ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Roman Pavlů

Bezpilotní letadla a jejich vliv na bezpečnost v obchodní letecké dopravě

Bakalářská práce

2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621..... **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Roman Pavlů

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Bezpilotní letadla a jejich vliv na bezpečnost v obchodní letecké dopravě**

Název tématu (anglicky): Unmanned Aerial Vehicles and Their Impact on Safety in Commercial Air Transport

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Pravidla pro provozování bezpilotních letadel v okolí řízených letišť
- Analýza incidentů způsobených provozem bezpilotních letadel v okolí řízených letišť
- Možnosti zabránění vzniku incidentů způsobených bezpilotními letadly v okolí řízených letišť
- Možnosti regulace provozu bezpilotních letadel v blízkosti řízených letišť

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

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

Seznam odborné literatury: Předpis L2, Drooplněk X - Bezpilotní letouny
ICAO Cir 382, Unmanned Aircraft Systems
Jakub Karas, Tomáš Tichý - Drony

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Keller**

Datum zadání bakalářské práce: **19. října 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **26. srpna 2019**
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

L. S.

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

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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Roman Pavlů
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 19. října 2018

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Ladislavu Kellerovi za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za materiální a morální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

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

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

Nemám závažný důvod proti použití 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 21. srpna 2019 .....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ ÚČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Bezpilotní letadla a jejich vliv na bezpečnost v obchodní letecké dopravě

Bakalářská práce

Srpen 2019

Roman Pavlů

Abstrakt

Hlavním cílem bakalářské práce „Bezpilotní letadla a jejich vliv na bezpečnost v obchodní letecké dopravě“ je analýza jednotlivých simulovaných kolizí bezpilotního letadla s letouny, které jsou hlavními zastupiteli obchodní letecké dopravy. Na základě výsledků z jednotlivých analýz vyvodit možné následky kolize a vyjádřit vliv kolize bezpilotního letadla s letounem, na bezpečnost v obchodní letecké dopravě.

.

Klíčová slova

Bezpilotní systémy, bezpilotní letadlo, letoun, následky kolize, proudový motor

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of transportation sciences

Unmanned vehicles and their impact on safety in commercial air transport

Bachelor thesis

August 2019

Roman Pavlů

Abstract

Main goal of the bachelor thesis „Unmanned vehicles and their impact on safety in commercial air transport“ is analysis of the individual simulated collisions Unmannded vehicles with aircrafts, which are the main representatives of commercial air transport. Based on the results from the individual analysis deduce possible consequences and express influence of the collision Unmanned vehicle with commercial aircraft, on the safety in a commercial air transport.

Key words

Unmanned aircraft systems, unmanned aircraft vehicle, airtcraft, consequences of a collison, jet engine

Obsah

Seznam použitých zkratek 7

1. Úvod 8

1.1 Základní pojmy 9

1.2 Historie bezpilotních letadel 11

1.3 Rozdělení bezpilotních letadel 14

1.3.1 Rozdělení podle velikosti 14

1.3.2 Rozdělení podle využití 15

1.3.3 Rozdělení podle typu konstrukce 15

1.3.4 Rozdělení dle české legislativy 15

1.4 Vzdušný prostor vyhrazený pro UAS 16

1.4.1 Rozdělení vzdušného prostoru 17

1.4.2 Vzdušný prostor vyhrazený pro bezpilotní letadla 17

2. Analýza srážky letounu s UA 20

2.1 Specifikace UA použitého ve výzkumu 20

2.2 Specifikace letounů použitých ve výzkumu 21

2.2.1 Dopravní letoun 21

2.2.2 Business jet 21

2.3 Zvolené podmínky testů 22

2.4 Hodnocení výsledků testů 23

2.5 Analýza srážky dopravního letounu s UA 25

2.5.1 Závěr analýzy srážky UA s dopravním letounem 27

2.6 Analýza srážky Business Jetu s UA 28

2.6.1 Závěr analýzy srážky UA s Business jetem 29

2.7 Porovnání srážky ptáka a UA s letounem 30

2.8 Porovnání s výsledky Dyatonské univerzity 33

2.8.1 Podmínky kolize 33

2.8.2 Následky kolize 33

2.8.3 Porovnání s výzkumem FAA 33

2.9 Závěr analýzy srážky letounu s UA ... 34
3. Analýza srážky motoru letounu s UA ... 35
3.1 Specifikace UA použitých ve výzkumu ... 36
3.2 Specifikace proudového motoru ... 37
3.3 Zvolené podmínky výzkumu ... 38
3.4 Hodnocení výsledků testů ... 40
3.5 Analýza srážky kvadrokoptéry s motorem ... 42
3.6 Analýza srážky UA s přímým křídlem a motoru ... 44
3.7 Porovnání srážky s výsledky výzkumu Virginia Tech ... 46
3.7.1 Podmínky kolize ... 46
3.7.2 Následky kolize ... 47
3.7.3 Porovnání s výzkumem FAA ... 47
3.8 Závěr analýzy srážky proudového motoru s UA ... 47
4. Porovnání skutečné a simulované kolize ... 48
4.1 Kolize UA s letounem Beechcraft King Air A100 ... 48
4.1.1 Následky kolize ... 49
4.1.2 Rozdíly mezi simulací a skutečnou kolizí ... 49
4.1.3 Porovnání s následky simulace ... 50
4.2 Ostatní kolize způsobené UA ... 50
4.3 Možnosti zabránění vzniku incidentů způsobené bezpilotními letadly ... 51
4.3.1 Legislativní omezení ... 51
4.3.2 Včasná detekce bezpilotních letadel ... 52
4.3.3 Eliminace bezpilotních letadel ... 53
4.4 Možnosti regulace provozu bezpilotních letadel blízkosti řízených letišť ... 53
5. Závěr ... 55
Použité zdroje ... 57
Seznam obrázků ... 60
Seznam tabulek ... 61

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický název	Český název
AGL	Above ground level	Výška nad zemí
AMSL	Above mean sea level	Nad střední hladinou moře
ATZ	Aerodrome traffic zone	Letištní provozní zóna
CAD	Computer aided desing	Počítačem podporované projektování
CTR	Control zone	Řízený okrsek
DC	Direct current	Stejnosměrný proud
FAA	Federal Aviation Administration	Federální letecký úřad
KIAS	Knots indicated airspeed	Indikovaná vzdušná rychlost v uzlech
Li-Po	Lithium-polymer battery	Lithium-polymerový akumulátor
MCTR	Military control zone	Vojenský řízený okrsek
MTOM	Maximum take off mass	Maximální vzletová hmotnost
UA	Unmanned aircraft	Bezpilotní letadlo
UAV	Unmanned aerial vehicle	Bezpilotní letadlo
UAS	Unmanned aircraft system	Bezpilotní systém
ÚCL	Civil aviation authority	Úřad pro civilní letectví

1. Úvod

Bezpilotní systémy se zejména v posledních letech rozšiřují takřka do všech odvětví lidské činnosti. Jejich uplatnění zdaleka nespadá pouze do vojenství, jako tomu bylo v počátcích. V dnešní době se bezpilotní systémy využívají od dopravy materiálů, přes pořizování snímků a natáčení přímých přenosů na televizní obrazovky až po zachraňování životů v těžko dostupných místech. Jejich hlavní předností je pochopitelně schopnost splnění cíle bez přítomnosti posádky na palubě zařízení, čehož je možné docílit mnoha způsoby jako například přesné naprogramování tratě letu. Podstatně rozšířenější možností je ovládání bezpilotního systému ze země.

Díky velmi rychlému vývoji a snižování nákladů na pořízení bezpilotních systémů, jsou dnes tato zařízení dostupná prakticky pro kohokoliv. Bezpilotní letadlo nebo také často používaný výraz „Dron“ se svými rozměry může pohybovat od několika centimetrů až do velikosti dopravních letounů, jeho hlavním parametrem je však maximální vzletová hmotnost (MTOM). Pro rekreační využití jsou velmi oblíbené multikoptéry, které jsou dnes snadno ovladatelné, například i pomocí chytrého telefonu a nevyžadují žádný pilotní kurz.

Snadná dostupnost zejména menších bezpilotních letadel přináší stále více problémů do oblasti obchodní letecké dopravy. Bezpilotní letadla jsou častěji pozorovány v blízkosti řízených letišť, a to jak piloty, tak pozemním personálem. Hlavním problémem je riziko střetu bezpilotního letadla s dopravním letounem, které může vyústit v lepším případě k poškození dopravního letounu a v horším může vést k vážné letecké nehodě. Další problém při objevení bezpilotního letadla v blízkosti řízeného letiště vyplývá z nutnosti takové letiště okamžitě uzavřít. Následkem jsou desítky zrušených letů a velké ztráty jak pro letiště, tak pro aerolinie, a samozřejmě nepohodlí cestujících.

Ve své práci se zabývám horší variantou, kdy dojde ke srážce bezpilotního letadla s letounem v oblasti obchodního letectví. Protože, je však nutné minimalizovat výskyt možných nehod či incidentů, existují také legislativní požadavky na provozování bezpilotních systémů. Těmto předpisům společně s historií bezpilotních systémů a jejich rozdělením, se budu věnovat v úvodní části práce. Podobné tématice se věnuje poslední kapitola, ve které je zmíněno jakými způsoby je možné zabránit či zmírnit výskyt incidentů a jaké jsou možnosti regulace bezpilotních letadel v blízkosti řízených letišť.

V Praktické části bakalářské práce se budu věnovat analýze simulovaných následků, které byly způsobeny kolizí bezpilotního letadla s částmi letounu a proudového motoru. Cílem je z jednotlivých analýz vyvodit výsledný vliv na bezpečnost letu a porovnat výzkum s dalšími provedenými výzkumy a se skutečnými kolizemi.

1.1 Základní pojmy

Ve většině odborných textů se setkáváme s množstvím termínů či zkratek, které mohou mít zdánlivě stejný význam. Abychom se vyjadřovali v přesné terminologii, je nezbytné vysvětlit základní pojmy týkající se bezpilotních letadel.

Autonomní letadlo:

„Bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu.“ [1]

Bezpilotní letadlo (UA):

„Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě.“ [1]

Model letadla:

Jedná se o letadlo, které slouží pouze pro rekreační či sportovní účely. Je po celou dobu řízeno dálkových vysílačem za vizuálního dohledu pilota. Nesmí být vybaveno zařízením umožňující autonomní let a nesmí nést člověka na palubě. [1]

Bezpilotní systém (UAS):

Je systém, který se skládá z většího množství prvků za účelem vzletu a návratu bezpilotního letadla. Bezpilotní systém se zpravidla skládá z řídící stanice, zařízení umožňujícího komunikační spojení a bezpilotního letadla. [1]

Bezpilotní letadlo (UAV):

Letadlo určené pro provoz bez pilota na palubě. Jedná se o starší termín, který se však v mnoha textech stále vyskytuje, dnes se používá zejména v USA. Nová evropská legislativa tento pojem nezahrnuje. [2]

Incident (Incident):

Událost jiná než letecká nehoda, spojená s provozem letadla, která ovlivňuje nebo by mohla ovlivnit bezpečnost provozu. Jedná se o chybnou činnost osob nebo nesprávnou činnost leteckých a pozemních zařízení v leteckém provozu, jeho řízení a zabezpečování, jejíž důsledky však zpravidla nevyžadují předčasné ukončení letu nebo provádění nestandardních (nouzových) postupů. [3]

Letecká nehoda (Accident):

Událost spojená s provozem letadla, která se v případě pilotovaného letadla, stala mezi dobou, kdy jakákoliv osoba nastoupila do letadla s úmyslem vykonat let a dobou, kdy všechny takové osoby letadlo opustily, nebo která se v případě bezpilotního letadla, stala mezi dobou, kdy letadlo je připraveno k pohybu pro účely letu a dobou, kdy zastaví na konci tohoto letu a hlavní pohonná soustava je vypnuta, a při které: [3]

- *některá osoba byla smrtelně nebo těžce zraněna následkem:* [3]
  - *přítomnosti v letadle, nebo*
  - *přímého kontaktu s kteroukoli částí letadla, včetně částí, které se od letadla oddělily, nebo*
  - *přímým působením proudu plynů (vytvořených letadlem)*

  Neplatí pro případy kdy ke zranění došlo přirozeným způsobem, dále pokud si zranění způsobila osoba sama, nebo bylo způsobenou druhou osobou. Výjimkou jsou také černí pasažéři.

- *letadlo bylo zničeno, nebo poškozeno tak, že poškození:* [3]
  - *nepříznivě ovlivnilo pevnost konstrukce, výkon nebo letové charakteristiky letadla, a*
  - *vyžádá si větší opravu nebo výměnu postižených částí*

  Výjimkou je poškození nebo porucha, pokud se poškození vztahuje pouze na jeden motor.

- *letadlo je nezvěstné nebo je na zcela nepřístupném místě* [3]

1.2 Historie bezpilotních letadel

Historie bezpilotních letadel je v podstatě historií letectví samotného. Od dob mnoho století nazpět, kdy čínští draci zdobili nebe, až po nejmodernější bezpilotní systémy. Jedno z prvních využití bezpilotních letadel bylo zaznamenáno v Číně okolo let 180-234 n.l., kdy byl použit papírový balón, vybavený hořáky, které spalovaly olej, jimiž byl ohříván vzduch. Vznikl tak jakýsi předchůdce horkovzdušného balónu. Účelem těchto balónů bylo během noci zaletět nad nepřátelské jednotky a vyvolat pocit, že nepřítel má v moci nadpřirozené síly. Další významný mezník v oblasti bezpilotních letadel byl zaznamenán bratry Montgolfierovými, kteří v roce 1783 přestavili svůj horkovzdušný balón. V moderní době bezpilotní letadlo znamená autonomní nebo dálkově ovládané letadlo schopné napodobovat manévry posádky. V průběhu let došlo i ke změnám v názvech těchto zařízení. V raných dobách letectví měla idea létání bez posádky značný potenciál, a to především proto, že konstruktéři těchto létajících zařízení, kterých v té době ještě nebylo mnoho, nemuseli riskovat své životy při testech svých výtvorů. Příkladem může být letecký průkopník Otto Litienthal, který okolo roku 1890 pracoval na vývoji bezpilotního kluzáku. Jeho testy se samozřejmě neobešly bez mnoha nehod, ty však díky nepřítomnosti posádky neznamenaly úmrtí či zranění osob. Ačkoliv byly metody bezpilotních letadel vyzkoušeny, nedostatek technických možností v počátcích letectví nakonec donutil konstruktéry využít první testovací piloty. [2]

Během první světové války, konkrétně v roce 1916, kdy již měla americká armáda k dispozici dálkově ovládané torpédo, došlo ve věci k dalšímu pokroku spočívajícímu ve vývoji malého letounu, který by byl schopný nést trhavinu a bez posádky na palubě s dostatečnou přesností zasáhnout cíl. Vzhledem k tomu, že první letoun schopný vzletu i přistání byl vyvinut o pouhých 13 let dříve, byl tento nápad více než ambiciózní. Nicméně, využitím primitivních technologií jakým je tříosý setrvačníkový stabilizátor, jednoduché rádio, a tehdy ještě rozměrné baterie, se po mnoha nevydařených pokusech, při kterých se postupně pokazilo doslova vše, co se pokazit mohlo, podařilo letounu uletět 1000 metrů stabilním letem na zamýšlený cíl a následně přistát. Tento úspěch stál za zrozením prvního bezpilotního letounu, který nesl název Curtis N-9 Aerial torpedo (obrázek č.1). [2]

V meziválečném období došlo k dalšímu zdokonalování bezpilotních letadel. Jejich využití bylo stále primárně pro vojenské účely, zejména pro dálkové útoky na bitevní plavidla. Příkladem takového stroje byl N2C-2 Target Drone (obrázek č.2), který byl vyvinut ve třicátých letech a byl ovládaný posádkou druhého letounu, která se držela v jeho blízkosti. [2]

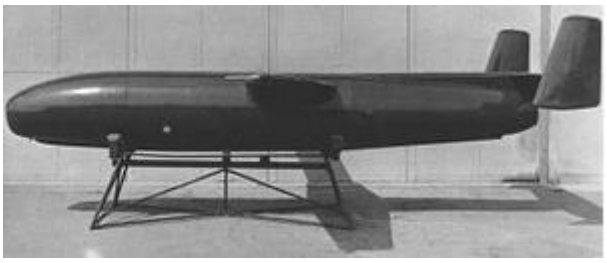
Obrázek č.1 Curtis N-9 Aerial torpedo [2]

Obrázek č.2 N2C-2 Target Drone [2]

S příchodem druhé světové války došlo ke vzniku zřejmě nejznámějšího bezpilotního a zároveň autonomního letounu. Jedná se o německou střelu V-1. Jde zároveň o první, masově vyráběný bezpilotní letoun, kdy celkový počet vyrobených V-1 přesáhl číslo 25 000. [2] Hlavním účelem V-1 bylo odstřelování Velké Británie přímo z odpalovacích ramp, které byly umístěny v severní Francii. Základem V-1 byl robustní trup, který byl částečně odolný vůči střelám nepřátelského letounu. Na horní část trupu byl usazen pulzní motor, jenž svým charakteristickým zvukem jistě naháněl strach obyvatelům Londýna ještě dlouhou dobu po válce.

Obrázek č.3 střela V-1 [2]

Po druhé světové válce se účel bezpilotních letadel začíná pozvolna měnit. Až do této chvíle byl vývoj zaměřen především na zasažení nepřátelského cíle. Se začátkem studené války se využití bezpilotních letadel velmi rychle mění pro špionážní využití, což umožnil i velký pokrok ve vývoji navigačních a špionážních prostředku. Jedním z vůbec prvních špionážních bezpilotních letounů byl YQ-1B, schopný nést výkonnou kameru a pořizovat snímky z velkých výšek. YB-1B (obrázek č.4) byl primárně vynesen jiným letounem a poté spuštěn do akce. [2]



Obrázek č. 4 YB-1B [2]

Během 60. a 70. let se v menší míře začínají využívat bezpilotní letadla pro rušení pozemních radarů. Z důvodu své malé účinnosti jsou však brzy vyřazeny ze služby. Mnohem větší úspěch byl zaznamenán v dálkových a vysokorychlostních bezpilotních letadlech. Jedním z příkladů je Ryan model 147, který byl později přejmenován na AQM-34 (obrázek č.5). Byl poháněn proudovým motorem, který dával letounu schopnost dosáhnout rychlosti 1100 kilometrů za hodinu a výšky 15 500 metrů. Smyslem a účelem prvních variant tohoto stroje byla špionáž.

Obrázek č.5 AQM-34 [2]

Obrázek č.6 QH-50 DASH [2]

Ve svém vývoji nezůstaly pozadu ani bezpilotní rotorová letadla. Mezi první patří QH-50 DASH (obrázek č.6). Jeho hlavním využitím byla protiponorková ochrana, kdy po vypátrání ponorky vzlétnul z plavidla a na cíl shazoval torpéda. Ačkoliv jeho akční rádius byl pouhých pět námořních mil, byl tento dron účinně nasazen v mnoha zemích.

V novém tisíciletí se vývoj bezpilotních letadel začal zaměřovat především na menší zařízení, která jsou kompaktnější, levnější a využívají miniaturních počítačových čipů. Pro ovládání UAS se rovněž začal aktivně používat GPS signál. Díky tomuto vývoji se UAS začaly využívat i pro mnoho dalších účelů, zejména těch rekreačních. [2]

1.3 Rozdělení bezpilotních letadel

Existuje poměrně velké množství kategorií, do kterých můžeme bezpilotní systémy rozdělit, níže jsou uvedeny nejzákladnější kategorie.

1.3.1 Rozdělení podle velikosti

Ačkoliv se všechny bezpilotní systémy skládají z několika různých komponentů, rozdělujeme je podle velikosti v závislosti na parametrech bezpilotního letadla. S vývojem nových technologií, které umožňují výrobu stále menších bezpilotních letadel, a z toho vyplývající změny v definicích se následující rozdělení dá vnímat spíše jako přibližné.

HALE High altitude long endurance [4]

Rozpětí křídel větší než 35 metrů. Dostup více než 15 000 metrů a výdrž více než 24 hodin. Jsou schopny vykonávat extrémně dlouhé špionážní lety.

MALE Medium altitude long endurance [4]

Rozpětí křídel je menší než 35 metrů. Dostup v rozmezí 5 000 až 15 000 metrů a výdrž menší než 24 hodin. Jejich účel je podobný jako u HALE.

TUAV Medium Range nebo Tactical UAV [4]

Bezpilotní systémy s doletem v rozmezí 100–300 km. Rozpětí křídel menší než 35 metrů, jsou však zpravidla menší než HALE nebo MALE.

Close-Range UAV [4]

Využívány primárně mobilními vojenskými jednotkami nebo pro civilní účely. Dolet nepřesahuje 100 km. Ve vojenském odvětví se jedná o nejrozšířenější bezpilotní systém.

MUAV nebo Mini UAV [4]

Vztahují se k UA, které mají méně než 20 kg, nejsou však tak malé jako MAV. Jsou schopny operovat do vzdáleností okolo 30 km a jejich využití je již značně rozsáhlé.

Micro UAV nebo MAV [4]

MAV původně definovány jen jako UAV, nepřekračují rozpětí větší než 150 mm. Jedná se především o multikoptéry, jejichž hlavní výhodou je schopnost „viset“ ve vzduchu.

NAV Nano Air Vehicles [4]

Tato miniaturní bezpilotní letadla jsou, navrženy tak aby jejich velikost nepřesahovala více než 40 mm. Používají se v „rojích“ pro zmatení radarů nebo pro špionáž na krátké vzdálenosti.

1.3.2 Rozdělení podle využití

Využití bezpilotních systému je v poslední době velice rozmanité, proto uvádím pouze nejzákladnější odvětví:

Civilní využití [4]

- Letecké fotografie, natáčení
- Meteorologické služby (analýza atmosféry pro předpovědi počasí)
- Policie (hledání nezvěstných osob, sledování nehod)
- Průzkumné využití (geografické, geologické, archeologické výzkumy)

Vojenské využití [4]

- Špionážní bezpilotní systémy
- Systémy pro eliminaci nevybuchlé munice
- Systémy pro rušení rádiových systémů
- Bojové bezpilotní systémy

1.3.3 Rozdělení podle typu konstrukce

Bezpilotní letadla se z hlediska konstrukce dají rozdělit na bezpilotní letadla s pevným křídlem a multikoptéry. Multikoptéry můžeme dále rozdělit podle počtu rotorů.

UA s pevným křídlem

Multikoptéry

- Trikoptéry (3 nosné vrtule)
- Kvadrokoptéry (4 nosné vrtule)
- Hexakoptéry (6 nosných vrtulí)
- Oktokoptéry (8 nosných vrtulí)

1.3.4 Rozdělení dle české legislativy

Bezpilotními systémy se zabývá předpis L2, Doplněk X, který bezpilotní systémy rozděluje podle obrázku č.7. Tabulka obsahuje také legislativní požadavky na pilota UAS nebo jejich vybavení.

ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 25 kg		> 25 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití ---------- požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LCPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004[1]	ne / 1	dle nař. č. 785/2004[1]	ne / 3 od 20 kg dle nař. č. 785/2004 [1]	dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe" systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

Obrázek č.7 Rozdělení UAS podle Doplňku X [1]

1.4 Vzdušný prostor vyhrazený pro UAS

Vzdušný prostor je trojrozměrná část atmosféry rozdělená do určitých tříd, podle účelu jejich používání. Každá třída vzdušného prostoru má svoje přesně definované hranice a požadavky, které musí letoun splňovat před tím, než do konkrétního prostoru vstoupí. Z důvodu velkého nárůstu počtu bezpilotních systémů bylo nutné určit pravidla provozu UAS v jednotlivých třídách.

1.4.1 Rozdělení vzdušného prostoru

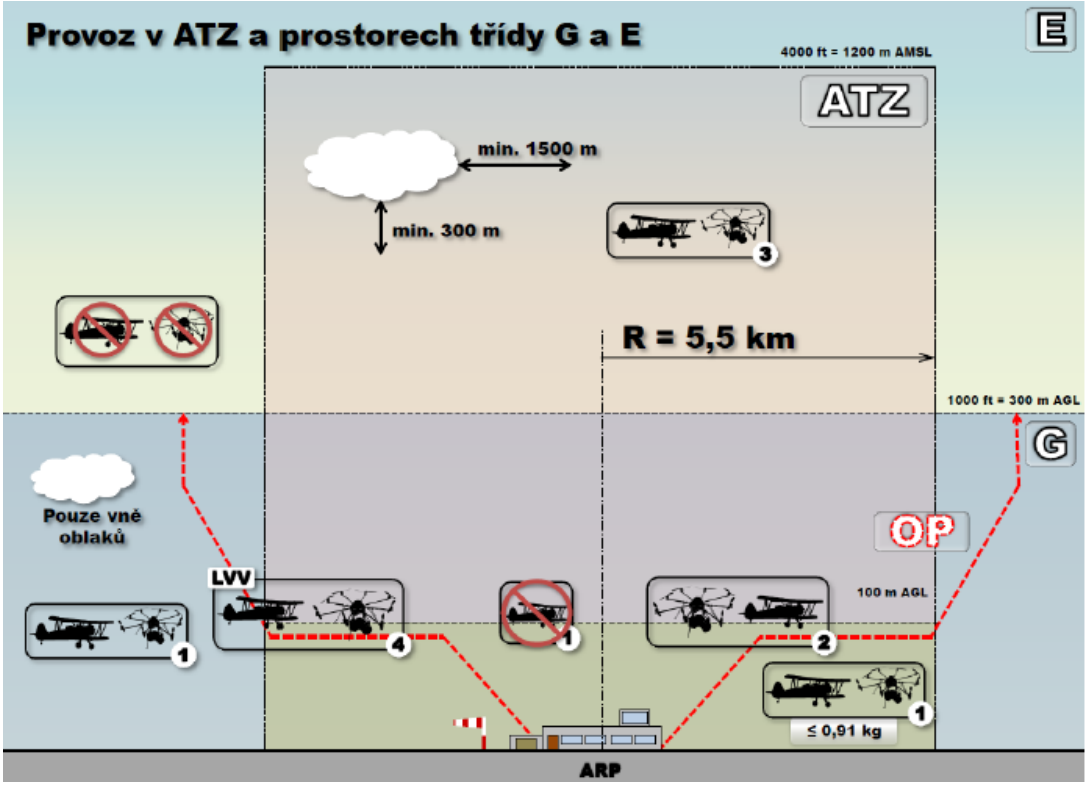
Vzdušný prostor se rozděluje do tříd uvedených na obrázku č.8. V České republice jsou využívány pouze třídy vzdušného prostoru: C, D, E, G.

Třída	Rozstupy zajišťované letům VFR	Poskytované ATS	VMC minima letové dohlednosti a vzdálenosti od oblaků	Omezení rychlosti	Požadavky na rádiové spojení	Podléhá letovému povolení
C	od provozu IFR	služba ATC pro zajištění rozstupu od IFR letů informace o provozu VFR (na žádost rada k vyhnutí)	v a nad FL 100 8 km letová dohlednost, 1500 m horizontální a 1000 ft (300 m) vertikální vzdálenost od oblaků pod FL 100 5 km letová dohlednost, 1500 m horizontální a 1000 ft (300 m) vertikální vzdálenost od oblaků	250 KT IAS pod FL 100 (pouze lety VFR)	stálé obousměrné	Ano
D	nezajišťují se	Informace o provozu mezi VFR a IFR lety (a na žádost provozní informace vyhnout se provozu)	v a nad FL 100 8 km letová dohlednost, 1500 m horizontální a 1000 ft vertikální vzdálenost od oblačnosti pod FL 100 5 km letová dohlednost, 1500 m horizontální a 1000 ft vertikální vzdálenost od oblačnosti	250 KT IAS pod FL 100	stálé obousměrné	Ano
E	nezajišťují se	Informace o provozu, pokud je to možné.	5 km letová dohlednost 1500 m horizontální a 1000 ft vertikální vzdálenost od oblačnosti	250 KT IAS	Ne	Ne
G	nezajišťují se	letová informační služba	1500 m letová dohlednost mimo oblačnost za dohlednosti země, při rychlostech, které při převládající dohlednosti poskytnou přiměřenou možnost spatřit jiný provoz nebo překážky v čase, který dovolí vyhnout se srážce, nebo; za okolností, při kterých pravděpodobnost setkání s jiným provozem by měla být malá, např. v prostorech s malou hustotou provozu.	250 KT IAS	Ne	Ne

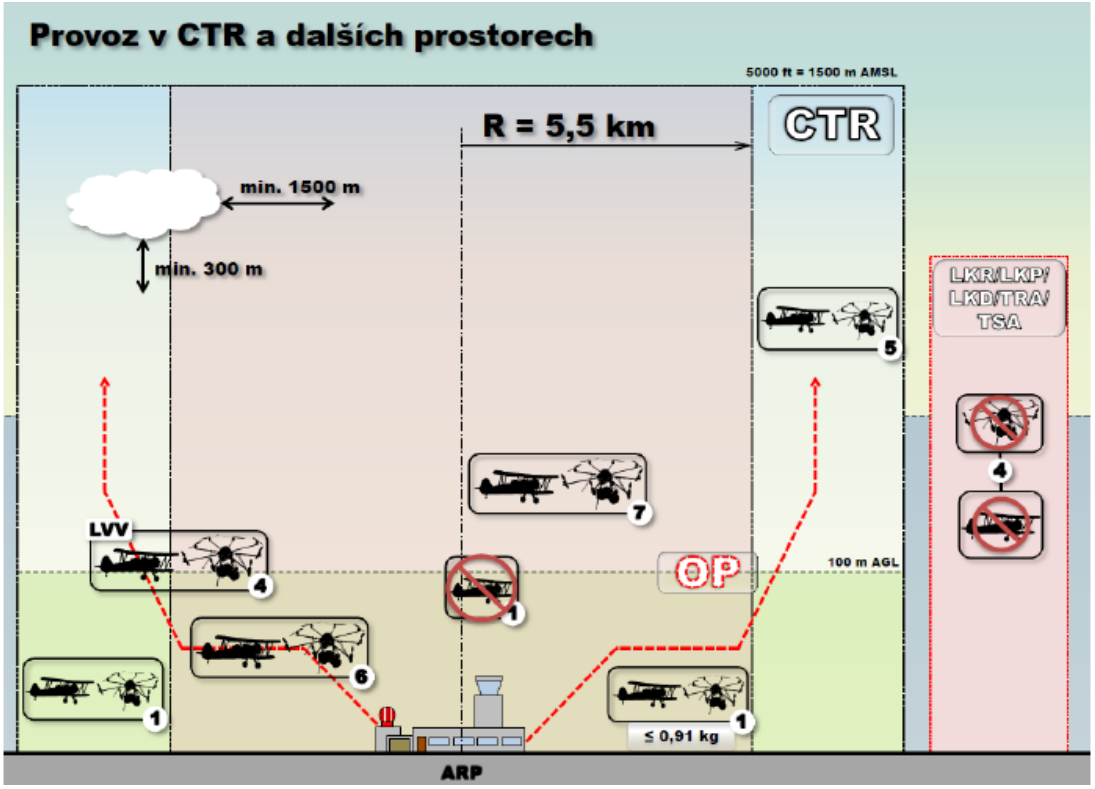
Obrázek č.8 Rozdělení vzdušného prostoru [5]

1.4.2 Vzdušný prostor vyhrazený pro bezpilotní letadla

Legislativními požadavky se v České republice zabývá předpis L2, Doplněk X. Jeho část je obsažena i na obrázku č.7. Dále jsou v tomto předpise přesně definovány prostory, ve kterých se může UA pohybovat. Obecně se může UA pohybovat v třídě prostoru G, a v zóně ATZ při splnění podmínek provozovatele. V obrázku č. 9 je grafické znázornění možnosti pohybu UA v třídě G a ATZ, na obrázku č.10 možnost pohybu v CTR.



Obrázek č.9 Provoz UAS v třídách G, E a ATZ [1]



Obrázek č.10 Provoz UA v CTR/MCTR [1]

Legenda k obrázkům 1 a 2:

Modely letadel s maximální vzletovou hmotností do 25 kg

Bezpilotní letadla (tj. včetně modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nad 25 kg)

CTR	Řízený okrsek letiště	**LKR**	Omezený prostor
ATZ	Letištní provozní zóna neřízeného letiště	**LKP**	Zakázaný prostor
OP	Ochranná pásma letišť	**LKD**	Nebezpečný prostor
G / E	Označení třídy vzdušného prostoru	**TSA**	Dočasně vyhrazený prostor
ARP	Vztažný bod letiště	**TRA**	Dočasně vymezený prostor
AMSL	Nadmořská výška	**AGL**	Nad úrovní země

1	Lety bez koordinace
2	Splnění podmínek provozovatele letiště (PL) + koordinace s letištní informační službou (AFIS)
3	Splnění podmínek PL + koordinace s AFIS
4	Souhlas/povolení ÚCL
5	Letové povolení příslušného stanoviště řízení letového provozu (ŘLP). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
6	Povolení ÚCL (nebo v případě leteckých prací (LP) koordinace s ŘLP + koordinace s PL). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
7	Povolení ÚCL (nebo v případě LP koordinace s ŘLP + koordinace s PL) + letové povolení ŘLP. ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru

Obrázek č.11 Legenda k obrázkům č.9 a č.10 [1]

Značná část pilotů bezpilotních systémů, zejména těch, kteří využívají malá bezpilotní letadla, pro rekreační využití, není s těmito prostory a pravidly vůbec seznámena. Z toho pramení zvýšený výskyt incidentů, zejména v blízkosti řízených letišť. Jsou však zaznamenány i případy, kdy došlo k záměrnému vniknutí bezpilotních letounů do řízených prostorů letiště, za účelem narušení letového provozu. Riziko vzniku incidentů může nastat i u pilotů UAS, kteří jsou s pravidly pro létání s bezpilotními systémy seznámeni, stejně tak jako s rozdělením vzdušného prostoru, přesto mohou narušit daný vzdušný prostor, protože odhad vertikálního členění jednotlivých tříd, může být obtížný.

2. Analýza srážky letounu s UA

Podle nejnovějších průzkumu se jen v USA do roku 2020 prodá na 4,7 milionů bezpilotních systémů. [6] Z důvodu takto velkého nárůstu prodeje bezpilotních systémů především za účelem rekreačního využití je nutné s časovým předstihem řešit bezpečnostní, legislativní či technické problémy, které se mohou bezpilotních systémů týkat. Jedním z bezpečnostních problémů je srážka bezpilotního letadla s obchodním letounem. Možné následky takové srážky jsou znepokojujícím otazníkem pro všechny, kteří se v oblasti letectví pohybují. Za účelem dosáhnout určité úrovně bezpečnosti bylo nutné provést výzkumy, pomocí kterých je možné stanovit vážnost kolize mezi bezpilotním letadlem, obchodním letounem nebo objekty na zemi. Dalším využitím výzkumu je možnost změnit materiál určený pro výrobu bezpilotních systémů a zmírnit tak následky kolize. Výzkum srážky bezpilotního letadla s letounem byl proveden FAA, jelikož je však závěrečný dokument velmi obsáhlý je mým cílem zaměřit se na nejzásadnější části dokumentu a shrnout výsledky do stručnější podoby včetně vyvození vlastních závěrů.

Výzkum byl zaměřen na analýzu srážky letounu s multikoptérou a UA s pevným křídlem, s typickým obchodním letounem. V následující kapitole se zaměřím pouze na analýzu srážky multikoptéry, protože právě tento druh bezpilotního letadla nejčastěji způsobuje narušení řízených vzdušných prostorů a vznik incidentů, proto je pravděpodobnost srážky s multikoptérou vyšší než s UA s pevným křídlem. Jedním z příkladů je incident ze září roku 2015, kdy byla multikoptéra spatřena v bezprostřední blízkosti pilotem Boeingu 777, krátce po vzletu z letiště Heathrow. [7]

Výsledky vážnosti kolize jsou založeny na charakteristikách UA, jako například tvar, použitý materiál či kinetická energie a výsledcích testů, provedených podle několika různých scénářů. [8]

2.1 Specifikace UA použitého ve výzkumu

Výzkum univerzity v Montaně došel k závěru, že jedním z nejpoužívanějších bezpilotních systémů je dron značky DJI Phantom. Výrobky této značky pokrývají více než 61% prodeje bezpilotních systému. Z toho důvodu byl pro testy zvolen bezpilotní systém **DJI Phantom 3.** Jedná se o 1,2 kg vážící kvadrokoptéru, určenou pro rekreační a komerční účely, snadno přístupnou pro veřejnost. Trup této kvadrokoptéry je zkonstruován výhradně z polykarbonátu, na konce trupu jsou namontovány čtyři elektromotory a na spodní části trupu je kamera s kovovým krytem. Zdrojem energie je Lithium-Polymerová baterie. Dimenze kvadrokoptéry jsou na obrázku č.12. [8]

Zvolený bezpilotní systém	DJI Phantom 3
Znázornění	
Hmotnost	1,216 g
Rozměry	290x289x186 mm
Max. horizontální rychlost	16.0 m/s
Max. servisní dostup	6,000 m
Baterie LiPo	364 g
Motory - Brushless DC	56 g x 4
Max. rychlost motoru	1,240 rad/s
Kamera	52 g

Obrázek č.12 Dimenze UA [8]

2.2 Specifikace letounů použitých ve výzkumu

Pro výzkum byl zvolen jeden z nejčetnějších dopravních letounů a business jet.

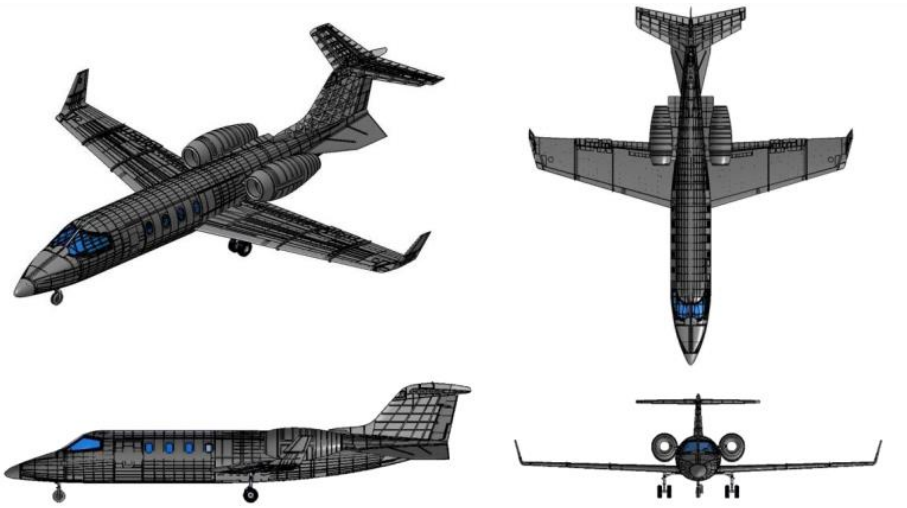
2.2.1 Dopravní letoun

Jako nejvhodnější dopravní letoun byl zvolen Boeing 737, znázorněn na obrázku č.13. Jedná se o úzkotrupý letoun, který je velmi oblíbený na dopravu pro krátké a středně dlouhé lety.

2.2.2 Business jet

Podobným způsobem jako Boeing 737 byl zvolen i Learjet 31A (obrázek č.14), zastupující třídu Business jet. Ačkoliv většina letounů tohoto typu není registrována FAA, jeho hlavní předností je, že má podobné rozměry a další specifikace jako ostatní business jety.

Obrázek č.13 Boeing 737 [8]



Obrázek č.14 Learjet 31A [8]

2.3 Zvolené podmínky testů

Jako nejpravděpodobnější fáze letu dopravního letounu, při které může ke kolizi dojít, se předpokládá vzlet, přistání nebo let ve vyčkávacím obrazci. Pro tyto fáze letu a s ohledem na kategorie letounu uvažovaných v testech, zvažujeme rychlost letounů 200 KIAS, která ve výšce 2 500 stop přibližně odpovídá rychlosti 208 uzlů (107 m/s). Jako nejhorší scénář uvažujeme čelní náraz, přičemž rychlost nárazu jsme schopni získat sečtením relativních rychlostí obou zkoumaných objektů. Výsledná rychlost nárazu poté vznikne sečtením zmíněných 208 uzlů a rychlosti ze specifikace UA v obrázku č.8, dosáhneme výsledku 250 uzlů (128,6 m/s), která je uvažována jako jeden ze vstupních parametrů pro všechny testy.

Dalším studovaným parametrem pro určení nejvážnějšího scénáře je místo kolize na dopravním letounu a orientace UA při nárazu. Pokud prozatím zanedbáme srážku UA s vnitřní částí motoru dopravního letounu, vyplývá z výzkumu, že nejhorším scénářem je, natočení kvadrokoptéry o 45 stupňů (tzn. nejprve bude zasažen jeden z motorů UA) s těžištěm zarovnaným s náběžnou hranou cíle a nárazem přesně mezi žebra křídel dopravního letounu. Z výzkumu bylo zjištěno že právě tyto podmínky dokáží způsobit největší poškození a závady komponentů letounu. [8]

2.4 Hodnocení výsledků testů

Pro stanovení vážnosti kolize a následků způsobených nárazem, bylo nezbytné stanovit několik kategorií, do kterých můžeme přiřadit jednotlivé testy podle úrovně či popisu poškození.

Nejnižším stupněm poškození je **Kategorie 1,** která představuje minimální úroveň poškození zaznamenanou v oblasti nárazu.

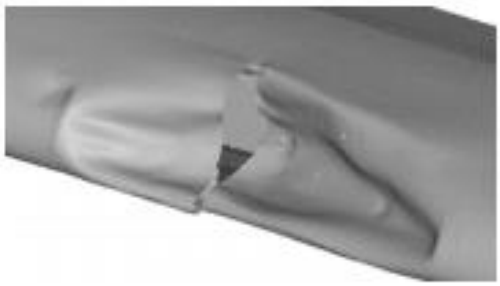
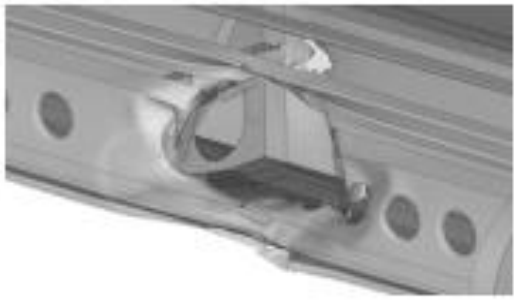
Kategorie 2 již představuje značné viditelné poškození vnějšího povrchu náběžné hrany, nedochází však k úplnému narušení potahu.

Kategorie 3 je popsána jako poškození, při kterém dochází k trhlině v potahu a vzniká pravděpodobnost proniknutí cizího tělesa do konstrukce křídla.

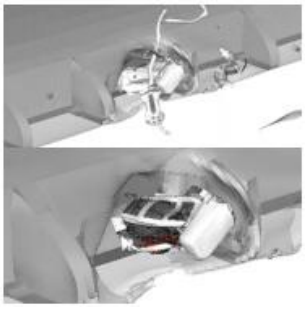
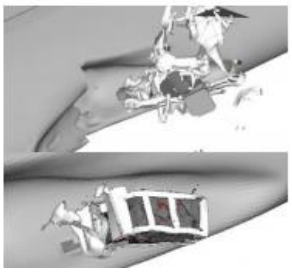
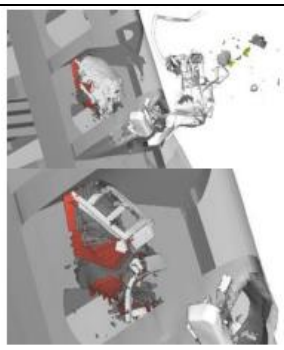
Poslední a nejhorší je **Kategorie 4**, při níž dochází ke všem výše zmíněným následkům stejně jako k poškození vnitřních komponentů jako jsou například žebra, a možnost narušení primárních částí konstrukce. Pro lepší názornost rozsahu poškození je k dispozici níže uvedená tabulka č.1.

Při testech bylo nutné brát zřetel i na riziko vzplanutí baterie UA. Tabulka č.2 představuje kritéria použitá ve výzkumu. Kolonka „Riziko požáru“ indikuje spíše teoreticky možný následek než jisté vzplanutí. Pro přesnější určení rizika by totiž bylo zapotřebí podstatně větší množství uskutečněných testů. Hlavním závěrem těchto testů je zjištění, že riziko vzniku požáru baterie je nepřímo úměrné rychlosti nárazu. Větší rychlost nárazu znamená, že dojde k rozpadu baterie, zatímco menší rychlost způsobí, že baterie zůstane v celku, což může mít za následek zahřátí baterie až nad teplotu vzplanutí.

Tabulka č.1 Kategorie poškození [8]

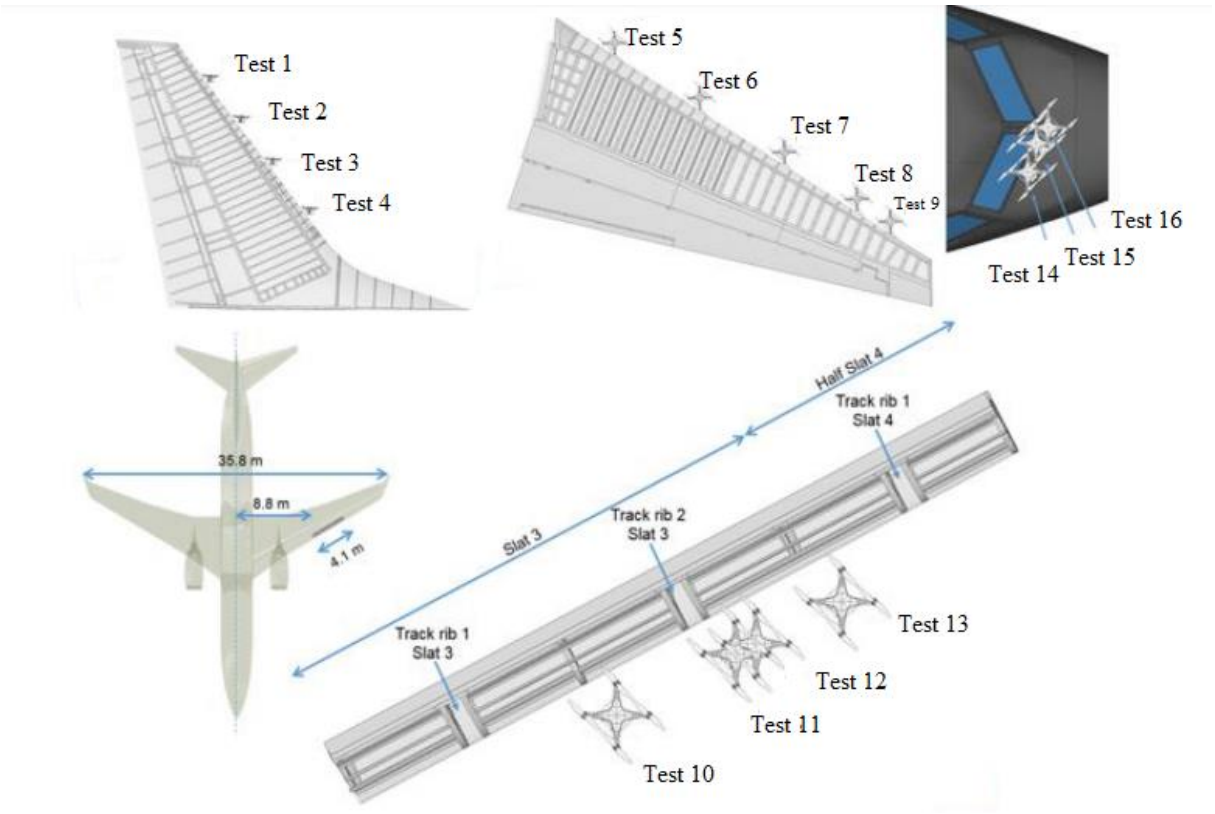
	Popis	Příklad
Kategorie 1	• Konstrukce je nepoškozená • Nepatrné deformace	
Kategorie 2	• Rozsáhlé deformace vnějšího povrchu • Riziko poškození vnitřní konstrukce • Potah není protržen	
Kategorie 3	• Protržení potahu • Vniknutí části UA do vnitřní části konstrukce	
Kategorie 4	• Vniknutí UA do konstrukce a její následné poškození	

Tabulka č.2 Riziko požáru baterie [8]

Riziko požáru	Popis	Příklad
Ano	• UA včetně baterie pronikne konstrukcí • Baterie je deformována, ale v celku	
Ne	• UA ani baterie neproniknuly do konstrukce	
Ne	• UA včetně baterie pronikne do konstrukce, došlo však k rozpadu baterie	

2.5 Analýza srážky dopravního letounu s UA

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, pro výzkum byl zvolen letoun Boeing 737. Během výzkumu se testovaly nejkritičtější a zároveň velmi důležité části letounu: Náběžná hrana vodorovných ocasních ploch, kýlovka, náběžná hrana křídel a čelní sklo letounu. Bylo učiněno 16 simulovaných nárazů UA, o hmotnosti 1,2 kg, jejichž další specifikace jsou v kapitole 2.1, a nárazové rychlosti 250 uzlů (463 km/h). Obrázek č.15 znázorňuje místa kolize a orientaci UA.



Obrázek č.15 Místa kolize UA [8]

	Dopravní letoun Boeing 737															
	Kýlovka				Náběžná hrana vodorovných ocasních ploch					Náběžná hrana křídla				Čelní sklo		
Číslo testu	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12	Test 13	Test 14	Test 15	Test 16
Úroveň poškození	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 4	Kategorie 4	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2
Riziko požáru	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne

Obrázek č.16 Výsledky testu [8]

Obrázek č.16 znázorňuje následky nárazu UA pro vybrané části dopravního letounu, dále pak riziko vzplanutí baterie.

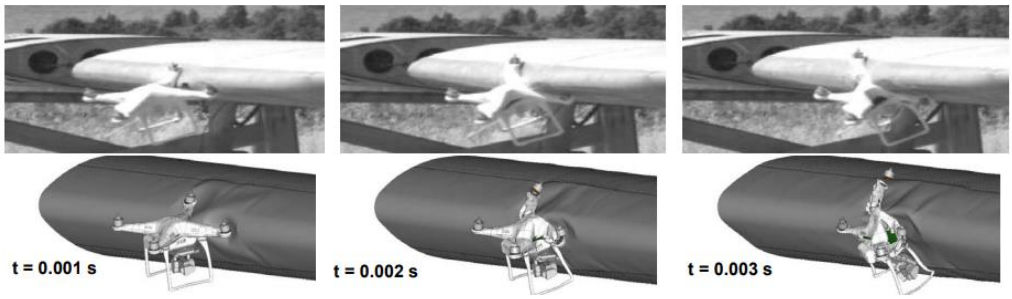
2.5.1 Závěr analýzy srážky UA s dopravním letounem

K závěru výzkumu srážky dopravního letounu s UA lze říci, že k největšímu poškození došlo na náběžné hraně vodorovných ocasních ploch. Konkrétněji můžeme posoudit, že nejhůře dopadl test číslo 7, kde bylo dosaženo poškození kategorie 4 a současně vzniklo riziko vzplanutí baterie. Následky takové srážky by mohly vést až k proniknutí UA k hydraulickým obvodům, které jsou umístěny právě za náběžnou hranou ocasní plochy, k jejich poškození a případnému úniku hydraulické kapaliny. V takovém případě by došlo ke značnému snížení bezpečnosti letu. Dalším nebezpečným vlivem při poškození náběžné hrany je narušení mezní vrstvy, která obtéká profil, a následné snížení záporného vztlaku, jenž na vodorovných ocasních plochách vzniká.

Méně vážná poškození vznikla na kýlovce a náběžné hraně křídla, kde bylo dosaženo nejvýše kategorie 3, z čehož vyplývá, že kvadrokoptéra protrhla potah letounu, a některé její části prošly do vnitřní konstrukce, neměly však dostatek energie na způsobení větších škod. Vliv na bezpečnost by v tomto případě neměl být příliš velký, protože hlavním problémem vzniklým po této kolizi by mohlo být narušení mezní vrstvy a částečná ztráta vztlaku, ale vzhledem k poměru poškozené plochy a celkové plochy křídla, můžeme usoudit, že nedojde ke značnému ohrožení letu. Podstatnějším následkem budou v tomto případě náklady na opravu poškozeného letounu. Kolize je znázorněna na obrázku č.17.

Nejméně poškozenou částí je čelní sklo letounu, které dosáhlo kategorie 2, což znamená, že nedošlo k vážnému poškození skla. Tento výsledek je dán především značnou pevností čelních skel letounu a také faktem, že UA narazil na sklo pod větším úhlem, takže došlo ke „sklouznutí“ UA.

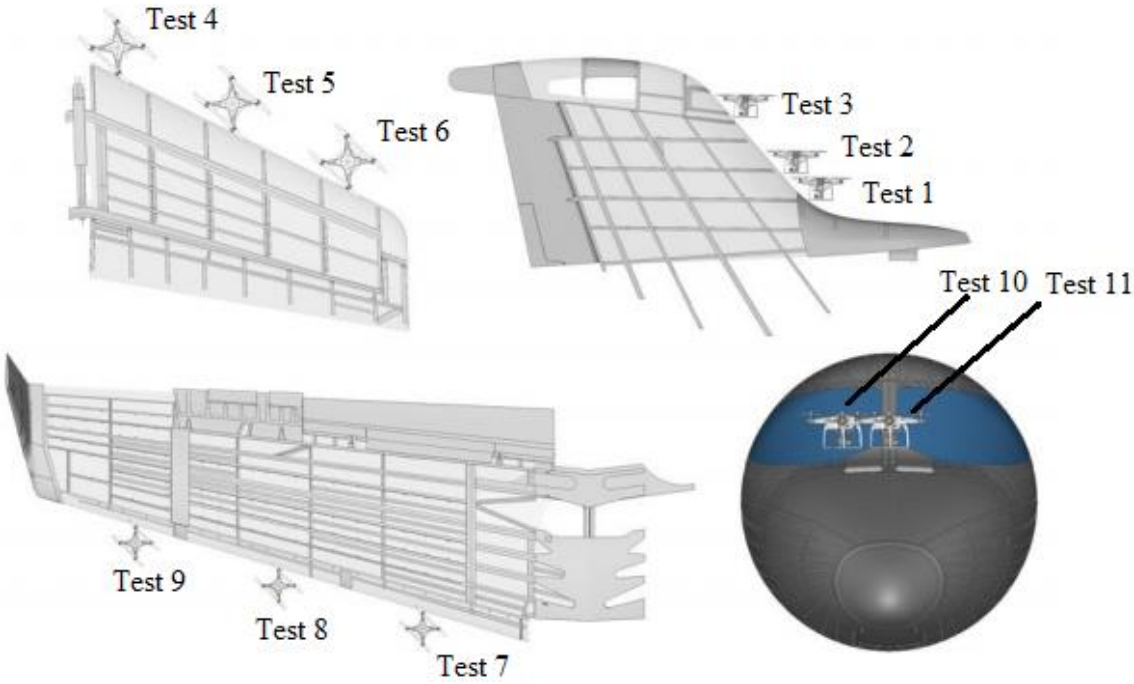
Rád bych poznamenal, že kategorie 4 je v tomto případě ve své podstatě rovna vážnosti poškození jako u kategorie 3. U obou kategorií by došlo k proniknutí části UA do kokpitu, což by při stále přetlakované kabině mohlo mít fatální následky.



Obrázek č.17 Kolize UA s náběžnou hranou křídla [8]

2.6 Analýza srážky Business Jetu s UA

Stejně jako u předchozího výzkumu, i u business jetu byly kolize provedeny na vodorovných ocasních plochách, vertikálním stabilizéru a čelním skle. Pro výzkum byl uvažován letoun Learjet 31A a stejné podmínky nárazu. Jedním z rozdílů oproti předchozímu výzkumu je rozdílný počet provedených simulovaných testů. Pro business jet jich bylo provedeno, z důvodu menších testovacích ploch, pouze 11. Obrázek č.18 znázorňuje místa kolize a orientaci UA.



Obrázek č.18 Místa kolize UA na business jetu [8]

	Business Jet										
	Kýlovka			Náběžná hrana vodorovných ocasních ploch			Náběžná hrana křídel			Čelní sklo	
Číslo testu	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	Test 11
Úroveň poškození	Kategorie 3	Kategorie 3	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 4	Kategorie 3	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2
Riziko požáru	Ano	Ne	Ne	Ano	Ne	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne

Obrázek č.19 Výsledky testů druhého výzkumu [8]

2.6.1 Závěr analýzy srážky UA s Business jetem

Podobně jako u dopravního letounu nejvíce škod utrpěly vodorovné ocasní plochy, na kterých byla zaznamenána dvě poškození kategorie 4 a jedno kategorie 3, ve všech případech se dá předpokládat, že by mohlo dojít k vážnému narušení vnitřní struktury, včetně možného narušení hydraulických obvodů. Podstatně větší pozornost by v tomto případě měla být věnována, na narušení obtékání mezní vrstvy profilu, protože celková plocha vodorovných ocasních ploch je nezanedbatelně menší než u dopravních letounů, zatímco plocha narušená kolizí s UA zůstává stejná. Z toho vyplývá větší ztráta záporného vztlaku na vodorovných ocasních plochách a celkové snížení ovladatelnosti a stability letounu.

Testy provedené na kýlovce a náběžné hraně křídla dopadly téměř stejně, poškození dosáhlo kategorie 2 a kategorie 3. Porovnáním s dopravním letounem můžeme usoudit, že business jet byl následkem kolize poškozen méně. Při testech 3, 8, 9, nedošlo ani k proniknutí UA do konstrukce letounu, zatímco u dopravního letounu pronikly části UA do konstrukce kýlovky a křídel, ve všech testech s výjimkou jednoho. Důvodem pro tento výsledek může být, že na business jetu jsou žebra konstrukce umístěna blíže k sobě, to znamená, že absorbují část energie, kterou by jinak přenášel výhradně potah křídla.

Vyhodnocení následků nárazů na čelní sklo letounu je v podstatě stejné jako u dopravního letounu. Úroveň poškození dosáhla kategorie 2, to znamená, že nedošlo k výraznějšímu poškození či proniknutí UA do kokpitu.

Bez povšimnutí nesmí zůstat výsledky zaměřené na riziko vzplanutí baterie. Z výsledků vyplývá, že při čtyřech testech došlo k proniknutí baterie do vnitřní části konstrukce, přičemž baterie byla pouze částečně poškozena. [8] Tyto podmínky mohou vést k potenciálnímu nebezpečí vzplanutí baterie uvnitř konstrukce.

Pro všechny provedené testy na obou typech letounů platí, že největší škody způsobily komponenty UA jako jsou motory, baterie, nebo kamera. Náraz těchto komponentů z velké části zapříčinil narušení potahu letounů a následné vniknutí do vnitřní části konstrukce. Tento fakt také potvrdil výzkum prováděný na jednotlivých komponentech v příloze [8].

2.7 Porovnání srážky ptáka a UA s letounem

Tato studie byla vykonána za účelem zjištění, zda srážka bezpilotního letadla s dopravním letounem, může být svými následky ekvivalentní srážce ptáka s dopravním letounem. Pro výzkum byla jako náhrada živého ptáka použita želatinová náhrada ve tvaru kužele, který je na obou koncích zakončen polokoulí. [8] Pro zjednodušení budu tuto náhradu v dalším textu označovat slovem „**model**“. Hmotnost modelu je ekvivalentní hmotnosti UA. Model je vytvořen tak, aby co nejvěrohodněji napodoboval kolizi ptáka s letounem. Jako bezpilotní letadlo byl opět použit **DJI Phantom 3**, jehož parametry zůstávají nezměněny a jsou k dispozici na obrázku číslo 8. Stejné byly také podmínky a parametry, za kterých byly kolize uskutečněny viz. odstavec 2.3.

Výzkum byl opět proveden na vybraných částech dopravního letounu Boeing 737 a business jetu Learjet 31A. Testy byly prováděny na stejných částech letounů jako v předchozím výzkumu. Pro porovnání byl z předchozího výzkumu zvolen vždy test s nejhorší úrovní poškození pro danou část. Na stejném místě byl poté proveden i test kolize modelu. [8] Výsledky testů jsou na obrázku č.20

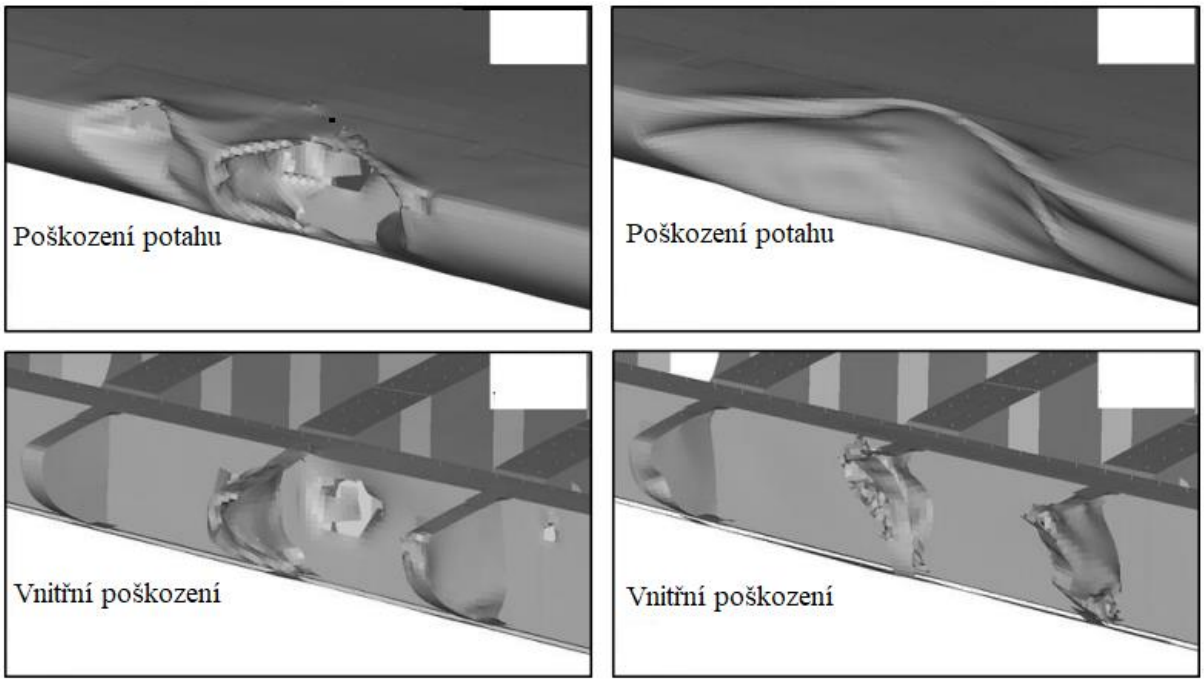
	Dopravní letoun Boeing 737				Business jet Learjet 31A			
	Kýlovka	Náběžná hrana vodorovných ocasních ploch	Náběžná hrana křídla	Čelní sklo	Kýlovka	Náběžná hrana vodorovných ocasních ploch	Náběžná hrana křídla	Čelní sklo
UAS (1.2 kg)	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 3	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 3	Kategorie 2
Model ptáka (1.2 kg)	Kategorie 3	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 1

Obrázek č.20 Vyhodnocení [8]

Na první pohled můžeme vyhodnotit, že náraz ptáka o stejné hmotnosti jako UA nedosahuje takového rozsahu poškození. Z testů vyplývá, že nejhorší dosažená úroveň je kategorie 3, kterou utrpěla kýlovka dopravního letounu. U tohoto testu nedošlo k protržení potahu, vnitřní část konstrukce však byla částečně narušena (viz. obrázek č.22). [8]

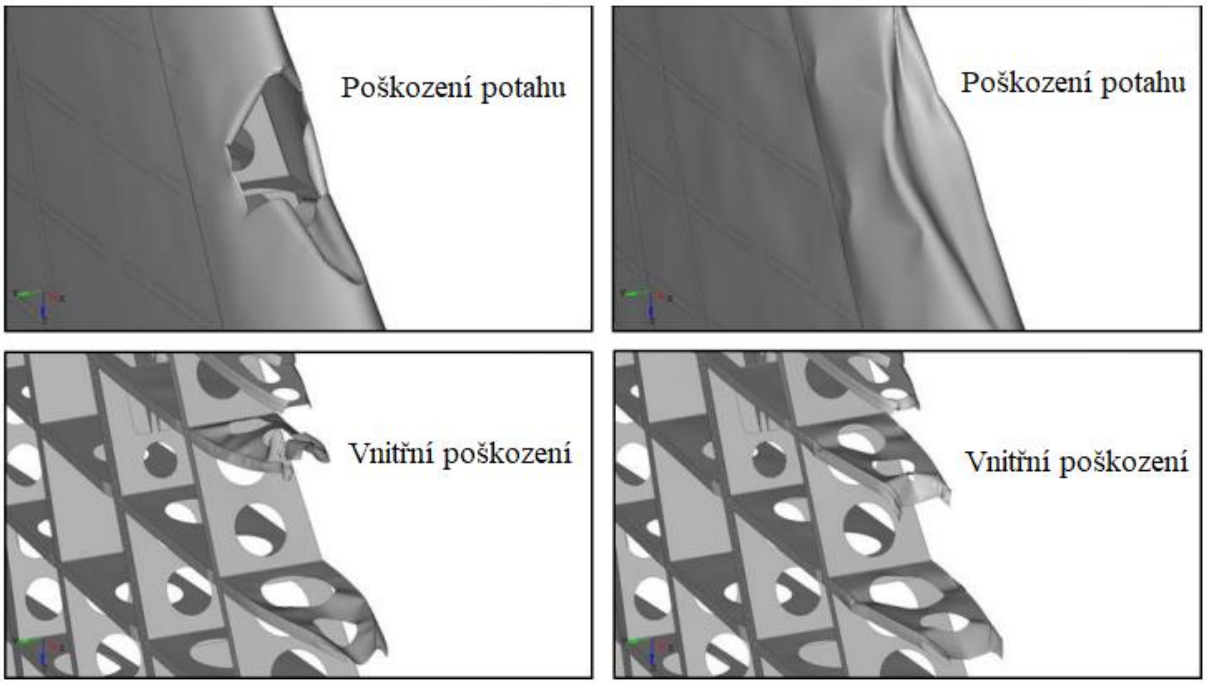
Na všech dalších částech, kromě čelního skla, došlo k poškození kategorie 2, což znamená, že potah byl značně deformován, k jeho proražení ale nedošlo.

Zajímavé je porovnání testů náběžných hran vodorovných ocasních ploch, jak pro dopravní letoun, tak pro business jet. Zatímco kolize s UA způsobila poškození kategorie 4, došlo tedy k proražení potahu a následné deformaci vnitřní konstrukce, kolize s modelem ptáka způsobila podstatně menší škody. Znázornění výsledku konkrétního testu je na obrázku č.21.



Obrázek č.21 Porovnání poškození na vodorovných ocasních plochách dopravního letounu (nalevo poškození od UA, napravo poškození od modelu ptáka) [8]

Z pravé části obrázku č. 21 je patrné, že při kolizi ptáka dochází při nárazu k mnohem rovnoměrnějšímu rozložení sil na náběžnou hranu, což má za následek větší rozměr narušené plochy, než při nárazu UA. Ačkoliv je poškozená plocha větší, nepředstavuje tak vážné ohrožení letu jako při nárazu UA, neboť nedochází k poškození vnitřní části konstrukce. V levé dolní části obrázku č.14 je patrné, že došlo k proražení nejen potahu, ale i příčníku. Za předpokladu, že by protržení způsobila baterie UA, která by následně vzplála, toto riziko bylo potvrzeno analýzou 2.6, mohlo by dojít k rozšíření požáru a v konečném důsledku k letecké nehodě.



Obrázek č.22 Porovnání poškození na kýlovce dopravního letounu
(nalevo poškození od UA, napravo poškození od modelu ptáka) [8]

Úroveň poškození po srážce s modelem ptáka byla pro kýlovku (obrázek č.22) dopravního letounu vyhodnocena jako kategorie 3, důvodem je patrné poškození vnitřní konstrukce, které u dalších testů nebylo v takové míře zaznamenáno. Přesto, že kategorie 3 může mít na bezpečnost letu značný vliv, reálné následky kolize by s největší pravděpodobností nebyly nijak závažné, protože nedošlo k proražení potahu náběžné hrany. K této teorii přispívá také fakt, že těsně za náběžnou hranou kýlovky nejsou umístěny žádné nezbytně nutné prvky letounu jako například hydraulické obvody.

Zbytek provedených testů dopadl v podstatě totožně, jak pro dopravní letoun, tak pro business jet. V dalším výzkumu, který jsem ve své práci nerozebíral, byly porovnávány testy kolize UA a modelu ptáka, oba o hmotnosti 1,8 kg. [8] Za podmínek uvedených v kapitole 2.3 z těchto testů vyplývá, že vážnost poškození je téměř identická, jako pro objekty s hmotností 1,2 kg, přičemž rozsah poškození byl větší, úměrně nárůstu hmotnosti UA a hmotnosti modelu ptáka.

2.8 Porovnání s výsledky Dyatonské univerzity

Dyatonská univerzita se podobně jako FAA zajímala výzkumem kolize bezpilotního letadla s letounem. Jejich hlavní motivací pro uskutečnění tohoto výzkumu byla kolize vojenského vrtulníku s kvadrokoptérou, o které se více zmiňuji v kapitole 4.2.

2.8.1 Podmínky kolize

Kolize byla uskutečněna s kvadrokoptérou **DJI Phantom 2**. Hlavním změnou v parametrech oproti DJI Phantom 3 je její hmotnost, která je rovna 1 kg. Cílem nárazu byla náběžná hrana křídla letounu Mooney M20, což je malý letoun spadající do kategorie letounů s MTOM do 5700 kg. Rychlost srážky byla 238 uzlů a kvadrokoptéra v tomto případě nebyla natočena o 45°. [9] Celkově můžeme usoudit, že podmínky nebyly zvoleny tak, aby bylo dosaženo „nejhoršího scénáře“.

2.8.2 Následky kolize

Na obrázku č. 23 je znázorněno poškození způsobené kolizí. Z testu je patrné, že téměř celá kvadrokoptéra pronikla náběžnou hranou do vnitřní části konstrukce. Z těchto následků vyplývá celá řada negativních vlivů na bezpečnost, např. zhoršená stabilita a ovladatelnost letounu, snížení produkovaného vztlaku na poškozeném křídle, možný unik paliva či riziko vzplanutí baterie kvadrokoptéry. Poškození by se dalo kvalifikovat jako kategorie 4.

Obrázek č.23 Následky kolize [9]

2.8.3 Porovnání s výzkumem FAA

Navzdory tomu, že podmínky kolize nebyly stejné, výsledný rozsah poškození můžeme kvalifikovat jako velmi podobný testu č. 6 v případě kolize s business jetem (Obr. 26). Po srovnání testů provedených na náběžné hraně křídla ve výzkumu FAA, můžeme dojít k závěru, že všechny testy dopadly, co se rozsahu poškození týče, lépe. A to i přes to, že byly provedeny při vyšší rychlosti nárazu a s větší hmotností UA. Hlavním důvodem pro tento výsledek je podstatně pevnější konstrukce náběžné hrany dopravního letounu a business jetu oproti letounu Mooney M20.

2.9 Závěr analýzy srážky letounu s UA

Závěr analýzy bych rád popsal položením několika otázek.

- **Jaká je závažnost srážky bezpilotního systému s letounem?** [8]

Z výzkumů vyplývá, že závažnost ovlivňuje velké množství faktorů, jakými jsou: druh letounu vystavený kolizi, druh bezpilotního letadla, hmotnost UA, rozměry UA, rychlost při nárazu, orientace UA při nárazu, úhel dopadu, materiál, ze kterého je zhotoven letoun a UA. V závislosti na těchto faktorech lze dojít k závěru, že v určitém případě může dojít ke srážce, jejíž následky nebudou nikým na palubě letounu ani zaznamenány, a budou objeveny až po přistání, a v jiném případě může náraz vést až k vážné letecké nehodě.

- **Může být srážka UA klasifikována jako podobná srážce s ptákem?** [8]

Moje odpověď zní: „Ne“. Ve všech testech provedených v kapitole 2.7, bylo dokázáno, že kolize UA s letounem způsobí větší úroveň poškození, v některých případech až o dvě kategorie úrovně poškození větší, než je tomu při kolizi s ptákem. Tento závěr platí za předpokladu, že porovnáváme kolizi vzniklou za stejných podmínek (především ekvivalentní hmotnost UA a ptáka). Srážka by neměla být klasifikována jako podobná ani v případě, kdy bychom porovnávali srážku s UA o hmotnosti menší, než by byla uvažovaná hmotnost ptáka. Důvodem je fakt, že i menší UA dokáže proniknout do vnitřní části konstrukce a způsobit zde vážná poškození, zatímco náraz ptáka způsobí „pouze“ větší povrchové deformace.

- **Jaké jsou charakteristiky UA, které by po kolizi s letounem nezapříčinily značné ovlivnění bezpečnosti letu?** [8]

Zejména u multikoptér není odpověď na tuto otázku jednoduchá, protože po svém obvodu mají umístěné elektromotory, které jsou společně s baterií hlavním zdrojem narušení konstrukce letounu. V takovém případě by mohlo být jednou z charakteristik dodatečné obklopení motorů měkkými materiály, které mohou následky nárazu částečně zmírnit pohlcením kinetické energie UA. Tento způsob řešení by samozřejmě zaznamenal pozitivní následky i u srážek UA s objekty na zemi, které jsou zejména v rekreačním létání velmi časté. Výsledkem by bylo i zvýšení odolnosti samotného bezpilotního letadla. Toto řešení se netýká baterie, u kterého by dodatečný obal mohl způsobit nadměrné ohřívání baterie. Problém by mohl nastat i v případě, že by při kolizi obal baterie zabránil jejímu rozdrcení, a zvýšil tak pravděpodobnost vzplanutí baterie.

Při konstrukci UA s pevným křídlem bychom se měli vyhnout umístění motoru, popřípadě kamery, do přední části letounu, neboť v takovém případě, dojde při nárazu k přenesení veškeré energie přes nejtvrdší část (motor) UA a vážnému narušení konstrukce letounu, popřípadě jinému objektu vystavenému nárazu. Ideální charakteristikou UA s pevným křídlem je umístění motoru na křídlo či horní část trupu s tlačnou vrtulí. Pak v počáteční fázi kolize dojde nejdříve k částečnému pohlcení energie „měkkou“ částí UA a v případě nárazu na náběžnou hranu může dojít k odklonění zbytku UA mimo náběžnou hranu.

3. Analýza srážky motoru letounu s UA

Dramatický nárůst počtu UAS a stejně tak zvýšení počtu oznamovaných incidentů znamená zvýšení rizika srážky UA s proudovým motorem, což vede ke značnému znepokojení nejen pro piloty a řídící letového provozu, ale také pro výrobce proudových motorů. Proudové motory jsou aktuálně testovány na zvládnutí nárazů ptáků a kusů ledu, aby bylo zajištěno, že i při určité míře poškození jsou stále provozuschopné a jsou schopny zajistit bezpečné dokončení letu. Testy na náraz UA s motorem se však obvykle při certifikaci neprovádějí. [10] Z důvodu tvrdých částí UA, které způsobují podstatně vážnější míru poškození, není možné považovat srážku ptáka či ledu s motorem za stejně vážnou jako srážku UA s motorem. To vedlo FAA k provedení série testů, které by pomohly určit míru poškození proudových motorů po srážce s UA a podobně jako ve výzkumu provedeným v kapitole 2., rozčlenit jednotlivé testy do kategorií, které vyjadřují závažnost poškození proudového motoru.

Rozsah výzkumu se zaměřuje na testy nárazu kvadrokoptéry, bezpilotního letounu s pevným křídlem a jejich komponentů, na lopatky a kužel proudového motoru, v nejkritičtějších fázích letu a zároveň i ve fázích, kdy je pravděpodobnost srážky nejvyšší, jedná se o: Vzlet, přistání a let ve vyčkávacím obrazci ve výšce menší než 10 000 stop. [10]

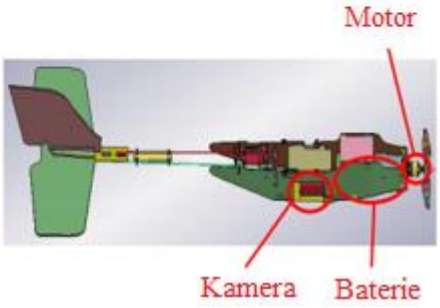
3.1 Specifikace UA použitých ve výzkumu

Jedním z bezpilotních letadel použitých v testech je kvadrokoptéra **DJI Phantom 3**, která již byla použita v předchozích výzkumech a její specifikace jsou na obrázku č.12, včetně hmotností motorů, baterie a kamery.

Druhým modelem použitým pro výzkum byl bezpilotní letoun s pevným křídlem **Precision Hawk Lancaster Hawkeye Mark III.** Ve výzkumu byl použit především pro zjištění následků srážky i pro bezpilotní letadlo se zcela jinými charakteristikami (rozdílná geometrie, rychlost letu, rozložení hmotnosti, celková hmotnost) než multikoptéra. [10] Jeho specifikace společně se znázorněním jsou na obrázku č.24 a obrázku č.25. Z důvodu rozpětí křídel, které je s ohledem na průměr ústí uvažovaného proudového motoru příliš velké, je ve všech testech použit model bez křídel tak jak, je znázorněno na obrázku č.25.

Zvolený bezpilotní systém	Precision Hawk Lancaster Hawkeye III
Znázornění	
Hmotnost	1,800 g
Rozměry	Rozpětí: 1500 mm Délka: 800 mm
Max. horizontální rychlost	19.5 m/s
Max. servisní dostup	4,000 m
Baterie LiPo	335 g
Motory - Brushless DC	76 g x 1
Max. rychlost motoru	1280 rad/s
Kamera	372 g

Obrázek č.24 Dimenze UA s pevným křídlem [8]

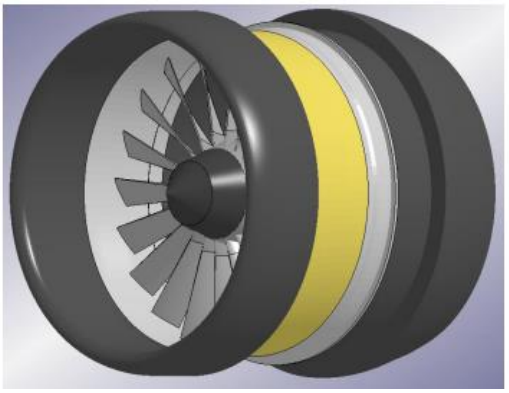


Obrázek č.25 Znázornění UA [10]

3.2 Specifikace proudového motoru

Protože existuje velké množství proudových motorů o různých rozměrech, materiálech či výkonech, neuvažuje se ve výzkumu žádný konkrétní typ proudového motoru, který by byl aktuálně používán v letectví. Cílem bylo co nejvěrohodněji napodobit moderní proudový motor po stránce geometrické, materiální a po stránce jeho výkonových charakteristik. [10]

Proudový motor uvažovaný pro vykonání testů odpovídá velikosti středně velkého business jetu. [10] Model motoru (Obrázek č.26) byl vytvořený v programu CAD a obsahuje následující části: kužel, hřídel motoru, disk dmychadla, lopatky dmychadla a motorová gondola. Jednotlivé komponenty motoru jsou zobrazeny na obrázku č.27. Ve výzkumu se neuvažují vnitřní části motoru jako kompresor nebo spalovací komora, důvodem je, že i malé části UA mohou způsobit vážné poškození vnitřní části motoru, proto je výzkum zaměřen primárně na analýzu poškození lopatek dmychadla a ostatních komponentů vymodelovaných v programu CAD. Materiály zvolené pro tvorbu modelu jsou: hliník, slitina titan a kevlar. Průměr dmychadla je roven 1020 mm (40 palců). [10]



Obrázek č.26 Model motoru [10]

Obrázek č.28 Druhy lopatek [10]

Obrázek č.27 Komponenty motoru [10]

Zvoleny byly dva druhy lopatek s tvarem a rozměry, které jsou u proudových motorů nejvíce rozšířeny. Oba druhy lopatek jsou vyrobeny ze slitiny titanu. Maximální tloušťka užší lopatky je u jejího kořene 12 mm a 4,3 mm u špičky lopatky, zatímco širší lopatka má maximální tloušťku u kořene 16,7 mm a 6,3 mm u špičky lopatky. Důvod rozdílu v tloušťce lopatek je porovnání rozdílu následků při srážce. Úhel nastavení lopatek u jejich kořene svírá úhel 72° a 30° na špičce lopatek. [10]

Dalším kritickým komponentem proudového motoru je ochranný prstenec. Ochranný prstenec slouží k zachycení trosek bezpilotního letadla či zasaženého motoru, a díky tomu zabrání dalšímu poškození citlivých částí letounu. Hlavní částí prstence je 4,5 mm (0,18 palce) široký hliníkový prsten, na kterém je navinuta 24,5 mm široká vrstva Kevlaru. Tyto parametry byly zvoleny na základě průměru turbíny a mění se v závislosti na její velikosti. [10] Ochranný prstenec je znázorněn žlutě na obrázku č.25.

Poslední částí, která je přímo vystavena nárazu bezpilotního letadla, je kužel motoru. Materiál, ze kterého je vyrobený, je hliník a tloušťce 3 mm (0,12 palce). Rozměry jsou opět odpovídající reálným rozměrům kužele proudového motoru. [10]

3.3 Zvolené podmínky výzkumu

Při určování podmínek nárazu byl kladen důraz na to, aby bylo docíleno takového výsledku, který se bude co nejvíce přibližovat realitě pro tři různé fáze letu. Podmínky, které mají značný vliv na následky srážky jsou: fáze letu, objekt, který způsobil kolizi, místo nárazu na dmychadle, šířka lopatky, orientace UA při nárazu, relativní rychlost nárazu, otáčky dmychadla. Při testech bylo UA uvažováno jako nepohyblivé (jeho relativní rychlost byla zanedbána), uvažované rychlosti kolize jsou tedy relativní rychlost letounu a obvodová rychlost lopatky v místě nárazu. [10] Rychlosti pro jednotlivé fáze letu jsou v tabulce č.3.

Tabulka č.3 Rychlosti kolizí [10]

Fáze letu	Rychlost letounu (uzly)	Rychlost na špičce lopatky (m/s)
Vzlet	180	433
Přistání	180	108
Vyčkávání	250	291

Tabulka č.4 obsahuje parametry jednotlivých testů, které byly provedeny. Z tabulky je patrné, že testy jsou zaměřeny primárně na kolizi vzniklou během vzletu. Důvodem je, že při vzletu je motor nastaven na nejvyšší výkon ze všech tří fází letu, proto se předpokládá, že při kolizi dojde k největšímu poškození. Otáčky dmychadla byly pro vzlet nastaveny na 8500 ot./min z čehož s ohledem na průměr dmychadla vyplývá, že na špičkách lopatek je obvodová rychlost transonická. Výkon motoru ve fázi přistání byl nastaven tak, aby odpovídal mírně zvýšeným volnoběžným otáčkám dmychadla (2000 ot./min). Pro vyčkávání byly otáčky turbíny nastaveny na 6000 ot./min. [10]

Tabulka č.4 Parametry testů [10]

Typ testu	Rychlost letounu (uzly)	Místo nárazu	Otáčky turbíny (ot./min)	Druh lopatky	Orientace UA	Model UA komponent
Vzlet 1	**180**	**Vnější část lopatky**	**8500**	**Úzká**	**Přímá**	**Kvadrokoptéra**
Vzlet, komponent 1	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	Přímá	Motor
Vzlet, komponent 2	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	Přímá	Kamera
Vzlet, komponent 3	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	Přímá	Baterie
Vzlet, místo 1	180	**Vnitřní část lopatky**	8500	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**
Vzlet, místo 2	180	**Kužel**	8500	Úzká	Přímá	Motor
Vzlet, místo 3	180	**Kužel**	8500	Úzká	Přímá	Kamera
Vzlet, místo 4	180	**Kužel**	8500	Úzká	Přímá	Baterie
Vzlet, lopatka 1	180	Vnější část lopatky	8500	**Širší**	Přímá	**Kvadrokoptéra**
Vzlet, orientace 2	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	**90° sklon**	**Kvadrokoptéra**
Přistání 1	180	Vnější část lopatky	**2000**	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**
Vyčkávání 1	**250**	Vnější část lopatky	**6000**	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**
Vzlet 2	**180**	**Vnější část lopatky**	**8500**	**Úzká**	**Přímá**	**Pevné křídlo**
Vzlet, komponent 4	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	Přímá	Motor
Vzlet, komponent 5	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	Přímá	Kamera
Vzlet, komponent 6	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	Přímá	Baterie
Vzlet, místo 5	180	**Vnitřní část lopatky**	8500	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**
Vzlet, místo 6	180	**Kužel**	8500	Úzká	Přímá	Motor
Vzlet, místo 7	180	**Kužel**	8500	Úzká	Přímá	Kamera
Vzlet, místo 8	180	**Kužel**	8500	Úzká	Přímá	Baterie
Vzlet, lopatka 1	180	Vnější část lopatky	8500	**Širší**	Přímá	**Pevné křídlo**
Vzlet, orientace 2	180	Vnější část lopatky	8500	Úzká	**180° otočen**	**Pevné křídlo**
Přistání 2	180	Vnější část lopatky	2000	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**
Vyčkávání 2	250	Vnější část lopatky	6000	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**

Všechny výsledné deformace jsou vypočteny pomocí **metody konečných prvků**. Jedná se metodu sloužící k simulaci průběhu napětí, deformací a mnoha dalších parametrů. [11] Aby byly výsledky výzkumu co nejpřesnější, byla na lopatky zavedena radiální síla, která vzniká vlivem odstředivého zrychlení a v případě utržení lopatky vlivem nárazu UA, je hlavním zdrojem energie pro část utržené lopatky, která poté může způsobit vážné škody. [10]

3.4 Hodnocení výsledků testů

Podobně jako tomu bylo při výzkumu v kapitole 2, je pro výsledky testů nutné stanovit určité kategorie, které budou vyjadřovat stupeň poškození po srážce UA s proudovým motorem.

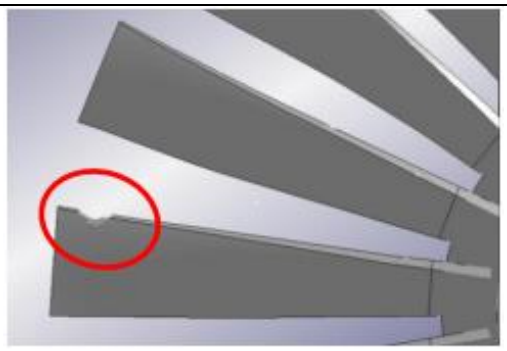
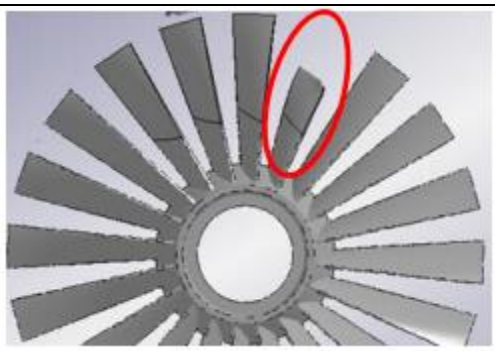
Kategorie poškození jsou opět čtyři. **Kategorie 1** vyjadřuje takovou úroveň poškození, kdy došlo pouze k lehké deformaci či utržení malé části lopatky bez dalšího narušení ostatních komponentů. [10] Následky kategorie 1 by ve většině případů neměly mít na další chod motoru žádný vliv, ale mohou způsobit vibrace, které je posádka schopna zaznamenat na palubních přístrojích. Po dokončení letu bude nutná výměna poškozené lopatky a důkladné prohlédnutí motoru.

Úroveň poškození **Kategorie 2** znamená utržení části jedné nebo více lopatek. V případě zasažení kuželu může dojít k prasklině. Nedochází však k jeho protržení, stejně tak nedochází k protržení ochranného prstence vlivem nárazu utržených lopatek. [10] Následkem utržení lopatek vznikne nerovnoměrné rozložení hmotnosti na dmychadle, které zapříčiní silné vibrace motoru. Motor musí být z důvodu vibrací vypnut, v takovém případě již dochází k velkému vlivu na bezpečnost**.**

Kategorie 3 obsahuje všechny následky, které jíž byly zmíněny, může však dojít k odtržení celé lopatky. Kužel motoru může být od srážky s UA proražený, stále však nedochází k proražení ochranného krytu. [10]

U **kategorie 4** dochází kromě zmíněných následků i k proražení ochranného krytu, což může následně způsobit i proražení křídla a poškození hydraulických obvodů nebo únik paliva. Znázornění poškozených částí pro jednotlivé kategorie je v tabulce č.5. [10]

Tabulka č.5 Kategorie poškození proudového motoru [10]

	Popis	Příklad
Kategorie 1	• Deformace lopatky • Utržení menší části lopatky • Ochranný kryt a kužel zůstávají nepoškozeny	
Kategorie 2	• Odtržení části jedné, nebo více lopatek • Možné praskliny na kuželu • Ochranný kryt zůstává neprotržen	
Kategorie 3	• Úplné odtržení jedné nebo více lopatek • Protržení kuželu • Ochranný kryt zůstává neprotržen	
Kategorie 4	• Všechna výše zmíněná poškození • Protržení ochranného krytu	

3.5 Analýza srážky kvadrokoptéry s motorem

Cílem následující analýzy je zhodnotit výsledky proběhlých testů a shrnout je v závěr, který bude představovat možný vliv na bezpečnost letu. Jednotlivé testy proběhly za podmínek znázorněných v tabulce č.4 a jejich zařazení do jednotlivých kategorií je posuzováno podle míry poškození znázorněné v tabulce č.5. Výsledky jednotlivých testu jsou v tabulce č.6.

Tabulka č. 6 Výsledky testů kvadrokoptéry [10]

Typ testu	Místo nárazu	Druh lopatky	Orinetace UA	Model UA komponent	Úroveň poškození
Vzlet 1	**Vnější část lopatky**	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**	**Kategorie 3**
Vzlet, komponent 1	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	Motor	**Kategorie 1**
Vzlet, komponent 2	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	Kamera	**Kategorie 1**
Vzlet, komponent 3	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	Baterie	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 1	**Vnitřní část lopatky**	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 2	**Kužel**	Úzká	Přímá	Motor	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 3	**Kužel**	Úzká	Přímá	Kamera	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 4	**Kužel**	Úzká	Přímá	Baterie	**Kategorie 1**
Vzlet, lopatka 1	Vnější část lopatky	**Širší**	Přímá	**Kvadrokoptéra**	**Kategorie 1**
Vzlet, orientace 1	Vnější část lopatky	Úzká	**90° sklon**	**Kvadrokoptéra**	**Kategorie 2**
Přistání 1	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**	**Kategorie 1**
Vyčkávání 1	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	**Kvadrokoptéra**	**Kategorie 1**

Následky testu **Vzlet 1** dosáhly úrovně poškození Kategorie 3. Došlo k poškození velkého množství lopatek, přičemž tři lopatky byly utrženy. [10] Tohoto poškození bylo dosaženo za podmínek pro nejhorší scénář, tedy: vzletový výkon, úzké lopatky a zásah do jejich vnější části, kde je obvodová rychlost v daný moment nejvyšší. Ačkoliv nedošlo k protržení ochranného krytu, a je tedy velká šance, že by nedošlo k poškození dalších částí letounu, je jisté, že motor by po nárazu okamžitě ztratil výkon. Ztráta výkonu jednoho z motorů ve vzletové fázi je jednou z nejnebezpečnějších situací, které mohou nastat. Hlavním důvodem je vzniklá asymetrie tahu, která je při vzletovém nastavení výkonu motorů velmi výrazná a zapříčiní okamžité vychýlení letounu z požadovaného kurzu, což v kombinaci s malou výškou a nízkou rychlostí, ve které se letoun v daný okamžik pohybuje, vyžaduje okamžitou reakci posádky.

Testy **Vzlet, komponent 1-3** zahrnovaly kolize jednotlivých komponentů, které jsou nejtvrdšími částmi kvadrokoptéry. Výsledkem pro všechny komponenty je poškození kategorie 1. Test motoru UA a kamery dopadl s téměř shodnými následky, došlo pouze k lehké deformaci zasažené lopatky. U takového poškození by vliv na bezpečnost letu byl nulový,

schopnost motoru operovat by taktéž nebyla ovlivněna a zbytky částic z kamery či motoru UA by prolétly obtokovou částí proudového motoru ven. O něco vážnější byly následky kolize baterie. Baterie způsobila lehkou deformaci na čtyřech lopatkách. Tyto deformace by mohly způsobit vibrace motoru a nutnost jeho vypnutí. Jelikož byla baterie úplně zničena, pravděpodobnost jejího vznícení je velmi nízká.

Pro test **Vzlet, místo 1** platily stejné podmínky jako pro test Vzlet 1, s tím rozdílem, že proudový motor byl zasažen do vnitřní části lopatek a částečně do disku dmychadla. Následkem kolize byla deformace několika lopatek a ulomení menší části materiálu na jedné z lopatek. Přesto, že na zkoumaných částech došlo pouze k poškozením kategorie 1, existuje velká šance, že zbytky UA by vnikly do kompresoru motoru, kde by mohly způsobit vážné škody.

V testech **Vzlet, místo 2-4**, byl kolizi vystaven kužel proudového motoru. Objekty, jež kolizi vyvolaly, byly opět jednotlivé komponenty UA. Ve všech testech byly následky vyhodnoceny kategorií 1, a došlo pouze k lehkým deformacím na kuželu. V případě nárazu baterie došlo navíc k jejímu úplnému rozdrcení, takže vzplanutí baterie je velmi nepravděpodobné, což vyplývá i z poznatků v kapitole 2.4.

Vzlet, lopatka 1 byl jeden ze dvou testů, kdy byla použita lopatka s širší geometrií profilu. Podmínky byly stejné jako pro Vzlet 1, což znamená, že byla pro náraz použita celá kvadrokoptéra. Z testu vyplývá, že použití širší lopatky má na rozsah poškození značný vliv. Rozsah poškození zapadá do kategorie 1, což je o 2 kategorie lepší než při použití typu lopatek s užším profilem. Zaznamenaná poškození jsou lehké deformace na několika ze zasažených lopatek a menší úlomek náběžné hrany jedné z lopatek.

Vzlet, orientace 2. Hlavním cílem bylo zjištění následků kolize s UA nakloněným o 90°. Nejdříve došlo ke kontaktu vrtulí, poté motoru, těla UA a nakonec kamery. Následkem bylo ulomení špiček dvou lopatek, které utrpěly přímý zásah a vážnější deformace několika dalších lopatek. Částečně poškozen byl také ochranný prstenec, jelikož nedošlo k jeho protržení, zapadá rozsah poškození do kategorie 2. Celkově se však dá říci, že motor by byl po nárazu vystaven silným vibracím a musel by být okamžitě vypnut.

Test **Přistání 1** byl zařazen do kategorie 1. Náraz UA způsobil lehčí deformaci zasažené lopatky s utržením malé části její náběžné hrany. Z důvodu nízkých otáček dmychadla v této fázi letu nedošlo ani k poškození dalších lopatek nebo částí motoru. Z výsledků tohoto testu můžeme usoudit, že vliv na bezpečnost letu by nebyl zásadní.

Vyčkávání 1 bylo ohodnoceno kategorií 1, a podle mého názoru, způsobila kolize překvapivě malý rozsah poškození. Došlo pouze k částečné deformaci na několika lopatkách.

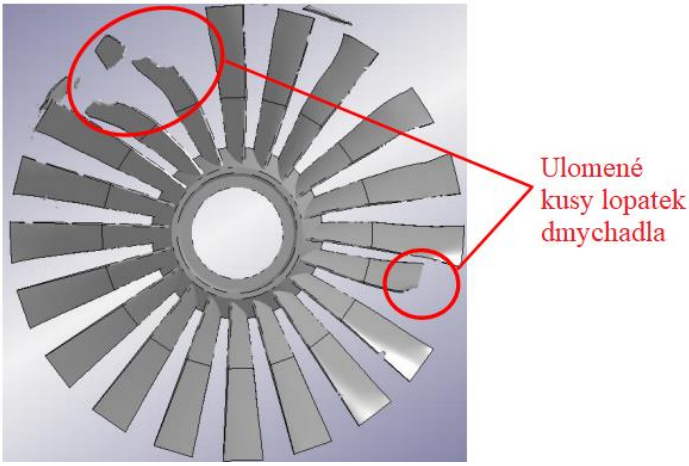
3.6 Analýza srážky UA s přímým křídlem a motoru

Cílem je, podobně jako v předchozí kapitole, shrnutí výsledků z proběhlých testů a vyjádření vlivu na bezpečnost letu. Podmínky jednotlivých testů jsou znázorněny v tabulce č.4. Zařazení do kategorií je provedeno podle tabulky č. 5 a výsledky testů jsou znázorněny v tabulce č.7. Na všech provedených testech bylo UA zbaveno křídel, protože jeho rozpětí je větší než průměr ústí proudového motoru.

Tabulka č. 7 Výsledky testů UA s pevným křídlem [10]

Typ testu	Místo nárazu	Druh lopatky	Orientace UA	Model UA komponent	Úroveň poškození
Vzlet 2	**Vnější část lopatky**	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**	**Kategorie 3**
Vzlet, komponent 4	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	Motor	**Kategorie 2**
Vzlet, komponent 5	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	Kamera	**Kategorie 2**
Vzlet, komponent 6	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	Baterie	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 5	**Vnitřní část lopatky**	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**	**Kategorie 2**
Vzlet, místo 6	**Kužel**	Úzká	Přímá	Motor	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 7	**Kužel**	Úzká	Přímá	Kamera	**Kategorie 1**
Vzlet, místo 8	**Kužel**	Úzká	Přímá	Baterie	**Kategorie 1**
Vzlet, lopatka 2	Vnější část lopatky	**Širší**	Přímá	**Pevné křídlo**	**Kategorie 2**
Vzlet, orientace 2	Vnější část lopatky	Úzká	**90° sklon**	**Pevné křídlo**	**Kategorie 2**
Přistání 2	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**	**Kategorie 1**
Vyčkávání 2	Vnější část lopatky	Úzká	Přímá	**Pevné křídlo**	**Kategorie 2**

Stejně jako u testu Vzlet 1 bylo i u testu **Vzlet 2** přepokládáno poškození s největším rozsahem, což bylo po provedení testu jednoznačně potvrzeno. Poškození dosáhlo kategorie 3. Po nárazu došlo k utržení velkých částí materiálu na třech lopatkách, přičemž téměř všechny lopatky byly deformovány a došlo k utržení menších částí lopatek. Celkové poškození dmychadla je znázorněno na obrázku č.29. Ačkoliv je jasné, že po nárazu by motor ztrácel tah a musel by být odstaven, nedošlo k protržení ochranného prstence, a proto byl test zařazen do kategorie 3. Možné následky a vliv na bezpečnost, které by mohla kolize znamenat, jsou stejné jako ty, které byly zmíněny v kapitole 3.5. pro test Vzlet 1.



Obrázek č. 29 Poškozené dmychadlo [10]

Následujícím testem byl **Vzlet, komponent 4**. Testována byla kolize motoru UA na vnější část lopatky. Okamžitě po nárazu byla zasažená lopatka poškozena v takové míře, že došlo k odtržení jejího zbytku právě v místě nárazu. Utržená část lopatky poté zasáhla ochranný kryt a způsobila jeho poškození, nikoliv však utržení. Na ostatních lopatkách k deformacím nedošlo, proto byl tento test ohodnocen kategorií 2. Zajímavostí je, že motor UA s pevným křídlem má hmotnost 76 g, což je o pouhých 20 g více než motor, kterým je vybavena kvadrokoptéra, navzdory tomu došlo k podstatně vážnějšímu poškození.

Podobná poškození byla dosažena v testu **Vzlet, komponent 5**, kde byly testovány následky dopadu kamery. Kamera způsobila opět ulomení zasažené lopatky v místě zásahu a stejně tak i poškození ochranného krytu. Kromě těchto poškození byly lehce poškozeny i další dvě lopatky, přesto je test zařazen do kategorie 2. Kamera použita na tomto typu UA je oproti kameře použité na kvadrokoptéře podstatně robustnější, proto daný výsledek testu není nijak překvapivý.

Vzlet, komponent 6 zahrnoval test nárazu baterie. Ten byl vyhodnocen kategorií 1. Po náraze došlo k lehké deformaci na třech lopatkách. Baterie byla po nárazu okamžitě rozdrcena, proto je pravděpodobnost jejího vzplanutí minimální.

Pro test **Vzlet, místo 5** bylo hlavní podmínkou kolize celého UA do vnitřní části lopatek. Náraz způsobil vážnou deformaci jedné z lopatek, nebyla však zcela utržená. Další ze způsobených poškození byly kousky utržených náběžných hran na téměř polovině lopatek. Tato poškození nejlépe zapadají do kategorie 2.

Testy **Vzlet, místo 6-8** měly za cíl stanovení následků nárazu jednotlivých komponentů na kužel proudového motoru. Z následků vyplývá, že ani v jednom případě nedošlo k protržení kužele nebo vzniku praskliny. Na kuželu došlo ve všech případech k deformacím v místě

kolize. Největší deformace byla dosažena po nárazu kamery, zatímco nejmenší po nárazu baterie. [8] Baterie byla rovněž zcela zničena, proto je riziko jejího vzplanutí opět minimální.

Pro test **Vzlet, lopatka 2** byly podmínky kolize stejné jako pro test Vzlet 2, zvolen však byl širší profil lopatky. UA způsobilo značná poškození na náběžných hranách tří lopatek a lehkou deformaci více než poloviny z lopatek. Výsledná úroveň poškození tedy patří do kategorie 2.

Vzlet, orientace 2. Test spočíval v prozkoumání následků kolize UA, které bylo v momentě nárazu otočené o 180° kolem své svislé osy. Výsledkem byly lehké deformace lopatek v místech prvního kontaktu s UA. Protože UA neobsahuje v zádních částech trupu a na ocasních plochách žádné tvrdé materiály, byly počáteční následky nárazu velmi mírné. Náraz zbytku UA již způsobil utržení dvou vnějších částí lopatek. Utržení těchto částí bylo způsobeno kamerou a motorem. [10]

Během **Přistání 2**, došlo vlivem nárazu pouze k lehkým deformacím na několika lopatkách. Větší nebezpečí by v tomto případě mohla znamenat baterie UA, u které nedošlo, kvůli nízkým otáčkám motoru, k jejímu úplnému zničení, proto je riziko jejího vzplanutí vyšší. Stále je však nepravděpodobné, že by požár baterie mohl mít na bezpečnost letu větší vliv. Nejpravděpodobnější scénář je v takovém případě průlet baterie obtokovou částí proudového motoru.

Poškození způsobená na proudovém motoru po uskutečnění testu **Vyčkávání 2**, jsou svým rozsahem téměř ekvivalentní testu Vzlet, lopatka 2. Značné poškození náběžných hran bylo zaznamenáno na dvou lopatkách, kde následkem nárazu motoru a kamery došlo i k utržení částí náběžných hran. Několik dalších lopatek bylo lehce deformováno.

3.7 Porovnání srážky s výsledky výzkumu Virginia Tech

Výzkumem následků kolize bezpilotního letadla s proudovým motorem se zabýval také institut Virginia Tech, který provedl simulaci kolize proudového motoru s kvadrokoptérou. Jednotlivé objekty byly opět vymodelovány v programu CAD.

3.7.1 Podmínky kolize

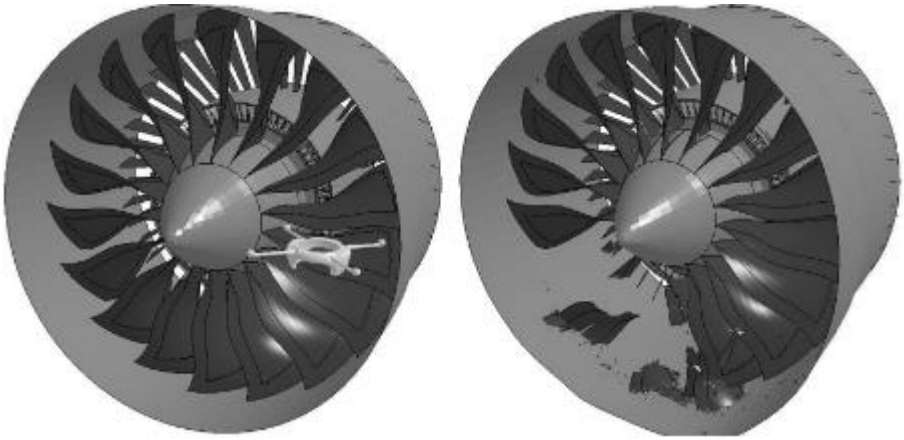
Pro výzkum nebyl použit žádný z konkrétních proudových motorů, přesto se vymodelovaný motor svými parametry a tvarem velmi podobá motoru Rolls-Royce Trent 1000, který má využití především na letounem Boeing 787 Dreamliner. [12] V porovnání s proudovým motorem ve výzkumu FAA se jedná o podstatně rozměrnější motor. Průměr dmychadla je roven 9 stopám (275 cm). Materiál lopatek je slitina titan. [12]

Použité bezpilotní letadlo není blíže specifikováno. Jedná se o kvadrokoptéru o hmotnosti 8 liber (3,6 kg), což je podstatně více než bezpilotní letadla použita ve výzkumech FAA.

Relativní rychlost UA v momentě nárazu byla rovna 70 m/s a obvodová rychlost lopatky v místě kolize byla rovna 320 m/s. [12] Tyto rychlosti odpovídají vzletovému nastavení výkonu motoru.

3.7.2 Následky kolize

Z obrázku č. 30 je patrné, že dmychadlo utrpělo rozsáhlá poškození. Došlo k úplnému odtržení čtyř lopatek a deformaci na dvou následujících. Jelikož výzkum neupřesňuje dopad na ochranný kryt, není možné stanovit následky, které by způsobily utržené lopatky. Dá se však předpokládat, že motor okamžitě ztratil tah a muselo by dojít k jeho vypnutí.



Obrázek č.30 Proudový motor [12]

(Na levém obrázku nepoškozený motor s kvadrokoptérou, napravo motor krátce po kolizi)

3.7.3 Porovnání s výzkumem FAA

Ačkoliv byl výzkum Virginia Tech zaměřen na výzkum následků za podmínek většího UA s větším proudovým motorem, při porovnání výsledků s testy Vzlet 1 a Vzlet 2 lze usoudit, že poměr poškození k velikosti motoru a bezpilotního letadla je výsledkům jednotlivých výzkumů velmi podobný. Výzkum Virginia Tech nebyl rozebírán do takové hloubky jako výzkum FAA. Nebyly testovány jednotlivé komponenty, či následky způsobené utrženými lopatkami.

3.8 Závěr analýzy srážky proudového motoru s UA

Z výsledků je patrné, že podstatně větší rozsah poškození byl zaznamenán na testech UA s pevným křídlem než na testech s kvadrokoptérou. Jedním z důvodů pro tento výsledek je ten, že UA s pevným křídlem má všechny pevné části velmi blízko u sebe. Přesto, že testy nepočítaly při nárazech s namontováním křídel na UA, můžeme usoudit, že jejich zahrnutí v testech by mělo na náraz jen minimální následky. Tuto teorii potvrzuje fakt, že při testu **Vzlet, orientace 2**, byly nárazu vystaveny nejdříve ocasní plochy UA, které způsobily minimální škody, přičemž ocasní plochy stejně jako křídlo obsahuje pouze „měkké“ materiály.

Na výsledcích testů si lze také všimnout, že při testování jednotlivých komponentů UA nedošlo k závažnému rozsahu poškození. Pokud však byl kolizi vystaven celý UA, byly následky podstatně vážnější, přesto že škody byly opět způsobeny komponenty jako motor či kamera.

I v tomto výzkumu se nabízí otázka: „Způsobí srážka bezpilotního letadla stejné škody jako srážka ptáka?“ Odpověď je jednoznačně: „Nezpůsobí stejné škody.“ Škody způsobené nárazem bezpilotního letadla budou zcela jistě podstatně vážnější za předpokladu stejné hmotnosti UA a ptáka.

Negativní vliv na bezpečnost letu je v případě kolize s proudovým motorem nezpochybnitelný. Ačkoliv některé testy zaznamenaly pouze malý vliv na poškození zkoumaných částí, a kategorie 4 nebylo vůbec dosaženo, zbytky UA by mohly poškodit další části motoru, které nebyly předmětem testování. Je velmi pravděpodobné, že i u poškození kategorie 2 a 3 se bude motor muset vypnout, aby nedošlo k jeho dalšímu poškození či dokonce explozi.

4. Porovnání skutečné a simulované kolize

V této kapitole bych rád porovnal následky skutečné kolize bezpilotního letadla s letadly obchodní letecké dopravy.

Incidentů, kdy došlo přímo ke kolizi letounu s bezpilotním letadlem, kupodivu není mnoho. Z velké části se jedná o incidenty, kdy bylo bezpilotní letadlo zaznamenáno v těsné blízkosti prolétajícího letounu, a nezpůsobilo tak žádné škody.

Při porovnání skutečných incidentů se simulovanými jsem bohužel ve značné nevýhodě, jelikož ani u jednoho z incidentů se nepodařilo identifikovat bezpilotní letadlo, které incident způsobilo. Z tohoto důvodu neznám značnou část z podmínek, za kterých kolize proběhla, jako například druh či dimenze bezpilotního letadla.

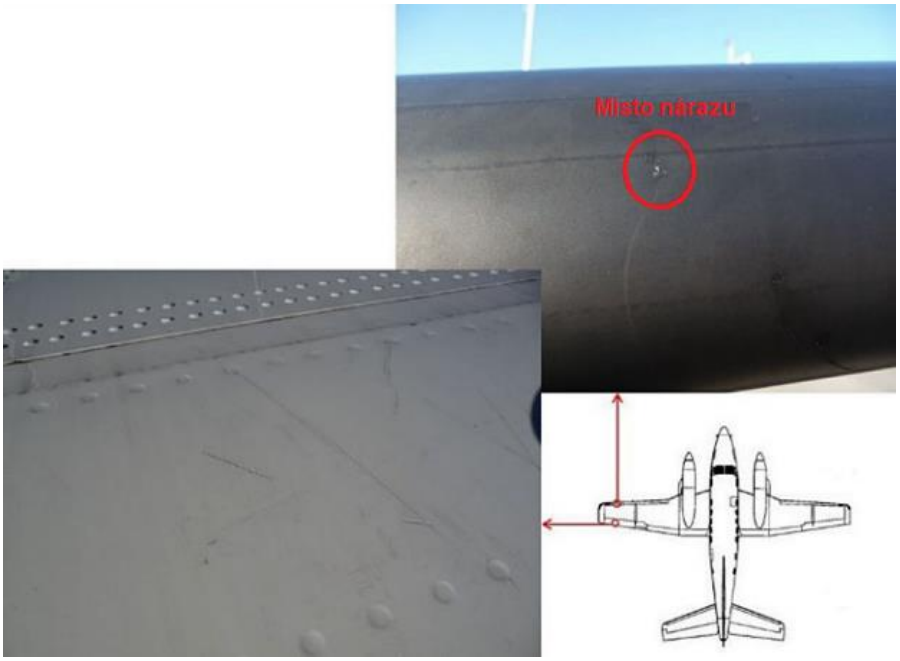
4.1 Kolize UA s letounem Beechcraft King Air A100

Incident se stal 12.10. 2017 letounu Beechcraft Air A100 operovaný společností SkyJet, který prováděl let SJ512 za pravidel letu podle přístrojů z Rouyn-Noranda, Kanada do Quebeku. Na palubě letadla byli dva piloti a šesti pasažérů. [14]

Letoun byl ve fázi přiblížení na dráhu 24. Těsně před fixem konečného přiblížení si posádka všimla bezpilotního letadla na konci levého křídla, vzápětí došlo k nárazu. Posádka pokračovala v přiblížení, náraz oznámila a vyhlásila stav tísně. Posádka poté bezpečně přistála na dráze 24. [14]

4.1.1 Následky kolize

Následky kolize jsou zobrazeny na obrázku č.31. Z obrázku je jednoznačně patrné, že následky poškození jsou minimální. Z analýzy v 2. kapitole bych rozsah poškození mohl zařadit do kategorie 1. Došlo pouze k lehké deformaci potahu, pravděpodobně následkem nárazu některé z tvrdších částí UA. V dolní levé části obrázku č.31 je také možné zaznamenat částečné narušení potahu křídla. Z tohoto poškození lze usoudit, že došlo ke „sklouznutí“ bezpilotního letadla, nikoli k jeho přímé kolizi s náběžnou hranou letounu.



Obrázek č.31 Následky kolize na náběžné a odtokové hraně křídla [13]

4.1.2 Rozdíly mezi simulací a skutečnou kolizí

Pro porovnání je nutné rozlišit několik významných rozdílů mezi simulací a skutečnou kolizí. Především podstatně nižší rychlost nárazu v případě skutečné srážky. Průměrná rychlost Beechcraftu se ve fázi přiblížení pohybuje okolo 120 uzlů. [14] Ačkoliv neznáme rychlost nárazu UA při skutečné kolizi, budeme předpokládat rychlost 30 uzlů, uvedenou na obrázku č.12, což je maximální horizontální rychlost UA použitého v simulacích. Výsledná rychlost kolize je 150 uzlů, a je tím pádem o 100 uzlů nižší než rychlost uvažovaná při simulacích.

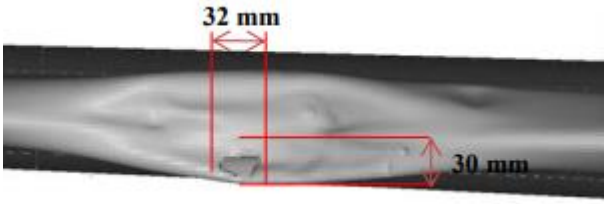
Další faktor, který nelze zanedbat, je místo kolize UA. Z obrázku č.31 je patrné, že ke kolizi došlo nad náběžnou hranou, kde je následný úhel kolize značně velký, zatímco simulace zahrnovaly přímý náraz do náběžné hrany křídla.

Posledním důležitým faktorem, který známe, je fakt, že letoun Beechcraft je na rozdíl od Learjetu, posuzovaného v simulacích, vybaven pneumatickým odmrazováním náběžných hran. Toto zařízení bylo během kolize zasaženo a dá se předpokládat, že zmírnilo následky kolize.

4.1.3 Porovnání s následky simulace

Pro porovnání následků kolize jsem zvolil test, který byl proveden na business jetu, a místo kolize, které přibližně odpovídá místu na skutečně poškozeném letounu. Za těchto podmínek jsem pro porovnání vybral test číslo 9, jehož poloha je znázorněna na obrázku č. 18 a výsledek testu na obrázku č. 19.

Při simulaci došlo k úrovni poškození kategorie 2, což znamená, že povrch náběžné hrany křídla byl značně deformován, a došlo k menšímu protržení potahu, znázornění společně s rozměry trhliny je na obrázku č. 32. Poškození způsobené bezpilotním letadlem je na obrázku č. 32.



Obrázek č. 32 Simulované poškození [13]

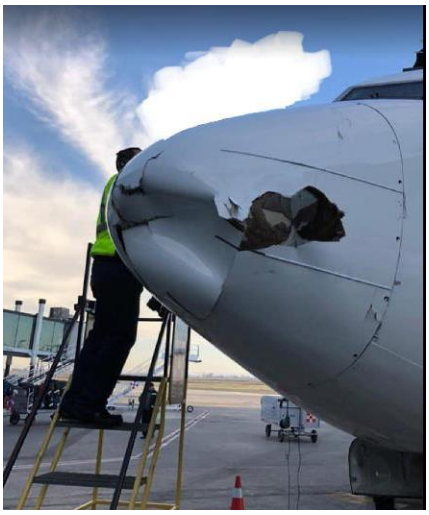
Při porovnání obou kolizí je patrné, že při simulaci došlo ke značně větším škodám. Hlavním důvodem většího rozsahu poškození při simulaci je kromě vyšší rychlosti kolize a nárazu přímo na náběžnou hranu křídla také fakt, že všechny ostatní parametry nárazu byly zvoleny tak, aby bylo dosaženo scénáře, který povede k největšímu rozsahu škod. Pokud bychom provedli simulaci s podmínkami skutečné kolize, a všechny neznámé parametry nahradili parametry použitými v simulaci, mohli bychom očekávat velmi podobné následky kolize.

4.2 Ostatní kolize způsobené UA

Další kolize, které byly způsobeny kolizí bezpilotního letadla s letadlem provozovaným v obchodní letecké dopravě, a které by současně byly vhodné pro porovnání s výzkumem provedeným ve 2. kapitole, nejsou zaznamenány.

Jedním z dalších případů, kdy UA zapříčinilo kolizi je srážka kvadrokoptéry DJI Phantom 4 s vojenským vrtulníkem Black Hawk. Při incidentu nebyl nikdo zraněn a vrtulník byl schopný bezpečného návratu na základnu. Zasažena byla náběžná hrana jednoho listu rotoru, který byl následně povrchově narušen v délce 30 cm. [15] Z dostupných fotografií vyplývá, že úroveň poškození by podle hodnocení v kapitole 2.4 dosáhla kategorie 1.

Dalším incidentem, na kterém byla zaznamenána značná úroveň poškození, byl let 773 společnosti Aeromexico. Vyšetřovatelé incidentu však dosud nenašli žádné důkazy, které by potvrdily, že se jednalo opravdu o kolizi s UA. Navzdory tomu, že teorie kolize s bezpilotním letadlem není dokázána, je právě tato teorie velice pravděpodobná, což potvrzuje také fakt, že na letounu nebyly nalezeny žádné zbytky ptáka, který byl považován za další z možných příčin kolize. Zasaženým letounem byl Boeing 737-800. Letoun byl ve fázi přiblížení a po nárazu pokračoval až do bezpečného přistání. Při incidentu nebyl nikdo zraněn. [16] Následky incidentu jsou na obrázku č. 33.



Obrázek č.33 Poškozený Boeing 737 [16]

Z obrázku č.33 je patrné značné poškození na krytu meteorologického radaru. K poškození vnitřní struktury letounu či meteorologického radaru však nedošlo. [16] Z toho důvodu by, podle hodnocení v kapitole 2.4, rozsah poškození nejlépe odpovídal kategorii 3.

4.3 Možnosti zabránění vzniku incidentů způsobené bezpilotními letadly

Aby bylo riziko vzniku kolize bezpilotního letadla s letadlem obchodní letecké dopravy sníženo na minimum, je zapotřebí účinně zabraňovat vzniku incidentů, které bezpilotní letadla mohou způsobit. Následující kapitola se bude věnovat způsobům, které zabrání nebo alespoň omezí vznik incidentů v okolí řízených letišť.

4.3.1 Legislativní omezení

Základní způsob, kterým je možné vyvarovat se vzniku incidentů, je dodržování legislativních požadavků. Jak již bylo zmíněno v první kapitole provozováním bezpilotních systémů se v České republice zabývá letecký předpis L2 – Pravidla létaní, konkrétně Doplněk X – Bezpilotní systémy.

Doplněk X vyjadřuje závazná pravidla pro všechny bezpilotní letadla nebo modely letadel s MTOM nad 25 kg. Pro bezpilotní letadla s MTOM menší než 25 kg představuje Doplněk X doporučený postup jejich provozu, s výjimkou vzdušných prostorů, ve který jsou pro ně pravidla závazná. [1] Další požadavky stanoveny Doplňkem X jsou znázorněny na obrázku č.7.

Vzdušné prostory ve, kterých je provoz bezpilotních systému povolen jsou:

- řízený okrsek (MCTR a CTR)
- letištní zóna ATZ
- prostor třídy G

Prostor třídy G je definován jako vzdušný prostor sahající od země do výšky 1000 stop AGL. Jedná se o neřízený prostor. [5] Jeho další vlastnosti jsou na obrázku č.8. Grafické znázornění včetně možností provozu bezpilotního letadla jsou na obrázku č.9.

ATZ zóna je definována vertikálně od země do výšky 4000 stop AMSL a horizontálně kružnicí s poloměrem 5,5 km se středem ve vztažném bodě letiště. [5] Provoz bezpilotních systému lze uskutečnit na základě splnění požadavků provozovatele a na základě koordinace letištní letovou informační službou. Grafické znázornění je na obrázku č.9.

Provoz bezpilotních systémů ve vojenském řízeném okrsku a řízeném okrsku je možný do výšky 100 m AGL a horizontální vzdálenosti 5,5 km od vztažného bodu letiště. Bezpilotní letadla s MTOM do 0,91 kg mohou tento prostor využívat bez předchozí koordinace, nesmí však narušit ochranné pásmo letiště. [1] Další možnosti využití provozu CTR a MCTR jsou znázorněny graficky na obrázku č.10 s legendou na obrázku č.11.

4.3.2 Včasná detekce bezpilotních letadel

Pokud dojde ať už k úmyslnému či neúmyslnému porušení legislativních předpisů, musí být k dispozici další způsob, jak zabránit vzniku incidentů. S rozvojem moderních technologií vznikají možnosti, jak bezpilotní letadlo s dostatečným předstihem detekovat hned několika různými způsoby [17]:

- Radarovým zaměřením
- Optickým principem (termo kamery)
- Akustickým principem (hlukové detektory)
- Přijímač elektromagnetických vln (detektory rádiového spektra)

4.3.3 Eliminace bezpilotních letadel

V poslední době je stálé větší množství, zejména řízených letišť, vybaveno prostředky na eliminaci bezpilotních letadel. Jednou z událostí, která k rozvoji těchto prostředků výrazně přispěla, je incident na letišti Gatwick z prosince roku 2018, kdy z důvodu výskytu bezpilotního letadla v těsné blízkosti používané dráhy muselo být letiště na několik desítek hodin zcela uzavřeno, což způsobilo značná bezpečnostní rizika a finanční ztráty.

Dojde-li k detekci bezpilotního letadla existuje opět několik způsobů jakými lze bezpilotní letadlo eliminovat. Možnosti eliminace můžeme rozdělit na Soft-Kill a Hard-Kill eliminaci. V případě Soft-Kill eliminace není cílem zničit UA, které narušuje vzdušný prostor. Hlavním řešením je rušení datové komunikace mezi bezpilotním letadlem a jeho vysílačem. V případě Hard-Kill eliminace se počítá se zničením UA a jeho pádem na zem. [17]

Soft-Kill

- Rušení rádiového signálu (jamming)
- Rušení GPS signálu
- Eliminace UA pomocí vystřelené sítě (nesené jiným bezpilotním letadlem – bez pádu UA)

Hard-Kill

- Zničení UA elektronicky
  - Směrový EMI (elektromagnetická interference)
  - Laser
- Zničení UA mechanickým způsobem
  - Sestřelení vhodným zbraňovým systémem
  - Eliminace UA pomocí vystřelené sítě (nesené jiným bezpilotním letadlem – s pádem UA)
  - Kolize s jiným, k tomu určeným, specializovaným bezpilotním letadlem

4.4 Možnosti regulace provozu bezpilotních letadel blízkosti řízených letišť

Základním dokumentem, který se zabývá regulací provozu bezpilotních letadel v okolí řízených letišť je opět Doplněk X. Regulace provozu dle Doplňku X je znázorněna na obrázku č.10. V souladu s těmito pravidly je pro bezpilotní letadlo do MTOM 0,91 kg možné v celém CTR s výjimkou ochranného pásma letiště provozovat UA do výšky 100 m AGL. [1]

Bezpilotní letadla se mohou v CTR/MCTR pohybovat nad výšku 100 m AGL, jen s letovým povolením příslušného stanoviště řízení letového provozu (ŘLP). Řízení letového provozu může dále požadovat obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru. [1]

V případě nutnosti provozu bezpilotního letadla v oblasti ochranného pásma letiště ve výšce pod 100 m AGL je zapotřebí povolení ÚCL (nebo v případě leteckých prací) koordinace s ŘLP a koordinací s provozovatelem letiště. ŘLP může požadovat obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru. Stejné požadavky jsou kladeny pro provoz bezpilotních letadel v ochranném pásmu ve výšce nad 100 m AGL. [1]

Další možnost regulace bezpilotních letadel v okolí řízených letišť je povolení od ŘLP na základě koordinační dohody. Tento způsob regulace využívá modelářské letiště Sobínka, které se nachází v prostoru CTR letiště Václava Havla. Výsledkem vstřícného jednání příslušných úřadů, bylo vytvoření vzdušného prostoru určeného výhradně pro provoz bezpilotních letadel. Vzdušný prostor vyhrazený pro UA má tvar kvádru s délkou 750 m pro severní a jižní stranu, a 450 m pro západní a východní stranu. Piloti mají v tomto prostoru možnost létat do výšky 80 m AGL. [18] Hranice prostoru jsou znázorněny žlutě na obrázku č.34. Na horní straně obrázku je vidět část letiště Václava Havla, konkrétně práh dráhy 30.

Obrázek č.34 Vzdušný prostor letiště Sobínka

5. Závěr

Z neustále se zvyšujícího počtu bezpilotních systémů, vyplývá také rostoucí počet incidentů, které bezpilotní systémy způsobují. Od méně závažných incidentů, kdy dojde pouze k poškození cizího majetku či narušení soukromí, až po nehody, které vedou ke zranění jedné či více osob.

Stále více incidentů se objevuje také v oblasti obchodní letecké dopravy. Ačkoliv v drtivé většině oznámených incidentů nedochází ke kolizi bezpilotního letadla s letounem, je zcela jasné, že pravděpodobnost kolize se zvyšuje. Z toho důvodu je nezbytně nutné dále stanovovat a rozvíjet možnosti, které střetu bezpilotního letadla s letouny zabrání. Dále je také nutné provádět výzkumy, které počítají s nejhorším scénářem, tedy kolizí bezpilotního letadla s letounem, a z těchto výzkumů následně stanovit, jaký je skutečný vliv bezpilotních letadel na bezpečnost v obchodní letecké dopravě.

Úvodní část práce je zaměřena na seznámení s bezpilotními systémy po stránce jejich vývoje, rozdělení a také vzdušných prostorů, ve kterých je provozování bezpilotních systémů povolené. Je velmi důležité, aby piloti bezpilotních systému dodržovali hranice stanovených vzdušných prostorů co nejpřesněji, a stejně tak dodržovali i ostatní pravidla pro létání s bezpilotními systémy, aby bylo riziko sblížení či střetu s dopravním letounem sníženo na minimum.

Druhá kapitola se zabývá analýzou střetu bezpilotního letadla s letouny, jež jsou hlavními zástupci obchodní letecké dopravy. Hlavním zdrojem pro tuto analýzu bylo Centrum pro výzkum bezpilotních systému spadající pod FAA.

Hlavním cílem kapitoly bylo zestručnění výzkumu FAA, vyvození závěrů k jednotlivým analýzám a vyhodnocení vlivu na bezpečnost letu. Dále také porovnání následků střetu bezpilotního letadla se střetem ptáka a porovnání výsledků kolize s výsledky pocházejícími z jiného zdroje.

Poškození po vykonání jednotlivých simulací bylo velmi rozmanité, proto byly následky testů rozřazeny do jednotlivých kategorií podle vážnosti jejich poškození a ke skupinám testů spadajícím do stejné kategorie poškození byly uvedeny další možné následky, které by mohli mít vliv na bezpečnost letu.

Ve třetí kapitole byla provedena analýza kolize bezpilotního letadla s proudovým motorem. Hlavním zdrojem bylo opět Centrum pro výzkum bezpilotních systému FAA. Analýza je zaměřena nejen na následky zapříčiněné kolizí bezpilotního letadla, ale také následná poškození způsobená utrženými lopatkami. Z výzkumu celkově vyplývá, že i malé bezpilotní

letadlo dokáže proudový motor poškodit do takové míry, že musí být co nejdříve vypnut, aby nedošlo k jeho dalšímu poškození.

Odstavení jednoho motoru z důvodu kolize bezpilotního letadla, by nemělo představovat vážný problém pro bezpečné dokončení letu, neboť dvoumotorové letouny jsou certifikovány tak, aby byly letuschopné i v případě selhání jednoho z motorů. Problém by mohl nastat v případě, kdyby došlo k protržení hydraulických obvodů či palivových nádrží letounu, vlivem utržených lopatek nebo jiných částí motoru či bezpilotního letadla. Taková kombinace závad by již mohla výrazně zvýšit pravděpodobnost letecké nehody.

Ve čtvrté kapitole byly porovnány následky skutečné kolize bezpilotního letadla s obchodním letounem. Ačkoliv byla úroveň poškození skutečného letounu podstatně méně závažná, v případě zavedení podmínek skutečné kolize do simulace bychom mohli očekávat velmi podobný výsledek.

Poslední část bakalářské práce se věnuje možnostem zabránění vzniku incidentů v okolí řízených letišť a možnostem regulace provozu bezpilotních letadel v okolí řízených letišť. Aby bylo riziko vzniku sníženo na minimum, je nutné dodržovat legislativní předpisy. S postupujícím technologickým rozvojem je dostupné stále větší množství technologií, které dokáží narušitele vzdušného prostoru zneškodnit a s přibývajícím množstvím bezpilotních systémů bude vývoj technologií, které dokáží bezpilotní letadla eliminovat stále důležitější.

Celkový vliv na bezpečnost letu je v případě kolize s bezpilotním letadlem značně negativní. Ve většině případů kolize nepovede k letecké nehodě, ovlivněny by však mohly být vlastnosti letounu jako stabilita či ovladatelnost. Každá kolize však zcela jistě zapříčiní velké finanční škody, zvlášť při zásahu motoru. Zjištěno bylo také, že následky poškození po srážce s bezpilotním letadlem jsou téměř vždy vážnější v porovnání se srážkou ptáka s letounem.

Cíle bakalářské práce, stanoveny v úvodu práce, byly dosaženy. Na jednotlivých testech, provedených ve výzkumu byla provedena analýza, ze které byl odvozen výsledný vliv na bezpečnost v obchodní letecké dopravě. Věřím, že poznatky získané při tvorbě bakalářské práce zužitkuji ve své budoucí práci.

Použité zdroje

[1] Letecký předpis Pravidla létání DOPLNĚK X – BEZPILOTNÍ SYSTÉMY [online]. 2017 [cit.2019-07-18]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf

[2] K. BARNHART, Richard, Stephen B. HOTTMAN, Douglas M. MARSHALL a Eric SHAPPEE. *INTRODUCTION TO UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS* [online]. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: Taylor & Francis Group, 2012 [cit. 2019-07-19]. ISBN 978-1-4398-3521-0. Dostupné z: https://www.email.cz/download/k/HSu1mbeVsJktP3kE2QUOPcPEodtlflrxspBVe7fqmmBI39nvUzjABRoJXBMmlWifAyF0Kw8/Introduction_to_Unmanned_Aircraft_Systems.pdf

[3] *PŘEDPIS O ODBORNÉM ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD A INCIDENTŮ L 13* [online]. ČR: Ministerstva dopravy a spojů, 2001 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-13/data/print/L13-cely.pdf

[4] AUSTIN, Reg. *Unmanned aircraft systems: UAVs design, development and deployment*. Chichester: Wiley, 2010. AIAA education series. ISBN 978-0-470-05819-0.

[5] *Vzdušný prostor: ENR-1VZDUŠNÝ PROSTOR ČESKÉ REPUBLIKY* [online]. ČR: Řízení letového provozu České republiky, 2018 [cit.2019-07-20]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/pdf/enr_1_cz.pdf

[6] WOOD, Laura. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Market Forecast to 2020. *Business Wire* [online]. Dublin: Research and Markets, 2016, 09.05. 2016 [cit. 2019-07-21]. Dostupné z: https://www.businesswire.com/news/home/20160509005554/en/Unmanned-Aerial-Vehicles-UAV-Market-Forecast-2020

[7] Pilots call for research into impact of drone hitting passenger jet. *The Guardian* [online]. 2016, 02.03. 2016 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: https://www.theguardian.com/business/2016/mar/02/pilots-research-impact-drone-hitting-passenger-jet?CMP=twt_gu

[8] OLIVARES, Gerardo a Luis GOMEZ. *Volume II – UAS Airborne Collision Severity Evaluation – Quadcopter: Quadcopter projectile development, simulation protocols, target development, testing, and results.*[online]. Wichita, KS: National Institute for Aviation Research, 2017 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: http://assureuas.org/projects/deliverables/a3/Volume%20II%20-%20UAS%20Airborne%20Collision%20Severity%20Evaluation%20-%20Quadcopter.pdf

[9] WHEN PLANES AND DRONES COLLIDE. *Https://udayton.edu* [online]. Dayton: University of Dayton Research Institute, 2018 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: https://udayton.edu/momentum/stories/udri-drone-test.php

[10] D'SOUZA, Kiran a Troy LYONS. *Volume IV – UAS Airborne Collision Severity Evaluation – Engine Ingestion*[online]. Columbus, OH: The Ohio State University, 2017 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: http://assureuas.org/projects/deliverables/a3/Volume%20IV%20-%20UAS%20Airborne%20Collision%20Severity%20Evaluation%20-%20Engine%20Ingestion.pdf

[11] Přispěvatelé Wikipedie, *Metoda konečných prvků* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2018, Datum poslední revize 7. 12. 2018, 10:28 UTC, [citováno 2019-07-27] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF&oldid=16757081

[12] MACKAY, Steven. Engineering researchers seek remedies for threat posed by drones to commercial airliners. *Virginia Tech* [online]. Blacksburg, VA: Virginia Tech search, 2015, 28.10. 2015 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: https://vtnews.vt.edu/articles/2015/10/102815-engineering-jetenginedronestrike.html

[13] *Air transportation safety investigation report A17Q0162: IN-FLIGHT COLLISION WITH DRONE* [online]. Gatineau: Transportation Safety Board of Canada, 2017, 6 s. [cit. 2019-08-07]. ISBN 978-0-660-25103-5. Dostupné z: http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/aviation/2017/a17q0162/a17q0162.pdf

[14] Aviation Investigation Report A15A0054: Hard landing and runway excursion. *Transportation Safety Board of Canada* [online]. Gatineau, Quebec: The Transportation Safety Board of Canada, 2015, 16. 08. 2015 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/aviation/2015/a15a0054/a15a0054.html

[15] R ENGLISH, William. *National Transportation Safety Board Aviation Incident Final Report* [online]. Washington, D.C: National Transportation Safety Board, 2017 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: https://app.ntsb.gov/pdfgenerator/ReportGeneratorFile.ashx?EventID=20170922X54600&AKey=2&RType=Final&IType=IA

[16] ZHANG, MICHAEL. 737 Passenger Plane Possibly Struck and Damaged by Drone on Landing. *PetaPixel*[online]. PetaPixel, 2018, 14. 12. 2018 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: https://petapixel.com/2018/12/14/737-passenger-plane-slams-into-drone-during-landing-reports-say

[17] Vzdušné bezosádkové systémy - aktuální hrozba současnosti. Řízení letového provozu [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: https://goo.gl/w9w61S

[18] PROCHÁZKA, Petr. Modelářské letiště Sobínka. Rcaeroklubtomasrc.cz: Blog o leteckém modelářství a letectví. [online]. Praha [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: http://www.tomasrc.cz/2010/05/modelarske-letiste-sobinka.html

Seznam obrázků

Obrázek č.1 Curtis N-9 Aerial torpedo [2]
Obrázek č.2 N2C-2 Target Drone [2]
Obrázek č.3 střela V-1 [2]
Obrázek č.4 YB-1B [2]
Obrázek č.5 AQM-34 [2]
Obrázek č.6 QH-50 DASH [2]
Obrázek č.7 Rozdělení UAS podle Doplňku X [1]
Obrázek č.8 Rozdělení vzdušného prostoru [5]
Obrázek č.9 Provoz UAS v třídách G, E a ATZ a CTR/MCTR [1]
Obrázek č.10 Provoz UAS v CTR [1]
Obrázek č.11 Legenda k obrázkům č.9 a č.10 [1]
Obrázek č.12 Dimenze UA [8]
Obrázek č.13 Boeing 737 [8]
Obrázek č.14 Learjet 31A [8]
Obrázek č.15 Místa kolize UA [8]
Obrázek č.16 Výsledky testu [8]
Obrázek č.17 Kolize UA s náběžnou hranou křídla [8]
Obrázek č.18 Místa kolize UA na business jetu [8]
Obrázek č.19 Výsledky testů druhého výzkumu [8]
Obrázek č.20 Vyhodnocení [8]
Obrázek č.21 Porovnání poškození na vodorovných ocasních plochách dopravního letounu [8]
Obrázek č.22 Porovnání poškození na kýlovce dopravního letounu [8]
Obrázek č.23 Následky kolize [9]
Obrázek č.24 Dimenze UA s pevným křídlem [8]
Obrázek č.25 Znázornění UA [10]
Obrázek č.26 Model motoru [10]
Obrázek č.27 Komponenty motoru [10]
Obrázek č.28 Druhy lopatek [10]
Obrázek č.29 Poškozené dmychadlo [10]
Obrázek č.30 Proudový motor [12]
Obrázek č.31 Následky kolize na náběžné a odtokové hraně křídla [13]
Obrázek č.32 Simulované poškození [13]
Obrázek č.33 Poškozený Boeing 737 [16]
Obrázek č.34 Vzdušný prostor letiště Sobínka

Seznam tabulek

Tabulka č.1 Kategorie poškození [8]
Tabulka č.2 Riziko požáru baterie [8]
Tabulka č.3 Rychlosti kolizí [10]
Tabulka č.4 Parametry testů [10]
Tabulka č.5 Kategorie poškození proudového motoru [10]
Tabulka č.6 Výsledky testů kvadrokoptéry [10]
Tabulka č.7 Výsledky testů UA s pevným křídlem [10]