu**

Let byl proveden dne 9.12.2014 okolo 15 hodiny ve výšce 30 m AGL a rozdělen do několika krátkých etap [17]. Během posledního letu došlo ke zřícení modelu hexakoptéry a k celkové destrukci draku v důsledku nárazu do země. Z palubního záznamníku bylo zjištěno, že nehodě předcházelo zvyšování otáček vrtulí a nadměrný odběr proudu z baterie, a to až nad limitní hodnoty.

#### **Meteorologické podmínky**

Meteorologické podmínky byly zpočátku příznivé a v okolí svítilo Slunce, pouze ve stínu byla patrná námraza v trávě (*jíní*). Při samotném letu došlo ke zhoršení meteorologických podmínek a v průběhu letu bylo převážně kouřmo a zatažená obloha. Teplota vzduchu se pohybovala kolem  $-0,5\text{ °C}$  [17].

Tabulka 7 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [17]

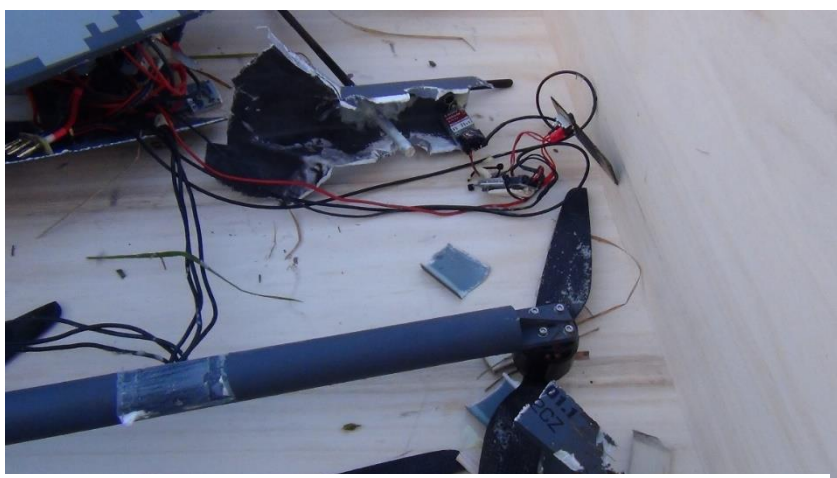
Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
cca 6 minut	Nespecifikováno	Kouřmo	Zataženo	-0,5 °C	Náběžné a odtokové části vrtule

### Provedení letu

První let byl bezproblémový a trval přibližně 5 minut. Během následujícího letu, přibližně 1 minutu od vzletu, se hexakoptéra naklonila a přešla do téměř kolmému pádu [17]. Po nárazu byl stroj zničený.

### Závěr

Na vrtulích vznikla námraza, která způsobila neřízený strmý pád hexakoptéry. Tato událost je posuzována jako letecká nehoda a byla vyšetřována UZPLN. K tomuto případu jsou přiložené fotografie s rozsahem vzniklé námrazy a úrovní destrukce (Obrázek 28 a 29).



Obrázek 28 Hexakoptéra těsně po nehodě [17]



Obrázek 29 Vznik námrazy na vrtulích hexakoptéry [17]

## Popis incidentu č. 4

### Informační přehled

Let probíhal pod dohledem zkušeného operátora, který měl s létáním celoroční praxi. Inkrimovaný let byl uskutečněn dne 21.11.1997 s modelem polomaketou letounu DC3. Tuto událost popsal Jaroslav Kroufek v článku s názvem „Námraza“ v časopise RC Modely 1/98 [18].

### Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky se vyznačovaly vysokou hustotou vzduchu s viditelným obsahem vodních kapek. Dohlednost nepřesahovala více jak 500 metrů a teplota se pohybovala kolem 1 °C [18].

### Průběh a provedení letu

První let proběhl bez větších problémů. V průběhu druhého letu začalo drobně mrholit. Po třech minutách zpozoroval operátor problémy s ovládáním modelu, u kterého se viditelně zhoršila říditelnost v zatáčkách a model přešel do klesání. Následně došlo ke ztrátě říditelnosti a model se v zatáčce dostal do vývrtky a zřítel se do trávy.

### Závěr

Po ohledání zříčeného modelu pokrývala přibližně 1 mm silná námraza křídla, ocasní plochy i před trupu [18].

Tabulka 8 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [18]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
3 minuty	Více jak 500 m	Mlha	Nespecifikováno	1 °C	Křídla a trup

## Popis incidentu č. 5

### Informační přehled

Obdobný případ stejného operátora, jako u incidentu č. 4 nastal dne 31.12. 2016 s modelem Commando, který nedosahuje příliš vysokých rychlostí. Let trval přibližně 1 hodinu [19].

### Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky byly podobné jako u předešlé události. Byla mlha s velmi nízkou dohledností do 50 metrů a teplota se pohybovala kolem 3 °C [19].

## Průběh a provedení letu

Let byl proveden v krátké vzdálenosti od operátora s nízkou letovou rychlostí. Po přistání byla na modelu viditelná námraza.

## Závěr

Po dokončení letu byla zaznamenána námraza na vrtuli, podél náběžné hrany. Vlivem nízké rychlosti letu modelu se na ostatních částech námraza nevytvořila. Tento incident byl bez vážnějších následků.

Tabulka 9 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [19]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
Přibližně 1 h	do 50 m	Mlha	Nízká oblačnost	3 °C	Náběžná hrana vrtule

## Popis incidentu č. 6

### Informační přehled

Rekreační let byl proveden v zimních měsících v malé výšce nad zemí. Operátor byl poměrně zkušený a blíže se zabýval problematikou multikoptér. K letu byl použit model DJI F315 Phantom 2 Vision+ [20].

### Průběh letu

Let trval přibližně 3 minuty, dokud nedošlo k prudké ztrátě výšky multikoptéry a následnému zřícení do pole [20]. Rychlost klesání byla dle údajů z telemetrie přibližně 6 m/s, namísto obvyklých 2 m/s [20].

### Meteorologické podmínky

V okolí letu byly tradičně nepříliš příznivé podmínky pro provedení letu, konkrétně viditelná mlha. Teplota se pohybovaly kolem 0 °C [20].

### Provedení letu

Krátce po 3 minutách letu začala kvadrokoptéra ztrácet výšku, na ovládací povely operátora vůbec nereagovala, na poslední chvíli se podařilo zvrátit náraz do kamenité cesty a směr letu byl odkloněn do ornice na poli.

## Závěr

Příčinou prudké ztráty výšky byl vznik námrazy na vrtulích, na zařízení nedošlo k žádné závažné škodě. Po ohledání byla na vrtulích kvadrokoptéry viditelná námraza o velikosti 1 mm, která způsobila nekontrolovatelné klesání.

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
3 minuty	Nespecifikováno	Mlha	Nespecifikováno	0 °C	Námraza vrtulí

Tabulka 10 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [20]

## Test námrazy, incident č. 7

### Informační přehled

Uživatel po předešlé události vykonal obdobný let, jehož záměrem byl test vzniku námrazy. K letu byla použita kvadrokoptéra typu DJI Phantom FC40. Let byl doplněn o videozáznam prostřednictvím kamery GoPRO [21].

### Meteorologické podmínky

Podmínky během letu byly identické, jako ve většině předešlých případů. Byla značná mlha a teplota pod bodem mrazu, -2 °C [21]. Během stoupaní se kvadrokoptéra dostala do kontaktu s nízkou oblačností.

### Provedení letu

Doba letu byla kolem 2 minut, během kterých došlo k narušení stability kvadrokoptéry a prudkému klesání. Reakce na povely z ovladače byly nulové. Náhlému klesání předcházelo zvýšení výkonu otáček vrtulí a následně pokleslo napětí baterie. Kvadrokoptéra se neřízeně zřítíla k zemi a po nárazu znovu vzlétla do vzduchu. Nakonec mírným klesáním sestoupila zpět k zemi.

### Závěr

V tomto případě vznikla na vrtulích rovněž námraza, což je zdokumentováno na *Obrázku 30*.

Tabulka 11 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [21]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
2 minuty	cca 100 m	Mlha	Nízká oblačnost	-2 °C	Náběžná hrana vrtule





Obrázek 30 Námraza na listu vrtule <sup>[22]</sup>

### **Závěr analýzy nehod multikoptér**

Nehody bezpilotních letadel je velmi těžké identifikovat, jelikož se liší ohlašovací povinnost pro soukromé a profesionální užití. Dle Úřadu civilního letectví došlo, v souvislosti s námrazou, pouze k jedné nehodě multikoptéry. Ta je popsána v podkapitole popis incidentu č.3. Z ostatních zdrojů lze dohledat množství případů, které se neočekávaným vznikem námrazy zabývají. Dostupnost informací o vzniku námrazy jsou následující.

- Incidentsy a nehody, které byly ohlášeny musí být monitorovány ÚZPLN. Oficiální cestou byla v ČR nahlášena pouze jedna nehoda (k roku 2020). Děje se tomu pravděpodobně nízkou závažností nehod, které operátoři nechtějí nahlašovat.
- Neoficiální cestou lze dohledat incidentsy a nehody způsobené námrazou, které jsou zveřejněny samotnými uživateli. Z velké části se jednalo o případy pilotů, kteří nebyli s možností vzniku námrazy seznámeni a nedokázali ji tak včasně předejít.

### **Počáteční podmínky letu**

Z uvedených nehod vyplývá, že podmínky vzniku námrazy na vrtulích multikoptér mají velmi identický průběh. Teplota se ve většině analyzovaných případů pohybovala kolem 0 °C, někdy dosahovala i kladných hodnot. Všechny lety byly provedeny v podmínkách vysoké vlhkosti vzduchu, společně s nízkou teplotou zajišťují vhodné podmínky ke vzniku námrazy. Námraza nejčastěji vzniká v prostředí s nízkou dohledností spojenou s meteorologickými jevy jako je kouřmo, mrholení nebo nízká oblačnost. Podmínky předcházející vzniku námrazy můžeme shrnout do několika bodů, které jsou uvedeny níže:

- Vysoká vlhkost vzduchu.
- Nízká dohlednost (mlha, kouřmo, nízká oblačnost).



- Teplota vzduchu pohybující se kolem 0 °C.

### **Chování multikoptéry po vzniku námrazy**

Ve většině případů se jednalo o zhoršení aerodynamických vlastností vrtulí, vlivem vzniklého nánosu ledové vrstvy na listech vrtule. V některých případech dosahovala tloušťka ledu až 1 mm. V závislosti na typu použité multikoptéry obdrželi RP varovné zprávy o nestandardních otáčkách vrtulí a informaci o nízkém napětí na baterii. Reakcí řídicí jednotky na vzniklou námrazu je zvýšení otáček vrtulí. Řídicí jednotka se tak snaží dorovnat úbytek tahu a kompenzovat přírůstek hmotnosti vzniklý námrazou. Vysoké otáčky jsou spojené s nadměrným odběrem proudu z akumulátoru a poklesem napětí. S kumulujícím se množstvím ledu vrůstá potřebný tah, který již multikoptéra nedokáže zvýšením otáček kompenzovat. Zpočátku dojde ke snížení stability a kymácivému pohybu, který přejde v prudké klesání směrem k zemi. Projevy chování multikoptéry při námraze jsou pospány v následujících bodech:

- Zvýšení otáček vrtulí a ztráta stability.
- Pokles napětí baterie způsobené vysokým odběrem elektromotorů.
- Neřízený prudký pád k zemi.

### **Identifikovaná příčina a následky**

Důvod nekontrolovatelného klesání byl u všech nehod identický. Jednalo se o vzniklou námrazu na různých částech zařízení, nejčastěji to byly vrtule a další exponované části s malým poloměrem. Vznik námrazy byl velmi rychlý, převážně do několika minut po vzletu. Teplota vrtulí mohla být v některých případech navýšena o teplotu prostředí, ve kterém byla multikoptéra převážena. Během dalších letů došlo k vyrovnání povrchové teploty listů s okolím. Pokud dosáhla teplota povrchu listů záporné hodnoty a byla dostatečná vlhkost prostředí, v krátkém horizontu vznikla námraza. V některých případech došlo k zničení celé konstrukce multikoptéry a ta již nebyla schopná dalšího provozu (*Nehoda č. 3*). V ostatních případech se jednalo pouze o poškození, bez vážnějších následků. Z uvedených případů vyplývá, že pokud se v poslední fázi letu podařilo pád částečně zmírnit, nejednalo se o dovednosti pilota, ale spíše o štěstí. V budoucnu by tyto události mohly skončit poškozením multikoptéry a v horších případech ohrožením zdraví.

*„Z výše uvedených fotografií vyplývá jedna velice důležitá skutečnost, že námraza na vrtulích multikoptér vzniká prakticky na celém jejím povrchu – horním i spodním. Z dostupné literatury a na základě konzultací s odborníky, námraza vzniká pouze na náběžných hranách vrtulí, nikoliv po celém povrchu.“ [19]*

### 3. Technické opatření pro zamezení vzniku námrazy

Opatření proti vzniku námrazy zajišťuje ochranu významných ploch proti kumulaci ledových vrstev. Protinámrazové systémy jsou dnes významnou součástí výbavy malých nebo velkých letadel. Systémy se dělí na proaktivní a reaktivní a jsou označeny anglickými termíny **anti-icing** a **de-icing**.

Protinámrazové systémy neboli proaktivní systémy vzniku námrazy poskytují aktivní ochranu významných ploch před jejím vznikem. Jejich účelem je prevence a měly by být spuštěny bezprostředně po vstupu do námrazových podmínek.

Systémy odstraňující námrazu neboli reaktivní systémy jsou určeny k odstranění následků námrazy. Jedná se o druh protinámrazového opatření, který námrazu odstraní následně až po jejím vzniku. Reaktivní protinámrazové systémy bývají spouštěny v okamžiku zpozorování námrazy nebo později, což může způsobit v některých situacích problémy.

Pro běžně používaná komerční letadla existuje široká škála opatření, která jsou využívána k zamezení nebo minimalizaci vzniku námrazy. Často je na letadlech využívána právě kombinace několika druhů opatření, které mají proaktivní i reaktivní účinky.

Tyto druhy se dělí do tří základních kategorií v závislosti na principu funkce daného systému.

- Tepelné
- Mechanické-Pneumtické
- Chemické

#### 3.1 Tepelná ochrana

Tato kategorie odstraňuje vznikající námrazu prostřednictvím zahřívání povrchu na vysoké teploty. Zahřívání probíhá formou dodaného horkého vzduchu z motorů nebo elektrickým vyhříváním příslušných ploch.

##### Horký vzduch

Tento druh ochrany využívá horkého vzduchu přivedeného z pohonné jednotky na místa exponovaná námrazou, nejčastěji jsou to náběžné hrany křídel. Kapky, které dopadají na povrch jsou horkým vzduchem zahřívány, čímž je zajištěna eliminace vzniku námrazy a kumulace ledových vrstev. To vše závisí na intenzitě námrazy. Stlačený zahřátý vzduch je

dodáván z motorů a je veden potrubím do oblastí vyžadující protinámrazovou ochranu. Zahřívání ploch probíhá pomocí děrovaného potrubí nazvaného „Piccolo tube“ [22]. Teplý vzduch se z něho šíří tryskami a při kontaktu s chladným povrchem své teplo kondukcí předává chladnému povrchu. Chladnější vzduch je pak z křídla odváděn skrze dvojitou komoru výstupními ventily.

System odmrázování využívající horkého vzduchu je velmi efektivní a spolehlivý, má ovšem vysoké požadavky na odběr stlačeného zahřátého vzduchu. To způsobuje snížení efektivity výkonosti pohonné jednotky a dochází tím k nárůstu jeho spotřeby. Výsledkem je nižší dostupný tah a případná rezerva výkonu v případě potřeby. Použití horkého vzduchu limituje užití kompozitních materiálů v částech konstrukce, která přijde s horkým vzduchem do kontaktu. Tento druh ochrany proti námraze může sloužit jak k zamezení, tak k odstranění námrazy.

### **Využitelnost pro multikoptéry**

Vzhledem ke složitosti tohoto protinámrazového systému a převažující absenci použití spalovacích motorů u většiny druhů multikoptér je použití toho protinámrazového opatření pro provoz nevhodné.

### **Elektro-termická**

Elektro-termický protinámrazový systém využívá elektrický prvek k zamezení vzniku námrazy, nebo k jejímu odstranění. Konstrukce tohoto opatření může být provedena prostřednictvím integrace kondukčních vláken do potahu, použitím elektro-vodivých fólií, nebo skrze povrchovou aplikaci kovu

Z důvodu vysoké energetické náročnosti provozu ( $2,5 - 3 \text{ Watt/ cm}^2$ ) je použití této ochrany limitováno pouze na menší plochy nebo komponenty [22]. Nejčastěji se tak jedná o části, u kterých by jiné řešení bylo nevhodné. Nejčastější využití se nachází u termoelektrického vyhřívání čelních skel, náběžných hran křídel nebo vrtulí, rotorů multikoptér nebo pitotových trubic. Z důvodu vysoké energetické náročnosti systému během zahřívání rozsáhlejších ploch, jsou na vybrané povrchy aplikovány úzké pásy, které danou plochu permanentně zahřívají. Ostatní, méně významné části jsou zahřívány v cyklické periodě. Toto řešení snižuje energetickou zátěž celého systému.

System může být použit pro účely proaktivního opatření vůči námraze nebo k její odstranění jakmile se vytvoří. Standardně se systém uvádí do provozu, pokud mohou nastat námrazové podmínky a teplota okolního vzduchu klesne pod hodnotu  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  a nižší [22].

### **Využitelnost pro multikoptéry**

Využití elektrotermické ochrany pro minimalizaci vzniku námrazy multikoptéry by mohlo být vhodným řešením. Limitací použití mohou být příliš vysoké náklady a vysoká energetická náročnost tohoto systému. První omezení představuje především kapacita baterií, navzdory jejich značnému technologickému posunu je kapacita baterií poměrně nedostačená. Výdrž baterie omezuje operační dobu letu. Další limitací může být rentabilita vývoje tohoto opatření. Náklady na vývoj elektrotermické ochrany mohou být příliš vysoké a spotřebitelské chování nenasvědčuje přílišnému zájmu o takové to řešení. Vrtule jsou dnes považovány za druh spotřebního zboží a v případě jejich poškození se předpokládá okamžitá výměna za nový kus.

## **3.2 Pneumatická ochrana**

Pneumatická ochrana se řadí mezi reaktivní prvky, odstranění námrazy probíhá následně po jejím vzniku. Systém funguje na principu nafouknutí a vyfouknutím gumových trubic umístěných na náběžné hraně křídel za přívodu stlačeného vzduchu z pohonné jednotky, o tlaku 1,2 bar–1,37 bar (18–20 PSI) [22]. Následně vzniknou v námraze trhliny, což vede k rozpraskání. Následkem aerodynamických sil jsou úlomky popraskaného ledu unášeny z povrchu křídel pryč. Vytvořením podtlaku se trubice vrátí zpět do původní polohy. Pokud dojde k předčasnému nafouknutí námraza se může vytvořit v nafouknutém stavu a účinnost protinámrazového opatření je pak minimální.

Použití tohoto systému probíhá na velmi jednoduchém principu, a vyžaduje nízký výkon. Bohužel je systém poměrně náchylný k vnějšímu poškození a jeho odolnost klesá při nízkých teplotách (-15 °C), při kterých dochází k poklesu pružnosti gumy, což může způsobit její popraskání [22]. Opakujícím se nafouknutím poškozená trubice nevydrží a praskne. Při teplotách -40 °C dochází k permanentnímu poškození [22]. Vzhledem k těmto vlastnostem nejsou pneumatické trubice vhodné k použití na proudových nebo větších letadlech, současně s vysokou náročností na údržbu. Tento druh ochrany je nejčastěji používán u turbovrtulových a vrtulových letadel, která neoperují v tak náročných podmínkách. Nevýhody daného řešení jsou u těchto letadel minimální. Pneumatická ochrana je nejčastěji používána na náběžných hranách a jsou často kombinovány s ostatními protinámrazovými systémy.

### **Využitelnost pro multikoptéry**

Ačkoli pneumatický systém vyžaduje nízkou energetickou náročnost na provoz, není příliš vhodným řešením pro použití u multikoptér. Složité konstrukční nároky znemožňují jednoduchou a ekonomicky přívětivou implementaci na zařízení tohoto typu.

## 3.3 Chemická ochrana

### Protinámrazová kapalina

Chemická ochrana se aplikuje na zemi nebo za letu. Povrch exponovaných částí je pokryt protinámrazovou kapalinou na bázi ethylen glykolu nebo alkoholu, které snižují bod tání vody a zamezuje tak vzniku námrazy.

### Aplikace kapaliny na zemi

V okamžiku výskytu námrazy na významných částech letadla stojícího na zemi, dochází k jejímu odstranění protinámrazovou kapalinou. Námraza na významných částech jako jsou náběžné hrany může negativně ovlivnit aerodynamiku během vzletu a může vést k nehodám. K ošetření povrchu letadla se používá směs horké vody a ethylen glykolu, tato směs je dostupná a ekonomicky přijatelná. Aplikace a následná ochrana proti námraze je bohužel časově limitována klesá společně s dobou od poslední aplikace.

Nemrznoucí kapaliny jsou rozděleny do několika typů, lišící se především účinky a viskozitou. Kapalina typu I se používá především k odstranění námrazy, avšak poskytuje vůči ní zanedbatelnou ochranu. Pro zajištění ochrany letadel proti vzniku námrazy jsou používány kapaliny typu II a VII, které se liší dobou účinnosti. Tyto kapaliny obsahují látku na bázi polymerů, které zvyšují viskozitu roztoku. Kapalina s vyšší viskozitou může během vzletu snižovat účinek vztlačových sil, a proto je žádoucí se této kapaliny s narůstající rychlostí během vzletu zbavit. Hodnota rychlosti, při které dochází vlivem aerodynamických sil k odfouknutí veškeré kapaliny, je u typu II a IV kolem 100 uzlů [22]. Tato rychlost může být omezující pro méně výkonná letadla, která se na základě své nižší hmotnosti odpoutají od země mnohem dříve. Z tohoto důvodu byl zaveden nový typ kapaliny, která má podobné vlastnosti jako typ II, avšak nedosahuje takové viskozity. Tento typ je označen číslem III a zajišťuje odstranění kapaliny vlivem aerodynamického obtékání vzduchu i při nižších rychlostech.

### Aplikace kapaliny za letu

Odstraňování námrazy za letu chemickou kapalinou probíhá ostříkáním náběžných hran a jiných významných částí kapalinou na bázi glykolu, která snižuje bod tání vody a zabraňuje tím vzniku námrazy. Běžný systém se skládá z několika komponent, jejichž součástí je nádrž k uskladnění proti námrazové kapaliny, sací a tlakové filtry a skupina rozdělovacích jednotek řídící průtok hlavního čerpadla do koncových částí. Kapalina je přiváděna na povrch skrze porézní panely umístěné na náběžné hraně, které jsou vyrobené z nerezové oceli nebo s laserem děrovaného titanového plechu. [22]

System by měl být za letu aktivován nejpozději v okamžiku vstupu do námrazových podmínek. Pokud k námraze již dojde, k jejímu odstranění je třeba použít mnohem většího množství rozmrazovací kapaliny, které je na palubě omezené množství. Použití tohoto systému je limitováno především u velkých letadel. Vzhledem k ploše, kterou by bylo nutné proti námraze chránit, je hmotnost kapaliny vůči užitku velmi neúměrná. [22]

Tento typ protinámrazového opatření je konstrukčně jednoduchý a je postavený na dlouholetém prověřeném principu. Jeho výdrž je však ovlivněna množstvím dostupné protinámrazové kapaliny na palubě. System lze použít jako proaktivní a rovněž jako reaktivní, za cenu vyšší spotřeby nemrznoucí směsi. [22]

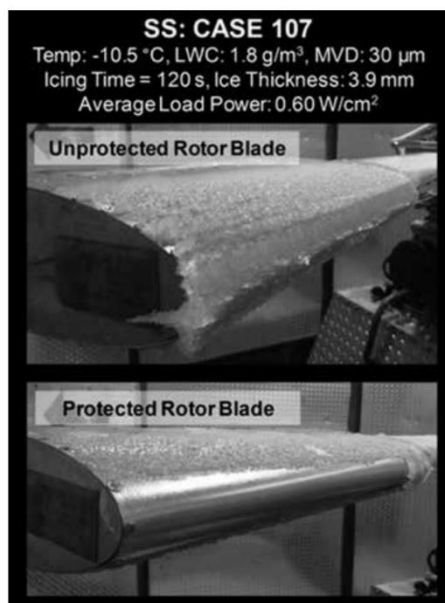
### **3.4 Studie zabývající se protinámrazovým opatřením**

Veškeré uvedené protinámrazová opatření jsou spíše aplikovatelná pro použití na letadlech nebo na helikoptérách. Převážná část dohledatelných zdrojů a odborné literatury pojednává o protinámrazových opatřeních určených právě letounům, zbylá část se zabývá problematikou námrazy na rotorech vrtulníků nebo větrných turbínách. Dostupnost studií a literatury zabývající se přímo námrazou bezpilotních letounů je v současné době velmi neuspokojivá. V rámci rešerše bylo nalezeno několik pramenů, které se problematikou protinámrazového opatření na bezpilotních letadlech zajímají. Bohužel se ve většině případů jedná o řešení pro bezpilotní letadla s pevnými křídly nebo pro větší zařízení, než jsou multikoptéry.

#### **Ultrazvukové odmrazování lopatek rotorových letadel.**

Studie ultrazvukového odmrazování byla provedena na Pensylvánské státní univerzitě, autory Austinem Overmeyerem, Josem Palaciosem a Edwardem Smithem. Využití ultrazvukového odmrazování je považováno jako možná alternativa k elektrotermickému ohřevu, který je nejčastěji používán právě u rotorových letadel. Technologie je implementována do náběžných hran rotorových listů. Měření bylo uskutečněno simulací námrazových podmínek ve speciální hermeticky uzavřené komoře s tryskami, zajišťující požadovanou vodnost prostředí (LWC). Teplota prostředí komory byla nastavena v závislosti na dílčích měřeních v rozmezí 0 °C až -20 °C. Testování probíhalo na modelu vrtule s ultrazvukovým protinámrazovým opatřením o průměru 3 m. Simulace tak mohla poskytnout věrohodný model se zatížením vzniklé námrazy odstředivými silami rotující vrtule. K odlamování ledu docházelo mechanickou vibrací vybuzenou ultrazvukovou jednotkou pracující v rozsahu 20 - 100kHz v závislosti na velikosti řídicí jednotky. Ultrazvuk svým působením snížil adhezní účinnost ledové vrstvy a došlo tak k jejímu odlomení. Během mechanické vibrace vyvolané ultrazvukovou jednotkou vzroste smykové napětí na povrchu o přibližně 15 %, což má pozitivní vliv na odstranění námrazy, jak lze vidět na *Obrázku 32*. Aerodynamické obtékání profilu není tímto opatřením narušeno.

Spotřeba energie ultrazvukového odmrazovacího systému je při teplotách od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  průměrně  $0,63\text{ W/cm}^2$  [23]. U konvenčního elektrotermického odmrazovacího systému je průměrná spotřeba mnohonásobně vyšší a dosahuje hodnoty  $4,18\text{ W/cm}^2$  [23]. Použití ultrazvukového odmrazování přináší značné množství výhod pro provoz menších zařízení, a to díky nižší energetické náročnosti a vyšší účinnosti. Toto protinámrazové opatření vyniká velice vysokou konstrukční složitostí oproti termoelektrickému ohřevu.



Obrázek 31 Rozdíl aplikace ultrasonických vibrací na odstranění námrazy [23]

### **Autonomní protinámrazové opatření pro malé bezpilotní letadla UA**

Návrhem protinámrazového detekčního algoritmu se zabýval autor studie Kim Lynge Sørensen z University of Science and Technology v Norsku. Možnosti využití detekčního algoritmu jsou zpracovány v jeho disertační práci nazvané Autonomní protinámrazové opatření pro bezpilotní letadla (Autonomous Icing Protection Solution for Small Unmanned Aircraft). Disertační práce se zabývá problematikou detekce námrazy na menších bezpilotních zařízeních s použitím vhodného softwarového opatření. Běžně používaná komerční letadla používají k detekci námrazy vizuální kontrolu nebo optické senzory. Takové řešení není pro použití na multikoptérách bohužel možné. Protinámrazové opatření pro bezpilotní letadla jsou zatím neprobádanou oblastí, a proto jsou veškerá navrhovaná opatření pouze ve fázi návrhů a experimentálního výzkumu. Studie používá dva odlišné přístupy k detekci námrazy využitím detekčních algoritmů. Oba způsoby jsou schopné detekovat námrazu na náběžných hranách nepohyblivých nosných ploch bezpilotních letadel a nejsou proto vhodná k použití na multikoptérách.



První detekční algoritmu je schopný detekovat vznik námrazy na křídlech vyhodnocením aerodynamických dat. Algoritmus provádí výpočet na základě proměnných konstant vycházejících z naměřených aerodynamických číselných hodnot konkrétního modelu. Algoritmus detekuje narušení aerodynamického obtékání profilu prostřednictvím detekčních senzorů a odchylku od původních aerodynamických dat vyhodnotí jako námrazu. Navrhovaný algoritmus byl ověřen prostřednictvím numerických analýz.

Druhý detekční algoritmus využívá princip termoelektrické detekce. Algoritmus vyhodnocuje termodynamické změny na povrchu křídel prostřednictvím detekčního chybového rámce. Systém využívá teplotní čidla na povrchu křídel a každá nečekaná termodynamická změna je zaznamenána jako vznikající námrazu. Tento model byl rovněž ověřen simulací.

Závěr studie porovnává detekční algoritmus s konvenčním řešením v podobě fixního termoelektrického ohřevu. Použitím detekčního algoritmu může dojít ke snížení spotřeby energie až o 50 %. Pro bezpilotní letadla poháněná akumulátorem je tato úspora velmi významná. Nižší spotřeba je dosažena včasným spuštěním termického ohřevu v okamžiku potřeby, což eliminuje cyklický běh elektrotermického systému a zvýšenému odběru energie.

### **Systém odmrazování a ochrany proti námraze za letu UAV využitím karbonového nano-materiálu na křídlech**

Studie vedená Kimem Lynge Sørensenem z Norwegian University of Science and Technology se zabývá použitím karbonových nano-materiálů na náběžných hranách křídel. Studie zkoumá strukturální změny na obtékání profilu při vzniku námrazy na malých bezpilotních zařízeních s pevnými křídly. Studie byla provedena v laboratorních podmínkách při teplotách v rozmezí 25 °C až -25 °C [24]. Během měření bylo použito několik druhů elektricky vodivého nano-materiálu naneseném na povrch náběžné hrany (*Obrázek 32*) a řídicí prvek (mikrokontrolér), který zajišťoval termální kontrolu teploty povrchu. Mikrokontrolér řídí dodávku proudu na základě zpětné vazby od termočlánků a senzorů vlhkosti. Z těchto dat následně vyhodnocuje a řídí dodávku tepelné energie, která je emitována karbonovým povlakem.

Provedené experimenty prokázaly, že použití nano karbonového povlaku má příznivý dopad na tepelnou regulaci v oblasti jeho použití. Systém se vyznačuje velice rovnoměrnou distribucí tepla napříč celým povlakem a v případě vzniku námrazy je schopen dočasně zvýšit jeho teplotu. Karbonový povlak se vyznačuje nízkým vnitřním odporem, což má pozitivní vliv na spotřebu energie u zařízení, které využívají energii z akumulátorů. Konstrukční řešení bohužel neumožňuje toto opatření aplikovat na multikoptéry.



Obrázek 32 Použití nanomateriálu na náběžné hraně křídla [24]

### 3.5 Návrh protinámrazového opatření

Teoretické poznatky protinámrazového opatření vycházejících z odborné literatury a dostupných studií ukázaly, že jediné použitelné protinámrazové řešení je v současné době použití protinámrazové kapaliny. Ostatní opatření jsou konstrukčně příliš složitá nebo velmi energeticky náročná. Test použití protinámrazové kapaliny ve skutečných námrazových podmínkách byl proveden v kapitole *Analýza nehod multikoptér způsobených námrazou* [21]. K prověření tohoto protinámrazového opatření byl test zopakován na modelu kvadroptéry DJI Phantom 4 umístěném na navrženém měřicím stojanu.

#### Teoretické posouzení daného opatření

Na základě znalostí vycházejících z kapitoly 3.3 – *Chemické protinámrazového opatření* lze konstatovat, že při použití protinámrazových kapalin rozlišujeme jejich viskozitu určené vzletovými rychlostmi. Během letu je pak žádoucí, aby kapalina byla z povrchu odstraněna, jinak dochází k narušení laminárního proudění podél profilu. Z toho důvodu u těchto kapalin rozlišujeme kategorie viskozity určené vzletovými rychlostmi. Z důvodu vysoké rychlosti obtékání v koncových částech vrtule nemusí být viskozita kapalina dostatečná. Z fyzikálních principů je rovněž velice pravděpodobné, že důsledkem odstředivých sil způsobených rotací se kapalina z povrchu rozptýlí do okolí. V takovém případě bude její účinnost během letu nulová.

#### Testování chemické ochrany vrtulí

K testování byla použita běžně dostupná protinámrazová kapalina, která nepodléhá žádným legislativním požadavkům ohledně používání a manipulace. K testování byl využit skutečný model multikoptéry DJI Phantom IV, který byl upevněn na měřicím stojanu.

## Příprava testu

Před započítím testu bylo nutné zajistit ochranu citlivých elektronických částí multikoptéry před vniknutím protinámrazové kapaliny, jak lze vidět na *Obrázku 34a*. Toto opatření splnilo svůj účel během nanášení kapaliny, později již nebylo potřebné. Měření povrchové teploty vrtule bylo realizováno použitím infračerveného teploměru, který je blíže popsán v následujících kapitolách.

## Průběh testu

Test byl rozdělen do tří intervalů určených ke kontrole zbylé kapaliny na povrchu listů. Po zastavení byl zkoumán aktuální stav protinámrazové kapaliny na povrchu a byla měřena povrchová teplota. Časové intervaly měření byly nastaveny na hodnotu 60 sekund, 30 sekund a 10 sekund. Před spuštěním byla na povrch nanesena protinámrazová kapalina, jak lze vidět na *Obrázku 34a*. V okamžiku roztočení vrtule byla kapalina během okamžiku odmrštěna odstředivou silou do okolí a při následné kontrole po ni nezůstaly žádné stopy, jak lze vidět na *Obrázku 34b*.



Obrázek 34a Testování protinámrazové kapaliny na vrtulích – před testem



Obrázek 34b Testování protinámrazové kapaliny na vrtulích – po testu

## Výsledky testu

Měření bylo zjištěno, že kapalina na povrchu stojící vrtule působí jako dočasné protinámrazové řešení. Povrchová teplota s protinámrazovou kapalinou byla na ošetřené vrtuli před započítím měření o 2 °C vyšší, než na vrtulích ostatních. Stav kapaliny byl během měření

kontrolován v předem nastavených časových intervalech. Výsledek měření určil, že ani při nejnižším časovém intervalu nezůstala protinámrazová kapalina na povrchu listu. Kapalina byla ihned po spuštění rozptýlena do okolí vlivem vysoké obvodové rychlosti vrtule. Výsledky měření všech intervalů neukázaly zásadní teplotní rozdíl konkrétních vrtulí ihned zastavení vrtulí. Protinámrazová kapalina byla na povrchu listu účinná během její přítomnosti na povrchu listu, později působením odstředivých sil je její účinnost zanedbatelná. Test byl proveden při teplotě vzduchu 0 °C.

### **Spojitosť s nezávislým testem**

Na základě nezávislého testu byla v rámci pokusu zkoumána možnost použití protinámrazové kapaliny během letu. Tento test je podrobněji popsán v Kapitole 2.3. Námrazový test byl proveden během mlhy při teplotě -2 °C [21]. Operátor ošetřil vrtule protinámrazovým přípravkem a vzletl. Let trval déle ve srovnání s předchozích podmínkách, avšak námraza na vrtulích přesto vznikla, jak je vidět na *Obrázku 35*. V závěru bylo konstatováno, že lze ošetřením vrtule prodloužit dobu letu, ale námraze zabránit nelze.



Obrázek 35 Námrazový test na multikoptéře

### **Zhodnocení možných protinámrazových opatření**

Dostupné protinámrazové prostředky prezentované v této diplomové práci v současné chvíli nenabízí vhodné řešení k zajištění protinámrazové ochrany multikoptér. Elektro-termické protinámrazové opatření je z konstrukčního hlediska velmi komplikované a jeho integrace do listu vrtule může být velmi složitá. Většina vrtulí je dnes vyráběna z levnějších materiálů jako je plast nebo kompozit. Tepelné vlastnosti těchto materiálů nemusí splňovat požadavky na vyšší teplotu v případě jejich zahřátí. Současně má toto opatření značný vliv na výdrž baterie, která ovlivňuje v případě multikoptér především dolet.

Použití chemické ochrany na vrtulích multikoptér se na základě provedeného testu jeví jako nevhodné řešení. Chemické námrazové opatření má pouze preventivní účinek před letem, během letu by měl být její nános odstraněn. Jak se ukázalo během testování, kapalina na vrtuli nevydrží a je rozptýlena do okolí a tím její účinek vymizí.

Na trhu je v dnešní době široká paleta protinámrazových opatření, ve většině případů však nejsou určeny pro použití na multikoptérech. Bohužel ani jedno nabízené řešení nespĺnilo očekávání z důvodu vysoké konstrukční náročnosti, vysokým provozním nákladům a případnou nízkou poptávkou po takovém řešení. Ukazuje se, že vhodné řešení by v budoucnu mohl nabídnout vývoj softwarové řešení, použití nanomateriálů nebo využití ultrasonického odmrazování.

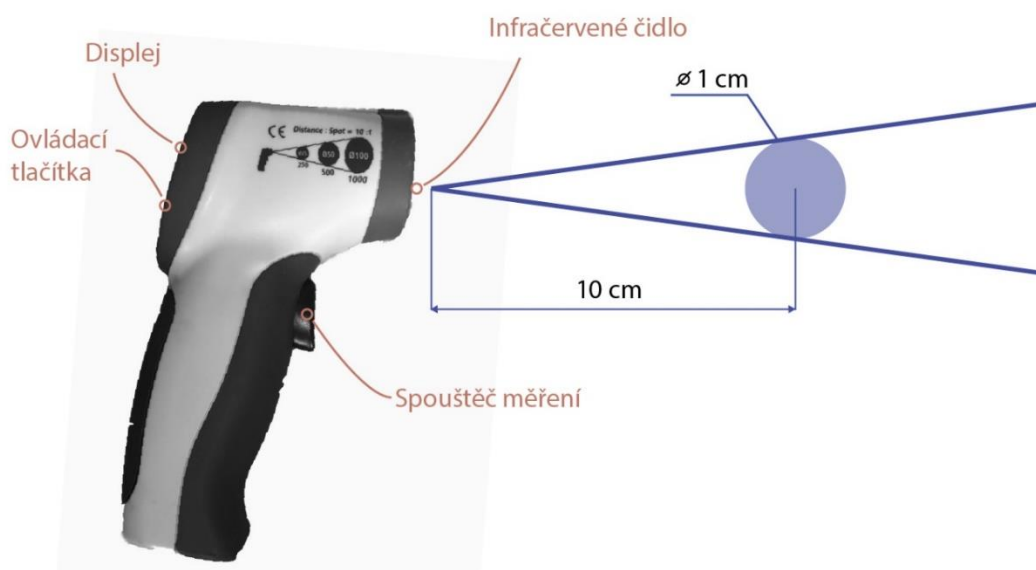
## 4. Metodika měření adiabatického ochlazování

Tato kapitola popisuje návrh experimentu, jeho provedení a následné vyhodnocení naměřených dat. Experiment byl proveden na základě předem stanovených postupů měření. Měření má za úkol určit hodnotu změny povrchové teploty vrtule v rámci adiabatického děje a simulovat tím podmínky vzniku námrazy. Na základě požadavků na diplomovou práci byly provedeny dvě fáze měření uskutečněné v reálných podmínkách. První fáze byla provedena na sestaveném měřícím zařízení a druhá na skutečném modelu kvadrokoptéry.

### 4.1 Komponenty použité k měření

#### Infračervený teploměr

Infračervený teploměr je určený k bezdotykovému měření teploty různých povrchům na základě vyzařovaného infračerveného spektra měřeného objektu. Jedná se o teploměr typu IR 550-10S vyrobený firmou Voltcraft a zapůjčený ČVUT Fakultou dopravní v Praze. Odborně se tento přístroj nazývá pyrometr. Přesnější přístroj pro tento typ měření není na trhu dostupný. Senzor detekuje emitované (odražené) a propuštěné záření daného objektu. Teploměr tuto informaci vyhodnotí a zobrazí příslušnou teplotu na displeji přístroje. Na přesnost má vliv nastavení emisivity v závislosti na druhu měřeného materiálu. Emisivita je proměnná, která popisuje schopnost materiálu pohlcovat záření. Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré záření a má hodnotu emisivity jedna ( $\epsilon = 1$ ). U běžných předmětů klesá emisivita k nižším hodnotám. Emisivita plastové vrtule byla během měření nastavena na hodnotu  $\epsilon = 94$ , jedná se však o bezrozměrnou veličinu. Přístroj vykazuje při teplotách v rozmezí 0 °C až 260 °C nepřesnost  $\pm 2$  °C. Měření teploty povrchu infračerveným teploměrem musí probíhat v poměrné vzdálenosti od měřeného objektu a v příslušné ohniskové vzdálenosti. Ohnisková vzdálenost infračerveného čidla je nastavena výrobcem na hodnotu 10:1, což znázorňuje vzdálenost plochy od měřeného objektu ve vzdálenosti 10 cm od snímané oblasti o průměru 1 cm, jak je zřetelné na *Obrázku 36*. Pro potřeby pokusu a zohlednění velikosti vrtule byla tato vzdálenost zcela dostačující.



Obrázek 36 Schéma funkce pyrometru [vlastní]

### Teploměr/vlhkoměr

K měření teploty a vlhkosti byl během pokusu použit Xiaomi Thermostat Temperature Humidity Monitor, který dokáže změřit teplotu s přesností na 0,1 °C a vlhkost s přesností na 0,1 %. Teploměr disponuje technologií Bluetooth a může být připojen chytrému telefonu, kde lze sledovat grafy naměřených údajů.



Obrázek 37 Teploměr/vlhkoměr [vlastní]

### Měřicí stojan

Stojan je vyroben z tažné ocele hlazenky o průměru 14 mm. Hlavní tyč je vysoká 1,5 m a je svařena s kratší částí, která slouží ke zvýšení stability celého stojanu. Na vrcholu je přivařena kovová konzole, která tvoří základ uchycení překližek a elektromotoru. Měřicí stojan byl později doplněn o nastavbu typu H, která zajistila bezpečné uchycení multikoptéry v rámci doplňkového měření. Úprava je blíže popsána v podkapitole Měření č.2.



Obrázek 38 Holá konstrukce stojanu [vlastní]

### Nabíjecí stanice

Obsluha nabíjení baterií je vcelku snadnou záležitostí. Je důležité znát správné hodnoty které vyžaduje použitá baterie a tyto hodnoty navolit pomocí ovládacích prvků, tlačítek „+“ a „-“. Tlačítko Start slouží k potvrzení zadaný hodnot a tlačítko Batt. type slouží k selekci typu použité baterie nebo jako tlačítko pro návrat. Nabíjení probíhalo v režimu LIPO-3S při proudu 12V. Doba nabíjení se pohybovala od 20 do 30 minut.



Obrázek 39 Nabíjecí stanice [vlastní]



## Baterie

Během pokusu byly použité dvě baterie od firmy Gravityhobby.com. Každá baterie má celkovou kapacitu 2500 mAh při maximálním napětí 11.1 V. Maximální kapacita byla během pokusu využívána přibližně kolem 70 % s ohledem na životnost baterie. Jedná se o tří článkovou baterii.



Obrázek 40 Baterie Gravity 2500 mAh [vlastní]

## Pohonná jednotka

Jedná se o bezkomutátorový elektromotor značky CEMECH. Motor je přichycený přes dřevěné překližky na konzoly šrouby.



Obrázek 41 Pohonná jednotka umístěna na konzoly [vlastní]

## Regulátor

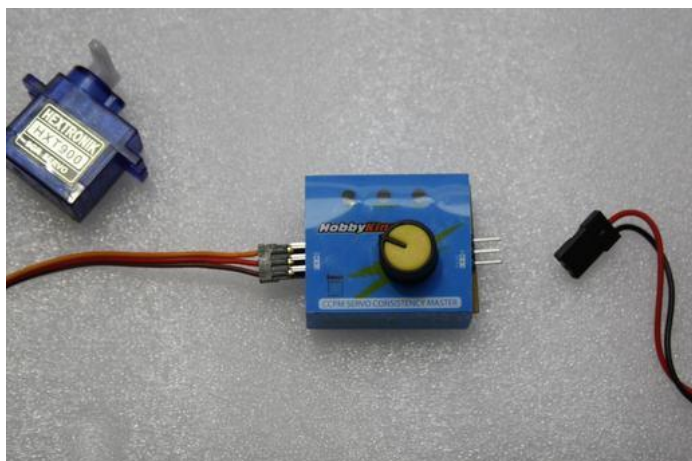
Regulátor zajišťuje dodávku stejnosměrného proudu z baterie do motoru. Výrobce regulátoru je firma Jeti, jedná se o typ Advance 40 plus, který nabízí tepelnou ochranu, ochranu proti přílišnému vybití (PCO), která zajišťuje vypnutí při sníženém odběru proudu a proudové omezení.



Obrázek 42 Regulátor od firmy JETI [vlastní]

## Servotester

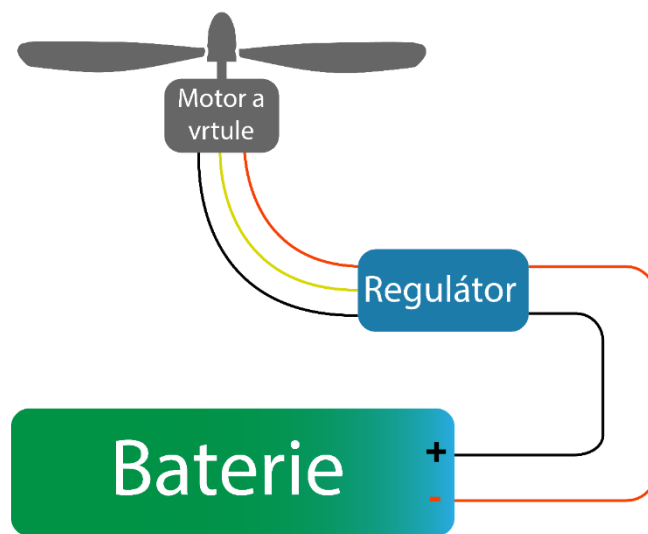
Servotester je součástka, která generuje řídicí signály podle polohy potenciometru. Řídicí signály dále putují do regulátoru, který řídí počet otáček na základě řídicího signálu. Servotester je zobrazen na *Obrázku 43*.



Obrázek 43 Servotester [33]

## Schéma zapojení

Funkčnost celé měřicí soustavy vyžaduje propojení jednotlivých komponent k baterii. Baterie byla připojena prostřednictvím dvou kabelů (+) a červený (-) k regulátoru. Pomocí trojice kabelů se připojí regulátor k elektromotoru. Záměna krajních (napájecích) kabelů způsobí opačný smysl otáčení elektromotoru. Schéma zapojení je na *Obrázku 44*.



Obrázek 44 Schéma zapojení komponentů <sup>[vlastní]</sup>

#### **Bezpilotní systém DJI Phantom IV**

Doplňkového měření bylo provedeno na modelu kvadrokotéry DJI Phantom IV zapůjčené ČVUT Dopravní. Kvadrokoptéra je vyrobeno z hořčíkové slitiny a její váha dosahuje 1380 g. Maximální dostup je udáván výrobcem na 6000 m, avšak tato hodnota nebyla v rámci měření důležitá, jelikož byla kvadrokoptéra usazena na měřícím stojanu. Pro účely skutečného letu může dosažení této výšky znamenat vysoké riziko vzniku námrazy.

## 4.2 Protokol pro záznam měření

Data měření v praktické části diplomové práce byly zaznamenávány do předem připraveného formuláře, který lze vidět na *Obrázku 45*. V protokolu bylo nutné uvést časové údaje, stav počasí, všechny naměřené teploty a vlhkost vzduchu. Formulář poskytuje dále informaci o stavu počasí, které bylo během měření (slunečno, déšť, noc). V rámci jednoho měření lze do formuláře v případě potřeby zaznamenat dva pokusy.

### Postup vyplnění protokolu

#### Číslo pokusu

Pořadové číslo probíhajícího pokusu. Pokus je vyjádřen celočíselnou hodnotou.

#### Datum

Aktuální datum odpovídající dnu měření daného pokusu. Datum je zapsáno ve formátu [DD.MM.RRRR]

#### Vypracoval

Osoba, která je zodpovědná za naměřená data a zápis do formuláře.

VZOR

Pokus č. : 1 / 2 Datum pokusu: 15.3.2020 Vypracoval: Martin Luner

Podpis: \_\_\_\_\_

1 Počasí:

Poznámka: 1. Počáteční mrholení přešlo v déšť se sněhem.  
2. Pokus byl po 10 minutách přerušeny, protože se projevil vysoké vibrace pohonné jednotky.  
3. Po zastavení pohonné jednotky byla na listech vrtule námraza, tloušťka přibližně 2 mm.

2 Teplota vzduchu	4 °C <small>Před spuštěním</small>	3 °C = -1 °C <small>Ukončení Rozdíl teplot</small>	4 °C	5 °C = +1 °C <small>Před spuštěním Ukončení Rozdíl teplot</small>
3 Teplota vrtule	3 °C <small>Před spuštěním</small> Námraza: <input checked="" type="checkbox"/>	1 °C = -2 °C <small>Ukončení Rozdíl teplot</small> Druh: Ledovka	4,5 °C <small>Před spuštěním</small> Námraza: <input type="checkbox"/>	2 °C = -2,5 °C <small>Ukončení Rozdíl teplot</small> Druh:
4 Čas	7:20 <small>Začátek měření</small>	7:30 = 00:10 <small>Konec měření Doba celkem</small>	7:40 <small>Začátek měření</small>	7:48 = 00:8 <small>Konec měření Doba celkem</small>

Obrázek 45 Vzor protokolu měření [vlastní]

#### Poznámka

Pole zaznamenává ostatní informace nebo poznatky, které nastaly během měření a nemohly být nikde zaznamenány

#### Pole číslo 1 - Počasí

Veškeré meteorologické jevy, související s prováděným pokusem.

### *Zaznamenání rázu počasí*

Aktuální stav počasí v dané lokalitě odpovídající identickému stavu vyobrazeném na ilustrovanému obrázku.

### *Vlhkost*

Aktuální naměřená relativní vlhkost vzduchu v dané lokalitě a v příslušné časové ose udávaná v procentech.

### *Teplota rosného bodu*

Zaznamenání teploty rosného bodu v dané lokalitě. Lze určit výpočtem podle vzorce, pomocí tabulek nebo výpočtem online.

## **Pole číslo 2 – Teplota vzduchu**

Naměřená hodnota teploty okolního vzduchu ve stupních Celsia.

### *Před spuštěním*

Aktuální teplota vzduchu okolí ve stupních Celsia, která byla naměřena v době před roztočením vrtule.

### *Ukončení*

Aktuální teplota vzduchu okolí ve stupních Celsia, která byla naměřena v době, kdy byl pokus ukončen a vrtule již nekonala žádný pohyb.

### *Rozdíl teplot*

Výslednice rozdílu hodnot okolní teploty v době ukončení a před spuštěním.

## **Pole číslo 3 – Teplota vrtule**

Naměřená hodnota teploty povrchu vrtule ve stupních Celsia.

### *Před spuštěním*

Teplota povrchu vrtule ve stupních Celsia, která byla naměřena v okamžiku předcházející roztočení vrtule.

### *Ukončení*

Teplota povrchu vrtule ve stupních Celsia, která byla naměřena v době, kdy byl pokus ukončen a vrtule již nekoná žádný pohyb.

### *Rozdíl teplot*

Výslednice rozdílu hodnot okolní teploty v době ukončení a před spuštěním.

## **Pole číslo 4 – Časové údaje**

Časové údaje vyjadřující celkovou dobu měření ve formátu [hh:mm].

#### *Začátek měření*

Fáze měření definovaná jako předcházející okamžik začátku pokusu před uvedením vrtule do pohybu.

#### *Konec měření*

Fáze měření, kdy byl pokus ukončen a vrtule již nekoná žádný pohyb.

#### *Celková doba měření*

Rozdíl mezi hodnotami *konce* a *začátku měření*.

### **4.3 Měření č. 1**

Měření probíhalo na základě stanovených parametrů využitím navrženého měřícího zařízení skládající se z ocelového stojanu, elektromotoru a vrtule. Měření probíhalo ve venkovních podmínkách za nízkých teplot a v prostředí s poměrnou vlhkostí. Podmínky měření jsou podrobněji popsány níže.

#### **Návrh zařízení**

K získání experimentálních dat v první fázi měření bylo nutné sestavit zařízení, skládající se z několika základních komponent. Návrh zařízení byl nakreslen v programu AutoCAD a následně byl model zrealizován. Zásadním prvkem měřící soustavy byl kovový měřicí stojan, na kterém byl umístěn elektromotor CEMECH s plastovou vrtulí. Výška stojanu byla stanovena na hodnotu 120 cm, což snížilo vliv zemského povrchu na měření teploty během provedených experimentů. Všechny komponenty byly podrobněji popsány v předchozí části textu v *kapitole 4.1*.

#### **Podmínky měření**

Pro účely měření byla stanovena teplota vzduchu 10 °C a nižší a vysoká relativní vlhkost vzduchu. Během měření bylo nutné zajistit odpovídající meteorologické podmínky, ke splnění požadavku vyplývajícího ze samotného zadání. Vhodné podmínky byly zajištěny sledováním předpovědi počasí a volbou vhodné příležitosti k uskutečnění měření.

#### **Návrh metodiky**

Experiment byl prováděn simulací letových podmínek, které působí na multikoptéru během letu a s ohledem na aktuální stav počasí. Aktuální stav meteorologických podmínek byl zaznamenán do připraveného protokolu.

## Úkol

Stanovte rozdíl teploty povrchu vrtule před začátkem měření a po zastavení na měřícím zařízení. Vyhodnoťte vzniklou námrazu.

### Způsob měření:

Měření předcházelo dobití baterií do plné kapacity. Měřící stojan byl usazen do pevné zeminy s kontrolu jeho stability. Do protokolu byly zaznamenány aktuální meteorologické údaje, teplota vzduchu a příslušná vlhkost. Před započítáním samotného měření, bylo třeba provést kontrolu servotesteru. Jeho poloha musela odpovídat nulové hodnotě, jinak by mohlo dojít k nekontrolovanému roztočení vrtule okamžitě po při pojení akumulátoru k elektromotru.

Příprava měření započala vložením baterie do úchytných pásků a přichycením baterie k měřicímu stojanu. Regulátor byl žilkovým kabelem spojen se servotesterem a pomocí trojkabelu připojen k elektromotoru. V posledním kroku přípravy bylo nutné připojit baterii k regulátoru pomocí dvou kabelů shodnou barvou. V případě správného zapojení zazněl akustický signál v podobě tří krátkých tónů a došlo k rozsvícení trojice modrých kontrolky.

V dalším kroku bylo nutné zaznamenat teplotu povrchu vrtule a čas zahájení měření. Následně mohla být vrtule uvedena do chodu otočením potenciometru na hodnotu 75 % maximální hodnoty. Toto opatření vedlo ke snížení zátěže akumulátorů a prodloužila se tak doba měření. Doba měření se pohybovala v délce 5 až 10 minut určené na základě aktuálního stavu kapacity baterie a okolních meteorologických podmínek. V průběhu měření byla měřící soustava nepřetržitě kontrolována, aby nedošlo k neočekávanému chování vlivem vzniklé námrazy.

Po uběhnutí požadované doby měření byla vrtule pozvolna zastavena otočením potenciometru na nulovou hodnotu. Ihned po zastavení byla pyrometrem provedena kontrola teploty povrchu a současně byl zaznamenán čas ukončení měření. Následně bylo třeba odpojit akumulátor od měřící soustavy, aby nemohlo dojít k jeho úplnému vybití. Veškeré úkony související s měřením byly zaznamenány do připraveného protokolu včetně dalších údajů a byla provedena kontrola správnosti všech údajů. Doba nabíjení baterie v nabíjecí stanici se pohybovala v rozmezí 20 až 30 minut. Poté se mohlo měření znovu opakovat.

### Cíl

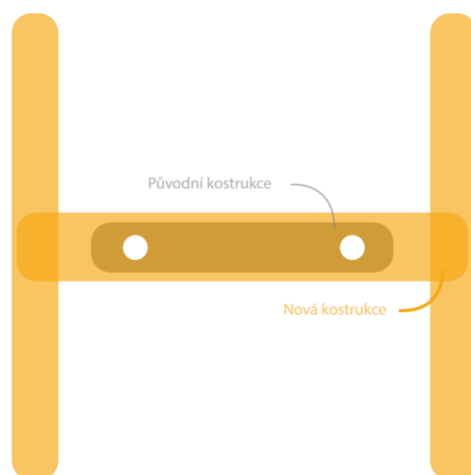
Cílem měření bylo zjistit rozdíl mezi povrchovou teplotou vrtule před roztočením a po jejím zastavení na modelu navržené měřící soustavy s vrtulí a elektromotorem. Současně byl zkoumán vznik námrazy na vrtuli a projev adiabatické ochlazování.

## 4.4 Měření č. 2

Na základě dodatečných požadavků diplomové práce bylo provedeno měření č. 2 na skutečném modelu multikoptéry od firmy DJI. Požadavky na splnění meteorologických podmínek byly zredukovány na dodržení teploty vzduchu kolem 0 °C a měření při velmi vysoké vlhkosti vzduchu.

### Návrh zařízení

K získání experimentálních dat v rámci druhé fáze měření bylo požadováno doměření na modelu skutečné multikoptéry. Pro rozdílný typ měření bylo nutné již navržený stojan upravit o rozšířenou konzoli uzpůsobenou k uchycení zařízení a také k zajištění bezpečného upevnění na stojanu. Pro tyto účely byla zkonstruována konzole ve tvaru H, kterou můžeme vidět na *Obrázku 46*.



Obrázek 46 Návrh upravené konzole

### Podmínky měření

Meteorologické podmínky tohoto měření byly stanoveny následovně. Teplota okolního vzduchu musela být 3 °C a nižší, relativní vlhkost nad 80 %. Během měření bylo nutné předvídat meteorologickou situaci, která musela splňovat přísnější kritéria zadání, než tomu bylo u předchozích pokusů.

### Návrh metodiky

V rámci měření v druhé fázi byl prostřednictvím modelu kvadroptéry DJI Phantom IV simulován let v námrazových podmínkách. Použitím plnohodnotného modelu bylo možné provést přesnější simulaci letu v odpovídajících podmínkách a dosáhnout tím přesnějších výsledků.



## Úkol

Stanovte rozdíl teploty povrchu vrtule před měřením a po jejím zastavení na modelu kvadrokoptéry. Ověřte vliv adiabatického děje na ochlazování vrtule. Vyhodnoťte vzniklou námrazu.

### Způsob měření:

Měření probíhalo za obdobných podmínek jako v předchozí fázi. Důležitým požadavkem pro začátek měření bylo plné nabití akumulátoru, které trvalo zpravidla v rozmezí 30 až 45 minut. V počátku měření byl stojan umístěn do pevné zeminy a byl proveden test jeho stability. Pokud by tento úkon nebyl proveden a v průběhu měření by nebyla stabilita dostatečná mohlo by dojít k pádu a zničení celého zařízení. Kvadrokoptéra DJI byla usazena na konzolu typu H a byla připevněna plastovými pásky. Dodatečně byly nohy zafixovány suchými zipy, což lze vidět na *Obrázku 47*. Před započítím měření bylo nutné ověřit přesnost infračerveného teploměru kalibrací s naměřenou teplotou elektronického teploměru. Veškeré meteorologické údaje byly zaznamenány do protokolu a následně byl zapnut dálkový ovladač. Do zařízení byla vložena baterie a kvadrokoptéra mohla být spuštěna. Provedené měření byly oproti předpokladu redukovány na kratší časové intervaly z důvodu vysoké hlukové zátěže v okolní zástavbě. Během měření bylo nutné kontrolovat stav baterie prostřednictvím čtveřice diod indikující hodnotu nabití zařízení. Výsledná povrchová teplota byla odečtena pyrometrem následně po zastavení všech vrtulí. Měření povrchové teploty probíhalo vždy pouze na jedné vrtuli, aby se předešlo zkreslení naměřených hodnot odlišnou teplotou konkrétních vrtulí. Do protokolu byly zaznamenány veškeré změny okolní teploty nebo vlhkosti. Po skončení měření bylo nutné vyjmout baterii a uchovat ji v teple.



Obrázek 47 Upravený stojan měření

## **Cíl**

Cílem měření bylo určit rozdíl mezi povrchovými teplotami vrtule před roztočením vrtule a po zastavení na modelu kvadrokoptéry DJI. Souběžně byl během měření zkoumán projev adiabatického ochlazování a případný vznik námrazy.

## 5. Výsledky měření

Úkolem této kapitoly je seznámit čtenáře s dosaženými výsledky na základě provedených měření. Ukázka naměřených hodnot je zobrazena v *Tabulce 12*. Všechny naměřené číselné hodnoty jsou obsahem *příloh 1, příloh 2 a přílohy 3*.

Tabulka 12 Ukázka naměřených hodnot

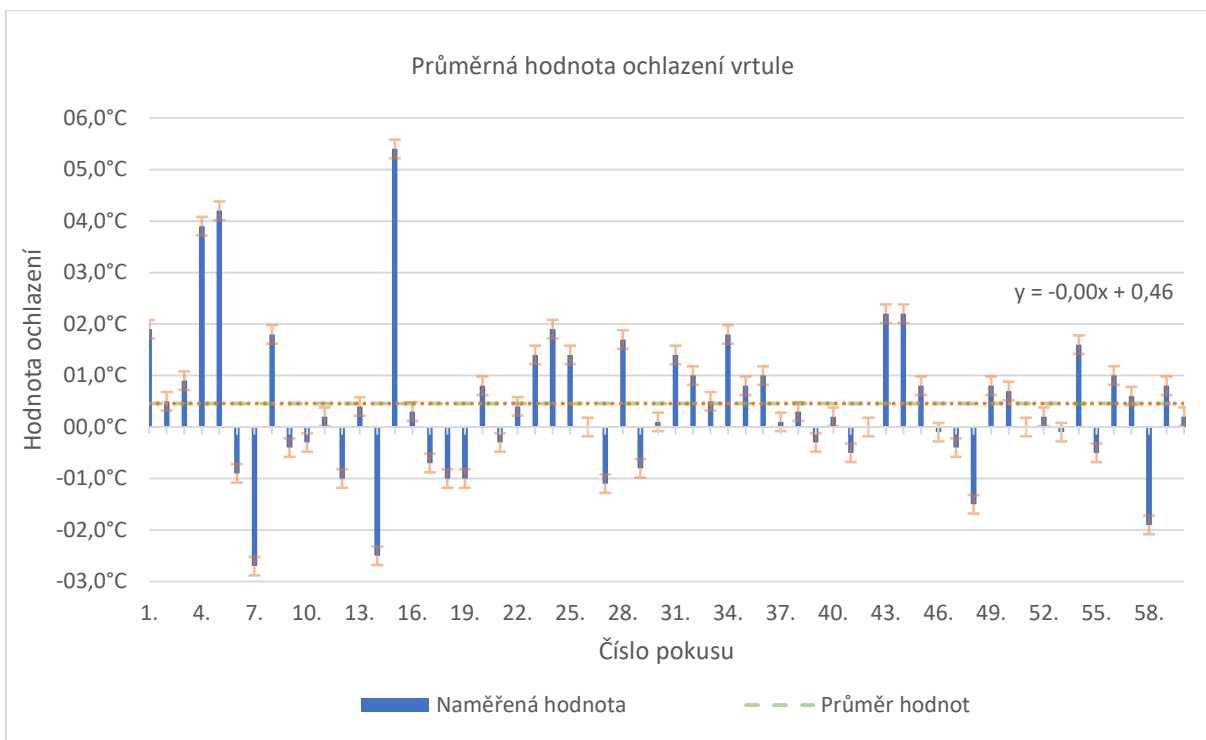
	Okolní teplota			Teplota vrtule			Čas			Vlhkost	Rosný bod
	Začátek	Ukončení	Rozdíl	Začátek	Ukončení	Rozdíl	Zahájení	Ukončení	Celkový čas [min]		
24.11.2020	-01,0°C	-01,0°C	00,0°C	-01,0°C	-01,3°C	00,3°C	7:27:00	7:37:00	10:00	95%	-01,7°C
24.11.2020	01,0°C	01,0°C	00,0°C	01,9°C	01,5°C	00,4°C	13:31:00	13:39:00	08:00	84%	-01,4°C
24.11.2020	00,8°C	00,8°C	00,0°C	00,8°C	00,4°C	00,4°C	16:26:00	16:31:00	05:00	85%	-01,4°C
24.11.2020	01,0°C	01,0°C	00,0°C	01,2°C	01,1°C	00,1°C	16:36:00	16:41:00	05:00	80%	-02,1°C
26.11.2020	-01,2°C	-01,2°C	00,0°C	-01,0°C	-01,8°C	00,8°C	7:27:00	7:32:00	05:00	88%	-02,9°C
26.11.2020	-00,6°C	-00,6°C	00,0°C	-00,6°C	-00,7°C	00,1°C	13:02:00	13:09:00	07:00	84%	-03,0°C
26.11.2020	00,0°C	-00,1°C	00,1°C	00,8°C	00,0°C	00,8°C	15:50:00	15:56:00	06:00	86%	-02,1°C

### Vyhodnocení měření

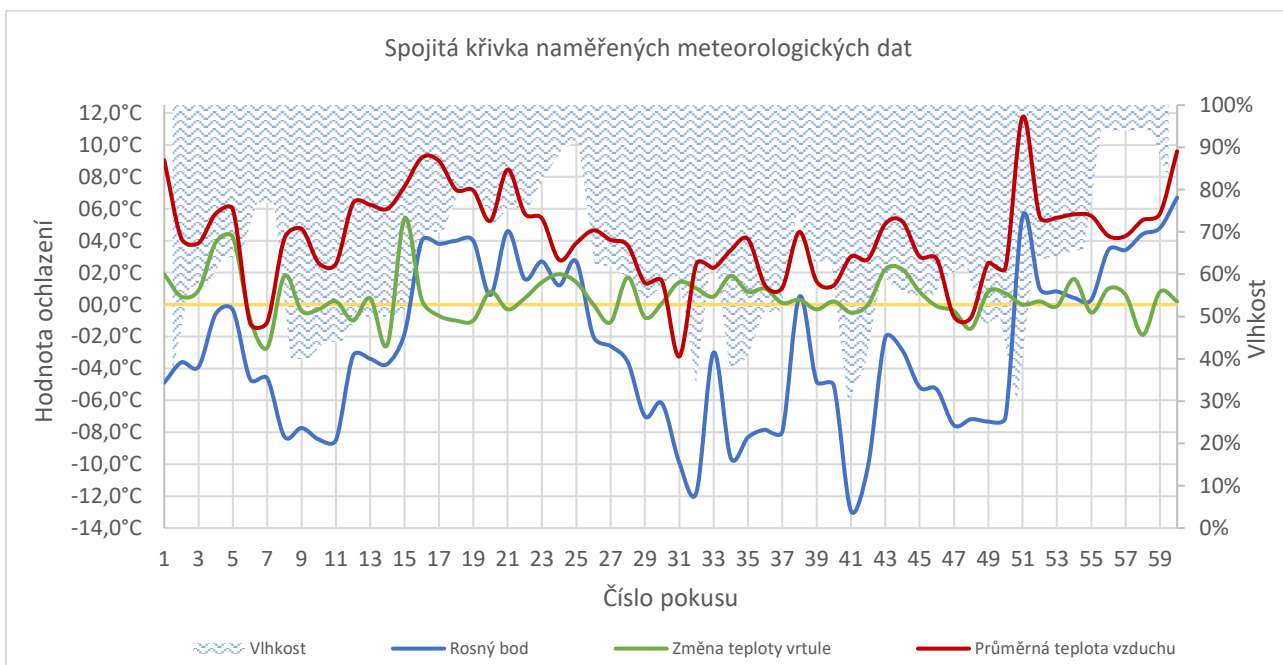
Vyhodnocení experimentu probíhalo formou odečtu z měřicího přístroje a zaznamenáním výsledků do připraveného formuláře. Následně byly data digitalizovány do tabulky v programu Microsoft Excel. Měření probíhalo ve venkovním prostředí za předem definovaných meteorologických podmínek. V prezentovaných výsledcích je možné vidět, že měření prokázalo trend ochlazování listů vrtule o hodnoty uvedené níže. V první fázi měření se projevilo ochlazení v 55 % případů a u druhého měření v 73 % všech měření.

### První fáze měření

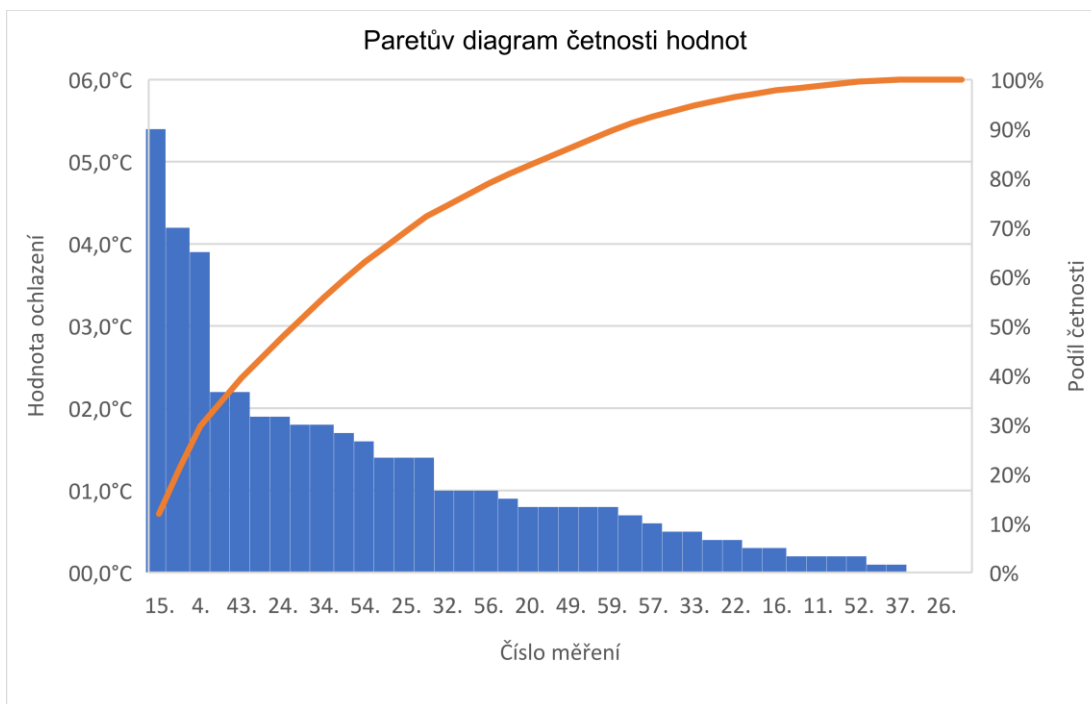
Opakovaným měřením, které čítalo **60 pokusů**, bylo zjištěno, že aritmetickým průměrem naměřených hodnot povrchové teploty listů vrtule bylo ochlazení  $\bar{t} = -0,46 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



Graf 1 Diskrétní vyjádření naměřených hodnot ochlazení s příslušnými odchylkami (měření č.1)



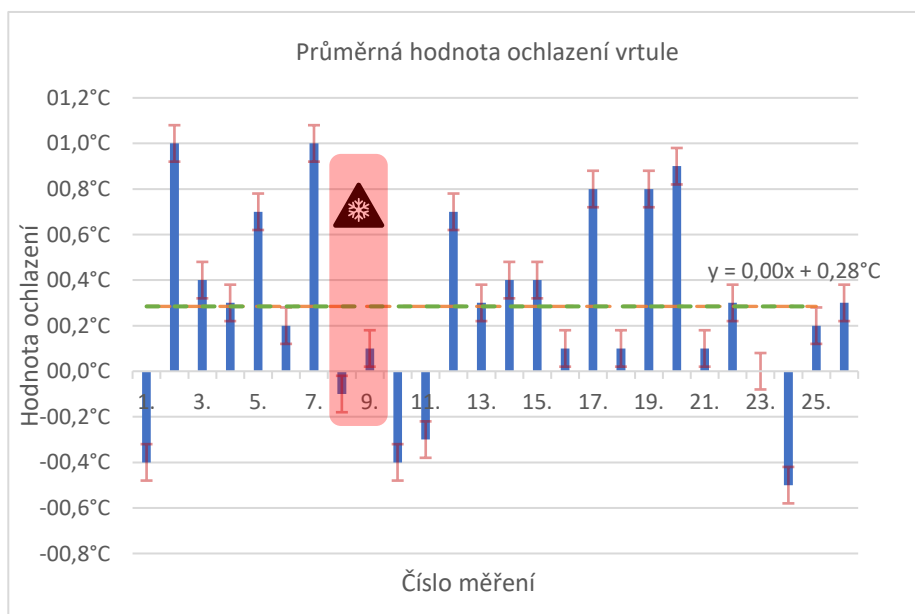
Graf 2 Spojitá křivka ze všech naměřených diskretních hodnot (měření č.1)



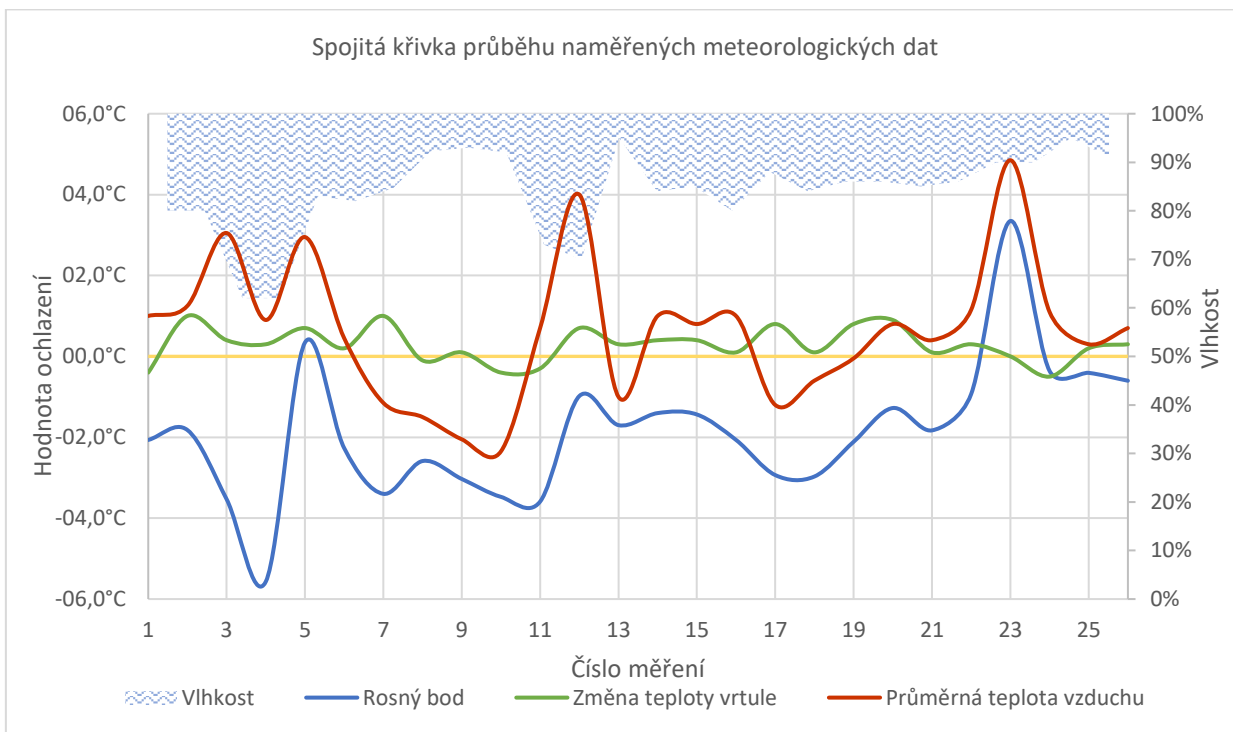
Graf 3 Paretův diagram četnosti hodnot měření (měření č.1)

### Druhá fáze měření

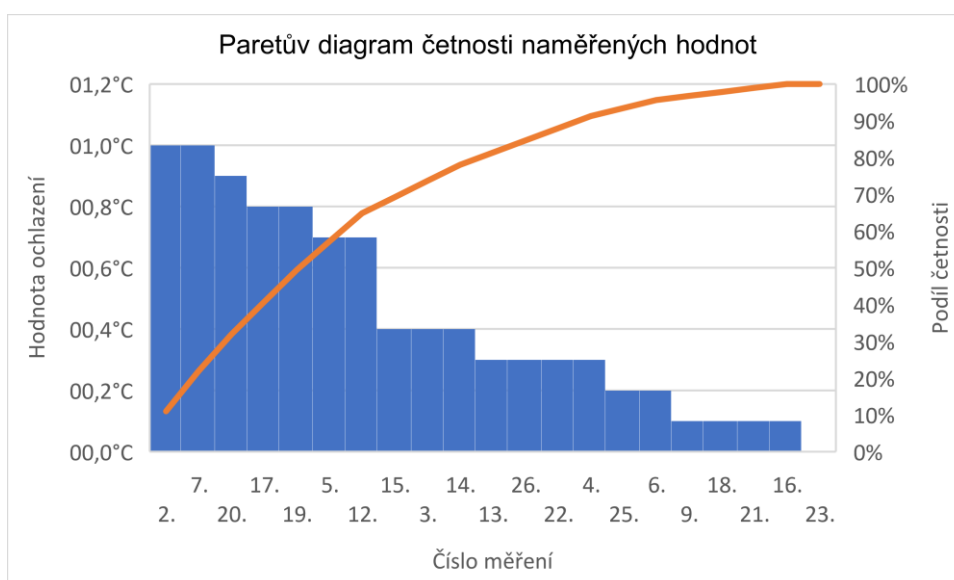
Opakovaným měřením, které čítalo **26 pokusů**, bylo zjištěno, že aritmetickým průměrem naměřených hodnot povrchové teploty listů vrtule bylo ochlazení  $\bar{t} = -0,29 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Během měření se podařilo u pokusů 8 a 9 simulovat vznik námrazy, která je vyznačena červenou oblastí v grafu číslo 3.



Graf 4 Diskrétní vyjádření naměřených hodnot ochlazení s odchylkami (č. 8 a 9 – Námraza)



Graf 5 Spojitá křivka ze všech naměřených diskrétních hodnot (měření č.2)



Graf 6 Paretův diagram četnosti hodnot měření

## Vznik námrazy

V teoretické části bylo uvedeno (*kapitola 1.2.2*), že vzniku námrazy předcházejí následující podmínky.

- Teplota tělesa je nižší než 0 °C
- Vysoká vlhkost vzduchu (ve vzduchu jsou přítomny přechlazené vodní kapky)

Ačkoli bylo primárním požadavkem kladeným na praktickou část diplomové práce provést experimentální ověření ochlazování vrtule multikoptéry, podařilo se v rámci dvou pokusů tyto podmínky splnit. V rámci měření číslo 8 a 9 vznikla na povrchu listů vrtule zřetelná vrstva námrazy, kterou lze vidět na *Obrázku 48*. Meteorologické podmínky těchto měření jsou blíže popsány *Tabulkou 13*.

Tabulka 13 Meteorologické podmínky při vzniku námrazy

Číslo měření	Teplota vzduchu	Teplota povrchu vrtule	Vlhkost	Rosný bod
8	-1,5 °C	-1,4 °C	92 %	-2,6 °C
9	-2,1 °C	-1,5 °C	93 %	-3,1 °C



Obrázek 48 Vzniklá námraza na DJI Phantom 4



## Nepřesnost měření

Měření v daném prostředí nemohlo být dostatečně izolováno od náhodných meteorologických vlivů, které mohly drobně zkreslit naměřené hodnoty. Teplota byla měřena infračerveným teploměrem (pyrometrem), který vykazoval továrně prokázaný rozptyl nepřesností.

V rámci druhé fáze měření bylo vyhodnocení teploty doplněno o kontrolní metodiku, spočívající na vzájemné ověření správnosti naměřených dat dvou měřidel. Infračervený teploměr byl před každým měřením kalibrován na základě porovnání snímaných teplot. Úprava citlivosti snímače pyrometru byla provedena volbou emisivity přístroje v rozmezí 0,90-0,94, což odpovídá plastovým materiálům. Kalibraci pyrometru můžeme vidět na *Obrázku 49*.



Obrázek 49 Kalibrace pyrometru

## Výsledná hodnota měření

### *Série měření číslo 1*

Výsledkem první fáze měření, se započtením nejistoty typu A, je celkový pokles teploty povrchu listů vrtule o hodnotu **0,46 °C**.

### *Série měření číslo 2*

Výsledkem první fáze měření, se započtením nejistoty typu A, je celkový pokles teploty povrchu listů vrtule o hodnotu **0,29 °C**.



Celková hodnota ochlazení v rámci 81 provedených měření je **0,41 °C**.

### **Závěr měření**

Průměr hodnoty ochlazení vrtule vlivem adiabatického ochlazování byl určen z 86 měření probíhajících ve venkovním prostředí v předem stanovených podmínkách. Teplota a vlhkost vzduchu byly dány aktuálními meteorologickou situací, kterým muselo být měření přizpůsobeno v rámci definovaných požadavků na diplomovou práci. Měření mohlo být ovlivněno meteorologickými jevy jako je sluneční záření, vítr nebo slabé přeháňky, které nelze dostatečně eliminovat. Nejzásadnější vliv na provedená měření měl měřič povrchové teploty (pyrometr), který dosahoval vysoké tolerance chyb k poměru výsledných hodnot. Tento nepoměr nebyl před započítáním série měření předpokládán. Z toho důvodu nemůže být výsledná hodnota ochlazení vrtule o  $\bar{t} = 0,41 \text{ °C}$  průkazným výsledkem k potvrzení adiabatického ochlazování povrchu listů vrtule multikoptéry.

## 6. Diskuse

V diplomové práci jsou prezentovány teoretické poznatky zabývající se vznikem námrazy, analýzou nehod způsobených námrazou a experimentálním měřením, jehož úkolem bylo problematiku vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry ověřit. Odborná literatura v současné době nenabízí dostatečné množství přínosných informací popisující problematiku námrazy na multikoptérách nebo je popisuje velmi okrajově. Veškeré dostupné teoretické znalosti publikované v úvodních kapitolách byly doplněny o souhrn analogických studií. Některé nalezené publikace nebyly autory zpřístupněny, proto byl v práci pouze zmíněn jejich obsah a zaměření. Nejpřínosnějším pramenem pro výběr studií byla The Pennsylvania State University, jejíž prezentované studie se v mnoha aspektech shodovaly s charakteristikou tématu této diplomové práce.

Nejvýznamnější výstup této diplomové práce je určení a provedení analýzy podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry. Současně bylo provedeno experimentálního měření, které mělo za úkol ověřit vliv adiabatického děje na změnu povrchové teploty vrtulových listů. Účelem tohoto měření bylo simulovat námrazové podmínky působící na multikoptéru během letu a zároveň určit změnu povrchové teploty vrtulových listů. Měření probíhalo v reálném prostředí v souladu s předem definovanými meteorologickými podmínkami vyplývající ze zadání práce. Na rozdíl od publikovaných studií [11] [25] nebylo měření realizováno v laboratorních podmínkách. První fáze měření byla provedena na měřicím kovovém stojanu doplněném o komponenty elektromotoru, akumulátoru, a plastové vrtule. Změna povrchové teploty byla vyhodnocena z celkového počtu 60 provedených měření s výsledným ochlazením o 0,46 °C. V případě druhé fáze měření byla měřicí sestava doplněna o model kvadroptéry DJI Phantom IV, který byl umístěn na upravené části kovového stojanu. Výsledkem druhé fáze měření byl celkový pokles povrchové teploty o 0,29 °C vyhodnocený z 26 provedených doplňkových měření. Výsledek provedených experimentálních měření potvrdil pokles teploty o průměrnou hodnotu -0,41 °C, určenou na základě všech 86 měření v rámci vypracování praktické části. Hodnoty měření mohly být nepřímo ovlivněny rozdílnými meteorologickými podmínkami přetrvávající v případě dílčích měření nebo určitými technickými nedostatky použitých komponentů. Nejzásadnějším vlivem se na celém měření podílela tolerance chyb použitého pyrometru (infrateploměru), která je podrobněji popsána v manuálu výrobce. Chybovost pyrometru je přibližně  $\pm 2$  °C. Konzultace s odborníkem vyvrátila takto vysokou chybovost, jelikož se jedná o zařízení schopné měřit teplotu v řádu desetinných míst. V běžných podmínkách není takto vysoká chybovost očekávána. Technické nedostatky se v největší míře projevovaly v případě první fáze měření u použitého akumulátoru, který jevil drobné známky kapacitního opotřebení. Projevem opotřebení byl především pokles příkonu

baterie vzrůstající s délkou měření. V některých případech bylo měření ovlivněno postupným poklesem otáček v závislosti na délce měření, což mohlo způsobit zkreslení u delších časových úseků. Podmínky vypracování doplňkového měření byly podřízeny přísnějším kritériím meteorologických požadavků určených ze zadání diplomové práce. V souladu s požadovanými meteorologickými podmínkami musela být všechna měření provedena v ranních nebo večerních hodinách, které nejlépe odpovídaly nastaveným kritériím. Během měření se ukázalo, že měření v těchto inkriminovaných hodinách představovalo vysokou hlukovou zátěž na okolní zástavbu, proto bylo v některých případech nutné zkrátit časové intervaly měření.

Naměřené hodnoty poukazují na významný problém, který může námraza představovat. Její vznik na vrtulích multikoptér probíhá mnohem rychleji, než je tomu u letadel. V souladu s teoretickými poznatky vzniká námraza nejdříve na nejtenčích částech profilu a při relativně vysokých rychlostech tělesa, kde se postupně projevuje termodynamický ohřev. Úzký profil listů a relativně vysoké otáčky vrtule evokují prvotní vznik námrazy právě na těchto částech. Teoretické znalosti, výstup naměřených dat a kombinace ostatních skutečností zvyšuje riziko vzniku námrazy i při kladných teplotách vzduchu. Kritické podmínky vzniku námrazy byly určeny na základě naměřených dat podmíněné teplotou vzduchu  $+0,41\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nižší. Přívětivé meteorologické podmínky pro vznik námrazy byly definovány vysokou relativní vlhkostí vzduchu (vznik námrazy během experimentálního měření byl při hodnotě RH 92 %) a podchlazením povrchem listu vrtule. Průměrné adiabatické ochlazení o  $0,41\text{ }^{\circ}\text{C}$  má pouze nízkou vypovídající hodnotu v reálných podmínkách, avšak svou povahou může mít neméně důležitý podíl na vzniklé námraze během letu. Vznik námrazy během letu způsobuje zhoršení aerodynamických vlastností vrtule a současně vede k úbytku tahu. Projev vzniklé námrazy můžeme pozorovat na zhoršené ovladatelnosti multikoptéry, způsobené reakcí řídicí jednotky na úbytek tahu zvýšením otáček na maximální hodnotu. Vysoké otáčky zatěžují akumulátor nadměrným odběrem proudu a řídicí jednotka tak není schopná reagovat na další požadavky úpravy tahu. Neočekávané chování je doprovázeno varovným hlášením o stavu přepětí baterie a následným nekontrolovatelným pádem multikoptéry k zemi. Výstupní hodnoty telemetrických dat ukazují, že během testování vzniku námrazy docházelo k nucenému klesání vlivem námrazy při rychlosti 6 m/s oproti běžné hodnotě 2 m/s [21].

Dalším požadavkem diplomové práce bylo navržení protinámrazového opatření využitelného pro provoz multikoptér. Veškerá na trhu dostupná opatření jsou určena k ochraně letounů nebo helikoptér. Nepatrný počet studií protinámrazového opatření byl zaměřen na námrazu větrných turbín, které jsou měřítkem diametrálně odlišné. Všechna dostupná řešení jsou v rámci diplomové práce analyzována a blíže popsána v kapitole *Technické opatření pro zamezení vzniku námrazy*. Z několika možných protinámrazových opatření se ukázalo jako

nejlépe vyhovující řešení elektrotermická nebo chemická ochrana. Elektrotermické protinámrazové opatření vyniká značnou konstrukční složitostí a značnou spotřebou elektrické energie. Vysoká energetická náročnost tohoto opatření může razantně zkrátit dolet, který je důležitým parametrem právě u multikoptér. Časový rozsah a konstrukční složitost současně s povahou této diplomové práce mi nedovolily toto řešení prakticky ověřit. Použití chemické ochrany bylo pro svoji jednoduchost ověřeno experimentem s protinámrazovou kapalinou. V okamžiku vyvození odstředivých sil způsobených rotací vrtule byla veškerá kapalina z listů odmrštěna do okolí. Použití protinámrazové kapaliny mělo na povrchovou teplotu přechodný efekt, který nemohl být explicitně prokázán a použití se ukázalo jako neúčinné. Souhrnně bylo zjištěno, že většina dostupných technických opatření blíže popsanych v této diplomové práci, nesplňuje požadavky protinámrazové ochrany multikoptér a jsou primárně určeny k ochraně bezpilotních letadel. Další rozvoj vybraných opatření může v budoucnu přinést očekávané řešení, které by bylo vhodné pro použití na menších zařízeních. V tomto směru jsou slibnými koncepty ultrazvukové odmrazování nebo použití nanomateriálu na výrobu vrtulových listů. Další vhodné řešení v podobě detekčního algoritmu byl popsáno v rámci studie na Norwegian University of Science and Technology. Teoretický výzkum a praktické testy probíhaly na modelu bezpilotního letadla s pevnými křídly, který byl vybaven detekčním algoritmem. Tento algoritmus vyhodnocuje riziko vzniku námrazy na základě aerodynamických nebo termických dat získaných z příslušných senzorů a indikuje její vznik. Softwarové řešení se v tomto případě ukazuje jako adekvátní prozatímní protinámrazové opatření.

Závěrečné výsledky diplomové práce odpovídají zjištěným poznatkům uvedeným v odborné literatuře, která se zabývá námrazou letadel. Vznik námrazy probíhá shodným způsobem, jak je uvedeno v odborné literatuře. Na rozdíl od letadel používá multikoptéra pro svůj pohyb v prostoru jediný pohonný prvek, kterým je vrtule. V případě vzniku námrazy je tento prvek eliminován, což vede k okamžitému pádu k zemi. Požadavky na provoz multikoptér nevyžadují jejich každodenní provoz, a proto na ně nejsou kladeny rovnocenné požadavky bezpečnosti, jako v komerční letecké dopravě. Z toho důvodu není vyvíjen dostatečný tlak na zavedení některých prvků bezpečnosti, jako je například protinámrazové opatření. V případě nehody a zničení multikoptéry je pro výrobce schůdnější cesta prodat nové zařízení nežli investovat nemalé finanční prostředky do vývoje náležitých opatření.

Veškeré prezentované poznatky v této diplomové práci jsou součástí nové kapitoly výzkumu, která bude společně s expanzí provozu multikoptér nabývat na významu. Námraza je jeden z nejnvlivnějších meteorologických jevů vyskytujících se v letectví. Lze tedy očekávat, že v budoucnu může způsobit komplikace i u multikoptér. Ačkoli vliv adiabatického ochlazování nemohl být přesvědčivě prokázán, je velmi pravděpodobné, že se podílí na vzniku námrazy multikoptér. Diplomová práce může sloužit jako náležitý zdroj pro provedení dalších studií. Na

základě uvedené metodiky lze v budoucnu provést sérii obdobných měření v laboratorním prostředí, které mohou přinést přesnější výsledky.

## Závěr

V rámci diplomové práce byly na základě teoretických znalostí, rešeršní analýzy nehod a experimentálního měření zkoumány podmínky vzniku námrazy na vrtulích multikoptér. Tato problematika může být často přehlížena, avšak v blízké budoucnosti se může stát závažným problémem při požadavku na nepřetržitý provoz multikoptér.

Tato diplomová práce si kladla za cíl analyzovat a ověřit podmínky, během kterých dochází ke vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry. Na základě zaznamenaných incidentů bylo zjištěno, že samotná námraza může vzniknout i při kladných teplotách vzduchu, vlivem adiabatického ochlazení listů vrtule. V rámci praktické části bylo úkolem adiabatický jev ověřit provedením experimentálního měření, při kterém byla zkoumána změna povrchové teploty listu vrtule. Neméně důležitým cílem bylo analyzovat dostupná protinámrazová opatření a navrhnou vhodné řešení k ochraně multikoptér.

Teoretická část diplomové práce měla za úkol souhrnně seznámit čtenáře se základními meteorologickými poznatky doplněnými o odborné studie a analýzu nehod způsobených námrazou. Ze zjištěných poznatků vyplývá, že námraza vzniká za podmínek vysoké vlhkosti vzduchu a teplotou povrchu tělesa pod bodem mrazu. Vznik námrazy multikoptér je velmi podobný poznatkům uvedeným v odborné literatuře. Analýza nehod způsobených námrazou dále ukázala, že k nehodám vedly nevyhovující meteorologické podmínky, které se vyznačovaly nízkou oblačností, vysokou vlhkostí a teplotou vzduchu kolem 0°C. Vznik námrazy u multikoptér je velmi rychlý, námraza ve většině případů vznikla do několika desítek sekund, zásluhou velmi tenkého profilu listu a relativně vysoké rychlosti otáček. Ve většině případů se námrazové podmínky shodovaly s těmi standardními publikovanými v odborné literatuře. Z dostupných dat bylo zjištěno, že vznikem námrazy dochází ke zhoršení stability a ovladatelnosti multikoptéry.

V praktické části diplomové práce bylo úkolem navrhnout a sestavit měřící zařízení, které ověří vliv adiabatického děje na ochlazení vrtulových listů. Součástí měření byla sestavena metodika popisující dílčí postupy měření. Návrh měřícího zařízení byl zpracován v programu AutoCAD a ručně sestaven. Měření probíhalo za předem definovaných meteorických podmínkách ve dvou fázích. Výsledná hodnota ochlazení vrtule v první fázi měření byla 0,46 °C určená na základě 60 měření. Doplnkové měření mělo rozšířit náležitost měření na skutečném modelu kvadrokoptéry DJI Phantom 4 a ověřit výsledky z předchozího měření. V případě doplnkového měření byla výsledná hodnota ochlazení 0,29 °C vycházející z 26 měření. Výsledná hodnota adiabatického ochlazení vrtule multikoptéry byla v průměru 0,41 °C. Na základě konzultace s meteorologem lze tuto hodnotu považovat za velmi reálnou. Podobný jev byl pozorován rovněž u helikoptér. Z důvodu nevhodného měřícího zařízení se hypotézu nepodařilo řádně

potvrdit. Výsledky však indikují, že námraza vlivem adiabatického ochlazování může vznikat i při kladných teplotách. Výsledky nemohou být v tomto směru považovány za exaktně průkazné, avšak v konečném důsledku může mít adiabatické ochlazování vrtule nepatrný podíl na procesu vzniku námrazy. V rámci rozmezí přiznané chybovosti měřicího přístroje není možné vliv adiabatického ochlazování na vrtuli multikoptéry řádně potvrdit. V dalším výzkumu lze doporučit změnu některých parametrů výzkumu.

Analýza všech dostupných protinámrazových opatření byla důkladně zkoumána v kapitole 3. Nejvhodnějším opatřením proti námraze multikoptér se ukázalo použití elektrotermické nebo chemické ochrany. Elektrotermické protinámrazové opatření je pro použití na multikoptérách konstrukčně velmi složité a energeticky náročné. Chemické protinámrazové opatření se jeví jako vhodnější varianta pro použití na multikoptérách, proto byla pokusem ověřena její účinnost. Protinámrazová kapalina nanesená na vrtuli se po uvedení vrtule do pohybu vlivem odstředivých sil rozptýlila do okolí. Následným měřením rozdílu teplot se její použití ukázalo jako neúčinné. Případné rozšíření ukazují prezentované studie zabývající se protinámrazovým opatřením. Studie publikované autorem *Kim Lyngge Sørensenem* popisuje možnosti použití detekčního algoritmu nebo integraci nanomateriálu do náběžných hran. Vhodné protinámrazové opatření aplikovatelné na zařízení typu multikoptér není v současné chvíli na trhu dostupné. Z tohoto důvodu se mi nepodařilo v rámci diplomové práce navrhnout vhodnější řešení, než je za definovaných podmínek nelétat.

Výsledky této diplomové práce považuji jako referenci k dalšímu výzkumu. Ačkoli nebylo adiabatické ochlazování potvrzeno ani vyvráceno, z naměřených výsledků lze předpokládat, že se při dalších opakovaných měřeních adiabatické ochlazování podaří explicitně prokázat.

Závěrem bych chtěl navrhnout některá doporučení, která mohou rozšířit výsledky této práce. V budoucnu by se mohl výzkum zaměřit na závislost mezi vznikem námrazy a počtem otáček, které mohou mít na vznik námrazy vliv. Při dalších měřeních je třeba nastavit vhodnější podmínky, které eliminují drobné nedostatky, které mohou během měření nastat. Možným doporučením je provést další měření v laboratorních podmínkách. Dalším doporučením je volba vhodnějšího typu měřicího přístroje, který není zatížen tak vysokou systémovou chybou měření. Vzhledem k výsledným hodnotám se v závěru měření ukázala chybovost měřicího přístroje jako zásadní komplikace v průkaznosti naměřených dat. Veškeré prezentované výsledky mohou mít informativní dosah pro všechny uživatele multikoptér. To může přinést lepší povědomí o nehodách spojených s námrazou a snížit tak pravděpodobnost vzniku dalších nehod.

## Reference

- [1] **DVOŘÁK, Petr.** *Letecká meteorologie*. místo Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 9788075730145.
- [2] **Oxford Aviation academy.** *Meteorology*. Shoreham, England: 2008. ISBN 9781906202118
- [3] **VYSOUDIL, Miroslav.** *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a Klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2013. ISBN 978-80-244-3893-1.
- [4] **MURALIKRISHNA, Iyyanki V. MANICKAM, Valli.** *Adiabatic Lapse Rate, ScienceDirect* [online]. 1999. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/adiabatic-lapse-rate>
- [5] **KRŠKA. SOBOTA. KRÁČMAR. SVATOŠ.** *Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů, Meteorologie*. Brno : CERM, 2006. ISBN 8072044478.
- [6] **HALLIDAY, David. Robert RESNICK a Jearl WALKER.** *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2007. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 8021418680.
- [7] **MUNZAR, Jan. KRŠKA, Karel. SOBIŠEK, Bořivoj.** *Meteorologický slovník výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině*. Praha: Academia, 1993. ISBN 8085368455
- [8] Český rozhlas Dvojka. *Proč mrholení není déšť*. [online]. Dostupné z: <https://dvojka.rozhlas.cz/proc-mrholeni-neni-dest-7528016>
- [9] **ČERNAVA, S. a kol., 1972.** *Letecká meteorologie*. Praha: 1972.
- [10] Předpis LET-51-24, *Letecká meteorologie (VŠ učebnice)*. Praha: 1978.
- [11] **YANG, Liu. NING, Zhe. TIAN, Wei.** *Experimental Investigation on the Dynamic Icing Process over a Rotating Propeller Model*. 2018. [online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/323910208\\_Experimental\\_Investigation\\_on\\_the\\_Dynamic\\_Icing\\_Process\\_over\\_a\\_Rotating\\_Propeller\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/323910208_Experimental_Investigation_on_the_Dynamic_Icing_Process_over_a_Rotating_Propeller_Model).
- [12] **PALACIOS, Jose L. BROUWERS, Edward W. SMITH, Edward C.** *The experimental investigation of a rotor hover icing model with shedding* [online]. Dostupné z: <https://www.aero.psu.edu/facilities/aerts/Ice%20Shape%20Modeling.pdf>.



13. **REID**, David. CNBC. *Deaths from commercial airplane crashes fell more than 50% in 2019*. [online]. Dostupné z: <https://www.cnn.com/2020/01/02/deaths-from-commercial-airplane-crashes-fell-more-than-50percent-in-2019.htm>
- [14] L13-RLP. AIM – *Air Navigation Services of the CR* [online]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-13/index.htm>.
- [15] DJI Mavic Drone Forum. Props iced up! [online]. Dostupné z: <https://mavicpilots.com/threads/props-iced-up.85246/>.
- [16] DJI Forum. DJI Forum. Ice on drone propeller [online] Dostupné z: <https://forum.dji.com/thread-75264-1-1.html>.
- [17] **PLAČEK**, Petr. *Námraza\_DP* [elektronická pošta]. Message to: 29. dubna 2020. Osobní komunikace.
- [18] **KROUFEK**, Jaroslav. *RCmodely*. 2016.
- [19] **KELLER**, Ladislav. *Ústní konzultace*. Praha : 2020.
- [20] **VLAHOVIČ**, Igor. Droncentrum. *Havárie dronu vlivem námrazy vrtulí* [online]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/havarie-dronu-vlivem-namrazy-vrtuli/>
- [21] **VLAHOVIČ**, Igor. DronCentrum. *Test chování dronu*. [online]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/test-chovani-drou-pri-namraze-vrtuli/>.
- [22] **GIUSEPPE**, Mingione. **MASSIMO**, Barocco. Flight in icing conditions. [online]. Dostupné z: [https://www.ecologique-olidaire.gouv.fr/sites/default/files/lcing\\_flight\\_manual.pdf](https://www.ecologique-olidaire.gouv.fr/sites/default/files/lcing_flight_manual.pdf)
- [23] **PALACIOS**, Jose L. *Ultrasonic de-icing of wind-tunnel impact icing*. Penn State: 2021 [Online]. Dostupné z: <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/ultrasonic-de-icing-of-wind-tunnel-impact-icinghttps://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/ultrasonic-de-icing-of-wind-tunnel-impact-icing>.
- [24] **SØRENSEN**. **HELLAND**. **JOHANSEN**. *Carbon Nanomaterial-Based Wing Temperature Control System for In-Flight Anti-Icing and De-Icing of Unmanned Aerial Vehicles*. [online]. Dostupné z: <https://sci-hub.se/https://ieeexplore.ieee.org/document/7119206>. [Online]
- [25] RC-ZOOM/ HOBIX.CZ. *Servotester není jen k testování serv.* [online]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/servotester-neni-jen-k-testovani-serv>

- [26] **YAN. OPAZO. LANGELAAN. PALACIOS.** *Experimental Evaluation and Flight Simulation of Coaxial-Rotor Vehicles in Icing Clouds*. Pennsylvania State University: 2020. [online]. Dostupné z: <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/experimental-evaluation-of-multi-rotor-uav-operation-under-icing->.
- [27] **KELLER, Ladislav.** *Učební texty pro piloty UAS*. Praha: Dronim, 2019.
- [28] **HOHENLOHE, Stephan zu.** *Drony*. Frýdek Místek: Alpress, 2016. 9788075432346.
- [29] **SVĚTRONŮ.NET.** *Základy pro stavbu dronu* [online]. Dostupné z: <https://svetdronu.net/velky-pruvodce-zaklady-pro-stavbu-dronu/>
- [30] **DĚKAN, Tomáš.** *Bezpečnost v letecké dopravě. 2018* [výuková prezentace].
- [31] **MARIA, Ader. AXELSSON, David.** *Drones in arctic environments*. STOCKHOLM : KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2017.
- [32] **SØRENSEN, Kim Lyng.** *Autonomous Icing Protection Solution for Small Unmanned*. [Norwegian University of Science and Technology] Trondheim : autor neznámý, 2016.
- [33] **DJI.** *DISCLAIMER AND SAFETY GUIDELINES*. [Online]. Dostupné z: <https://dl.djicdn.com/downloads/mavic/20170809/Mavic+Pro+Disclaimer+and+Safety+Guidelines-EN.pdf>.
- [34] **Vysoudil, Miroslav.** *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a Klimatologie*. Olomouc : Univerzita Palackého, 2013. 978-80-244-3893-1.
- [35] **Physicalgeography.** *Atmospheric Humidity* [obrázek]. Dostupné z: <https://deicing.net/?p=187> <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8c.html>.
- [36] **Weather.gov.** *Icing*. [Online]. Dostupné z: [https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU\\_Training\\_Page/icing\\_stuff/icing/icing.htm](https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/icing_stuff/icing/icing.htm).
- [37] **EASA, European Union Aviation Safety Agency.** *In Flight Icing* [online]. Dostupné z: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/198961\\_EASA\\_EGAST\\_GA10.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/198961_EASA_EGAST_GA10.pdf). EASA.
- [38] **DEICING.NET.** *Active Frost* [obrázek]. Dostupné z: <https://deicing.net/?p=187>
- [39] **KINDPNG.COM.** *Drone Motor Direction* [obrázek]. Dostupné z: [shorturl.at/iDNO](http://shorturl.at/iDNO)
- [40] **RLP.** *AIP*. [online]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>.

- [41] AUTOMATIZACE.HW. *BLDC / EC technologie nebo AC s měničem?* [Online]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ec-technologie-nebo-frekvencni-menic.html>.
- [42] *Meteo Aktuality. Izobary, izotermy a další pomyslné čáry.* [Online]. Dostupné z: <https://pocasimeteoaktuality.wordpress.com/2019/02/12/izobary-izotermy-a-dalsi-pomyslne-cary/>
- [43] **YAN. OPAZO. PALACIOS, LANGELAAN, GERMAIN.** *Experimental evaluation of multi-rotor UAV operation under icing conditions.* [Online] 2018. Dostupné z: <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/experimental-evaluation-of-multi-rotor-uav-operation-under-icing->.
- [44] **YAN. SIHONG.** *Experimental Evaluation and Flight Simulation of Coaxial-Rotor Vehicles in Icing Clouds.* [Online] 2020. Dostupné z: <https://www.ingentaconnect.com/content/ahs/jahs/2020/00000065/00000002/art00012>.
- [45] *DJI Mavic Drone Forum. Props iced up!* [online]. Dostupné z: <https://mavicpilots.com/threads/mavic-2-pro-crash-related-to-fog-and-iced-props.70784/>. MAVIC\_forum.
- [46] *FAVPNG. Fan - Propeller Axial Fan Design Pressure* [online]. Dostupné z: [https://favpng.com/png\\_view/fan-propeller-axial-fan-design-pressure-flow-velocity-slipstream-png/DsE1q6CP](https://favpng.com/png_view/fan-propeller-axial-fan-design-pressure-flow-velocity-slipstream-png/DsE1q6CP).
- [47] **YANG. NIN. TIAN. LI.** *Experimental Investigation on the Dynamic Icing Process over a Rotating Propeller Model.* [online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/323910208\\_Experimental\\_Investigation\\_on\\_the\\_Dynamic\\_Icing\\_Process\\_over\\_a\\_Rotating\\_Propeller\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/323910208_Experimental_Investigation_on_the_Dynamic_Icing_Process_over_a_Rotating_Propeller_Model).
- [48] **GULTEPE. ISAAC.** *Liquid Water Content and Temperature* [online]. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/26243101?seq=1>.

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 UKÁZKA PRŮBĚHU PRŮMĚRNÝCH DENNÍCH TEPLOT PRO ČR [3] .....	11
OBRÁZEK 2 SCHÉMA POKLESU TEPLoty S VÝŠKOU V ATMOSFÉŘE [4] .....	12
OBRÁZEK 3 SLUNEČNÍ RADIACE [2] .....	13
OBRÁZEK 4 KONVEKCE, KONDUKCE A RADIACE [VLASTNÍ] .....	14
OBRÁZEK 5 ODEVZDANÉ A PŘIJATÉ TEPLO, BĚHEM FÁZOVÉ PŘEMĚNY [3] .....	15
OBRÁZEK 6 RELATIVNÍ VLHKOST PŘI RŮZNÝCH TEPLOTÁCH [VLASTNÍ] .....	17
OBRÁZEK 7 KONDENZAČNÍ HLADINA A VZNIK OBLAČNOSTI [VLASTNÍ] .....	20
OBRÁZEK 8 ADVEKČNÍ MLHA TYPICKÁ PRO SAN FRANCISCO [2] .....	22
OBRÁZEK 9 ZMĚNA SKUPENSTVÍ VODY V OBLAČNOSTI [7] .....	25
OBRÁZEK 10 SKUPENSTVÍ VODY PŘI ZÁPORNÝCH TEPLOTÁCH [VLASTNÍ] .....	26
OBRÁZEK 11 JINOVATKA NA STOJÍCÍM LETADLE [38].....	28
OBRÁZEK 12 VZNIK ZRNITÉ NÁMRAZY NA PROFILU [2].....	28
OBRÁZEK 13 VZNIK LEDOVKY NA PROFILU [5] .....	29
OBRÁZEK 14 PROFILOVÁ NÁMRAZA [VLASTNÍ].....	30
OBRÁZEK 15 ŽLÁBKOVÁ NÁMRAZA [VLASTNÍ] .....	30
OBRÁZEK 16 VLIV NÁMRAZY NA PROFIL PODLE JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ [22] .....	31
OBRÁZEK 17 POMĚR TLAKŮ PROTÉKAJÍCÍHO VZDUCHU VRTULÍ [46].....	33
OBRÁZEK 18 VZNIKLÁ NÁMRAZA NA LISTU MULTIKOPTÉRY .....	34
OBRÁZEK 19 VZNIK ZRNITÉ NÁMRAZY NA VRTULI MULTIKOPTÉRY [43].....	34
OBRÁZEK 20 VZNIK SMÍŠENÉ NÁMRAZY NA VRTULÍCH MULTIKOPTÉR [43] .....	35
OBRÁZEK 21 VZNIK LEDOVKY NA VRTULÍCH MULTIKOPTÉR [43] .....	36
OBRÁZEK 22 TESTOVACÍ MODEL VRTULE MULTIKOPTÉRY [11] [11].....	38
OBRÁZEK 23 MĚŘÍCÍ KOMORA S VODNÍMI TRYSKAMI SIMULUJÍCÍ VLHKOST [11] .....	40
OBRÁZEK 24. POPIS TĚLA MULTIKOPTÉRY [VLASTNÍ] .....	43
OBRÁZEK 25 SMYSL OTÁČENÍ VRTULÍ UA [39] .....	45
OBRÁZEK 26. PRINCIP FUNKCE ELEKTROMOTORU [41] .....	46
OBRÁZEK 27 NÁMRAZA LISTŮ VRTULE [16] .....	51
OBRÁZEK 28 HEXAKOPTÉRA TĚSNĚ PO NEHODĚ [17] .....	52
OBRÁZEK 29 VZNIK NÁMRAZY NA VRTULÍCH HEXAKOPTÉRY [17] .....	52
OBRÁZEK 30 NÁMRAZA NA LISTU VRTULE [22] .....	56
OBRÁZEK 31 ROZDÍL APLIKACE ULTRASONICKÝCH VIBRACÍ NA ODSTRANĚNÍ NÁMRAZY [23] .....	64
OBRÁZEK 32 POUŽITÍ NANOMATERIÁLU NA NÁBĚŽNÉ HRANĚ KŘÍDLA [24] .....	66
OBRÁZEK 34A TESTOVÁNÍ PROTINÁMRAZOVÉ KAPALINY NA VRTULÍCH – PŘED TESTEM .....	67
OBRÁZEK 34B TESTOVÁNÍ PROTINÁMRAZOVÉ KAPALINY NA VRTULÍCH – PO TESTU .....	67
OBRÁZEK 35 NÁMRAZOVÝ TEST NA MULTIKOPTÉŘE .....	68
OBRÁZEK 36 SCHÉMA FUNKCE PYROMETRU [VLASTNÍ] .....	71

OBRÁZEK 37 TEPLOMĚR/VLHKOMĚR [VLASTNÍ] .....	71
OBRÁZEK 38 HOLÁ KONSTRUKCE STOJANU [VLASTNÍ] .....	72
OBRÁZEK 39 NABÍJECÍ STANICE [VLASTNÍ] .....	72
OBRÁZEK 40 BATERIE GRAVITY 2500 MAH [VLASTNÍ] .....	73
OBRÁZEK 41 POHONNÁ JEDNOTKA UMÍSTĚNA NA KONZOLY [VLASTNÍ] .....	73
OBRÁZEK 42 REGULÁTOR OD FIRMY JETI [VLASTNÍ] .....	74
OBRÁZEK 43 SERVOTESTER [33] .....	74
OBRÁZEK 44 SCHÉMA ZAPOJENÍ KOMPONENTŮ [VLASTNÍ] .....	75
OBRÁZEK 45 VZOR PROTOKOLU MĚŘENÍ [VLASTNÍ] .....	76
OBRÁZEK 46 NÁVRH UPRAVENÉ KONZOLE .....	80
OBRÁZEK 47 UPRAVENÝ STOJAN MĚŘENÍ .....	81
OBRÁZEK 48 VZNIKLÁ NÁMRAZA NA DJI PHANTOM 4 .....	87
OBRÁZEK 49 KALIBRACE PYROMETRU .....	88

## Seznam tabulek

TABULKA 1 DRUHY TEPLOTNÍCH STUPNIC [2] .....	11
TABULKA 2 VELIKOST VODNÍCH KAPEK A JEJICH PODMÍNKY [2].....	26
TABULKA 3 TABULKA INTENZITY NÁMRAZY .....	27
TABULKA 4 PREDIKCE ODLAMOVÁNÍ LEDU: SKUTEČNÉ MĚŘENÍ/ SIMULACE/ SIMULACE S KOREKČÍ .....	40
TABULKA 5 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [15].....	50
TABULKA 6 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [16]. .....	50
TABULKA 7 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [17] .....	52
TABULKA 8 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [18] .....	53
TABULKA 9 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [19] .....	54
TABULKA 10 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [20] .....	55
TABULKA 11 SPECIFIKACE METEOROLOGICKÝCH ÚDAJŮ V DOBĚ NEHODY [21] .....	55
TABULKA 12 UKÁZKA NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	83
TABULKA 13 METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY PŘI VZNIKU NÁMRAZY .....	87

## Seznam grafů

GRAF 1 DISKRÉTNÍ VYJÁDŘENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT OCHLAZENÍ S PŘÍSLUŠNÝMI ODCHYLKAMI (MĚŘENÍ Č.1)	84
GRAF 2 SPOJITÁ KŘIVKA ZE VŠECH NAMĚŘENÝCH DISKRÉTNÍCH HODNOT (MĚŘENÍ Č.1)	84
GRAF 3 PARETŮV DIAGRAM ČETNOSTI HODNOT MĚŘENÍ (MĚŘENÍ Č.1)	85
GRAF 4 DISKRÉTNÍ VYJÁDŘENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT OCHLAZENÍ S ODCHYLKAMI (Č. 8 A 9 – NÁMRAZA)	86
GRAF 5 SPOJITÁ KŘIVKA ZE VŠECH NAMĚŘENÝCH DISKRÉTNÍCH HODNOT (MĚŘENÍ Č.2)	86
GRAF 6 PARETŮV DIAGRAM ČETNOSTI HODNOT MĚŘENÍ	86

## Seznam příloh

Příloha č. 1 – Tabulka hodnot měření 1-30

Příloha č. 2 – Tabulka hodnot měření 31-60

Příloha č. 3 – Tabulka hodnot měření drhá fáze 0-26

Příloha č. 4 – Technický výkres



