

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**ANALÝZA BEZPEČNOSTI TRUPU  
LETOUNU PŘI ODDĚLENÍ LISTU  
VRTULE**

**2018**

**JAN  
PAŘEZ**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pařez** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457598**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Analýza bezpečnosti trupu letounu kategorie CS-23 při oddělení listu vrtule**

Název bakalářské práce anglicky:

**Hazard analysis of a fuselage of a CS-23 category airplane in a case of a propeller blade separation**

Pokyny pro vypracování:

Rozbor relevantních částí předpisů EASA CS-23 a CS-P. Základní analýza rizik pro vybraný typ letounu a prvotní návrh opatření pro minimalizaci nebezpečí od odděleného listu vrtule a vrtulové hlavy.

Seznam doporučené literatury:

DE FLORIO, Filippo. Airworthiness: an introduction to aircraft certification : a guide to understanding JAA, EASA, and FAA standards. 1st. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 0750669489;9780750669481;  
STOLZER, Alan J., GOGLIA John J. Safety management systems in aviation. Second. Burlington;Farnham;: Ashgate, 2015. ISBN 1472431782;9781472431783;9781472431752;1472431758;  
Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes: CS-23. European Aviation Safety Agency  
Certification Specifications for Propellers: CS-P. In: . European Aviation Safety Agency  
Part 23?Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes. Federal Aviation Administration.  
Minimizing the Hazards from Propeller Blade and hub Failures. Advisory Circular FAA, 9/27/00, 25.905-1.  
System Safety Analysis and Assessment for Part 23 Airplanes. Advisory Circular FAA, 11/17/2011, 23.1309-IE.  
KING AIR 300/350: Pilot's Operating Handbook and FAA Approved Airplane Flight Manual. 2.2. Flushing, Hawker Beechcraft Corporation. New York 11371, 2007, 1406 s. P/N 130-590031-71B10.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Zdeněk Pátek, CSc., VZLÚ, a.s.**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2018**


Platnost zadání bakalářské práce:



doc. Ing. Zdeněk Pátek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valásek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**30.4.2018**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity po dohodě a souhlasu s vedoucím bakalářské práce a GE Aviation Czech jako jejich spoluautory. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, po dohodě, a pokud budu uveden jako její autor.

*V Praze dne 19. 6. 2018*

*Podpis.....*

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali a poskytli potřebné podklady a informace. Především děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Zdeňku Pátkovi, CSc. za věnovaný čas a připomínky, dále Ing. Pavlu Rensovi, Ing. Lukáši Popelkovi Ph.D., GE Aviation Czech za pomoc a odborné rady při realizaci této práce a v neposlední řadě Beechcraft Berlin Aviation za poskytnuté podklady a odbornou stáž.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá rozbořem předpisů civilních dohlédacích úřadů FAA a EASA, jejich relevantních požadavků na letovou bezpečnost a rozdíly v předpisech FAR23 a CS-23. V rámci výzkumné části popisuje detailní postup analýzy bezpečnosti trupu letounu při zasažení listem vrtule pro konkrétní letoun Beechcraft King Air 350. Dále rozebírá funkci systémů a popisuje návrh řešení při zasažení kritických systémů konkrétního letounu. V práci se vychází z veřejně dostupných informací a z informací poskytnutých v rámci spolupráce s GE Aviation Czech a Beechcraft Berlin Aviation. Podnětem k této práci je přestavba letounu na letovou zkušebnu v rámci výzkumného propojení ČVUT na prediktivní údržbu a vývoj leteckých motorů. Tento projekt je podporován GE Aviation, který do projektu dodává technologický demonstrátor v podobě pokročilého turbovrtulového motorů. Analýza se zabývá pouze podmínkami změněnými novou konfigurací letounu, zástavbou nového motoru.

## **Klíčová slova**

analýza bezpečnosti trupu letounu, letová zkušebna, kritické systémy letounu, uvolnění listu vrtule

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with the FAA and EASA regulations, their respective requirements for safety flight and the differences between FAR23 and CS-23 safety regulations. The research part describes a detailed procedure for a propeller blade out related to the Beechcraft King Air 350 fuselage. It further analyzes the function of the systems and describes the design of the solution in dealing with the critical systems of a particular airplane. Work is based on publicly available information and information provided in cooperation with GE Aviation Czech and Beechcraft Berlin Aviation. The initiative for this work is the conversion of the airplane to the Flying Test Bed within the CTU research link for predictive maintenance and development of aircraft engines. This project is supported by GE Aviation, which is supplied by the technology demonstrator of advanced turboprop engine. The analysis deals only with the conditions changed by the new configuration of the aircraft, by a new engine.

## **Keywords**

Analysis of Fuselage Safety, Flying Test Bed, Critical Systems of Airplane, Propeller Blade out Related

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>ICAO a civilní dohlédací úřady.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.</b>	<b>ICAO.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.</b>	<b>FAA.....</b>	<b>12</b>
2.2.1.	Výkonné a regulační úkoly.....	13
2.2.2.	Základní nařízení.....	13
2.2.3.	Poradní oběžníky .....	14
<b>2.3.</b>	<b>EASA.....</b>	<b>14</b>
2.3.1.	Výkonné a regulační úkoly.....	14
2.3.2.	Základní nařízení.....	15
2.3.3.	Specifikace certifikace .....	15
2.3.4.	Poradní materiál .....	15
<b>2.4.</b>	<b>JAA .....</b>	<b>15</b>
2.4.1.	Cíle.....	16
2.4.2.	Funkce .....	16
2.4.3.	JAA-T.....	17
<b>2.5.</b>	<b>ÚCL.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Letoun King Air 350 .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.</b>	<b>Specifikace letounu .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.</b>	<b>Projekt ATP .....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>Související předpisy.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.</b>	<b>Relevantní předpisy dle FAA.....</b>	<b>20</b>
4.1.1.	Předpisy bezpečnosti při uvolnění listu vrtule dle FAR25 .....	20
4.1.2.	Vybrané body z předpisů FAR25 .....	20
4.1.3.	Bezpečnostní metody FAA.....	21
<b>4.2.</b>	<b>Relevantní předpisy EASA .....</b>	<b>21</b>
4.2.1.	Požadavky na analýzu bezpečnosti dle EASA CS-P 150.....	21
4.2.2.	Postup analýzy při uvolnění listu vrtule dle EASA AMD P 150 .....	22
4.2.3.	Bezpečnostní analýzy .....	22
<b>4.3.</b>	<b>Předpisy kategorií letadel .....</b>	<b>23</b>

4.3.1. Kategorie letounů dle FAA.....	23
4.3.2. Kategorie letounů dle EASA.....	23
<b>4.4. Zhodnocení bezpečnostních analýz EASA, FAA.....</b>	<b>23</b>
<b>5 Vliv na bezpečnost.....</b>	<b>24</b>
5.1. Definice pojmů uvedených v analýze.....	24
5.2. Druhy vlivů na bezpečnost.....	24
5.3. Druhy pravděpodobnosti rizik nebezpečí.....	25
5.4. Pravděpodobnost výskytu.....	26
5.5. Statistika nehod.....	28
5.6. Možné příčiny selhání vrtule a vrtulové hlavy.....	30
5.7. Bezpečnostní postupy.....	31
<b>6 Úhel zasažení systémů.....</b>	<b>33</b>
6.1. Trajektorie uvolněného listu.....	33
6.2. Geometrie vějíře.....	34
6.3. Metodika určení úhlů zasažení.....	36
<b>7 Systémy v zasažené oblasti.....</b>	<b>41</b>
7.1. Popis avionických systémů v zasažené oblasti.....	42
7.2. Určení rizika v zasažené oblasti.....	44
<b>8 Kritická selhání.....</b>	<b>46</b>
8.1. Zhodnocení kritických systémů a selhání v zasažené oblasti.....	46
8.2. Kritické selhání.....	46
8.3. Další možné varianty a kombinace zasažení.....	46
8.4. Bezpečnostní analýzy.....	47
8.4.1. Metoda FTA pro jednotku DPU.....	48
8.4.2. Metoda FTA pro jednotku MPU.....	49
<b>9 Opatření pro minimalizaci nebezpečí.....</b>	<b>52</b>
9.1. Navrhovaná opatření.....	52
9.2. Postup při selhání.....	52
<b>10 Závěr.....</b>	<b>53</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 3: Přední pohled King Air 350 (13) .....	19
Obrázek 4: Horní pohled King Air 350 (13).....	19
Obrázek 5: King Air 350 (13).....	19
Obrázek 1: Zasažení trupu letounu King Air listem vrtule (12).....	29
Obrázek 2: Sestava vrtulového jádra (10).....	31
Obrázek 6: Model trajektorie listu vrtule – vějíř (6).....	33
Obrázek 7: 2D model zasažené oblasti .....	35
Obrázek 8: 3D pohled zasažené oblasti .....	35
Obrázek 9: Konfigurace instalace systémů.....	37
Obrázek 10: Model pro určování vstupních a výstupních úhlů .....	38
Obrázek 11: Trajektorie centroidu (6) .....	38
Obrázek 12: Určení maximálního úhlu zásahu (6).....	39
Obrázek 13: Systém TAWS.....	43
Obrázek 14: Popis bloků bezpečnostní metody FTA .....	47
Obrázek 15: FTA Analýza DPU .....	48
Obrázek 16: FTA Analýza DPU selhání.....	48
Obrázek 17: FTA Analýza MPU .....	49
Obrázek 18: FTA Analýza MPU selhání.....	49
Obrázek 19: FTA Analýza MPU přerušení signálu.....	50
Obrázek 20: FTA Analýza ADC .....	50
Obrázek 21: FTA Analýza ADC přerušení signálu .....	51



## **Seznam tabulek a grafů**

Tabulka 1: Klasifikace selhání (7) .....	27
Graf 2: Statistika nehod na území USA pro obchodní letouny (11) .....	28
Graf 3: Statistika příčin nehod letounů kategorie FAR23 (11).....	28
Graf 4: Přehled nehod ve fázi letu (11).....	29
Tabulka 5: Tabulka pravděpodobnosti zasažení pro jednotlivé systémy .....	45

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Graf zasažení trupu letounu od pravé vrtule

Příloha 2: Graf zasažení trupu letounu od levé vrtule

## Seznam použitých zkratk

AC	Advisory Circular
ADC	Air Data Computer
ADF	Automatic Direction Finding
AMC	Acceptable Means of Compliance
APC	Autopilot Computer
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
ATP	Advanced Turboprop
CAD	Computer Aided Design
CAR	Civil Air Regulation
CFR	Code of Federal Regulations
CRT	Cathode Ray Tube
DPU	Data Processing Unit
EASA	European Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FAR	Federal Aviation Regulations
FHA	Functional Hazard Assessment
FMEA	Failure Modes and Effect Analysis
FMS	Flight Management System
FTA	Fault Tree Analysis
FTB	Flying Test Bed
GA	General Aviation
GEAC	GE Aviation Czech
GM	Guidance Material
HPU	HSI Processor Unit
HSI	Horizontal Situation Indicator
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
JAA	Joint Aviation Authorities
LCD	Liquid Crystal Display
MTE	Multiple Turbine Engine
NSE	No Safety Effect
NTSB	National Transportation Safety Board
OSN	United Nations
STE	Single Turbine Engine
TAWS	Terrain Awareness Warning System
TSO	Technical Standard Order
UNS	Universal Avionics Systems
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency

## 1 Úvod

Bezpečnost je relativní pojem lidského myšlení, který lze definovat jako absenci nebezpečí. Bezpečnost souvisí se všemi lidskými činnostmi, a proto je každá občanská společnost organizována tak, aby byla zaručena bezpečnost veřejnosti ve vztahu k vlastní činnosti nebo k jiným činnostem. Ač je to morální povinnost každého z nás, je to také praktická poptávka, protože nehody, které způsobují škody na zdraví a majetku, mají i svou sociální cenu. To je také důvod, proč lidské činnosti mohou způsobit poškození osob a majetku a jsou kontrolovány státními a nadnárodními úřady.

Práce se zabývá specifickým oborem bezpečnosti, letectvím. O tomto oboru se mluví jako o nejbezpečnějším oboru dopravy, k tomu přispívají také dohlédací a kontrolní úřady, jejichž prací je především zaručení bezpečnosti. Letectví je ovlivněno mnoha faktory, které lze rozdělit do 3 skupin. Jsou jimi lidský faktor, faktor přírodních vlivů a technický faktor.

Lidským faktorem je myšlena aktivní účast na letovém provozu a to například piloty, pracovníky údržby letadel, řídicími letového provozu nebo konstruktéry. Je nutné, aby každý účastník měl dostatečné zkušenosti, znalosti a zodpovědnost za svou práci. Pochybení každého z nich může mít katastrofální následky. V první řadě je důležitá opakovaná profesionální příprava pracovníků speciálním tréninkem, požadavky a zkouškami pro danou dovednost. Lidský faktor velmi ovlivňuje psychika, proto je vhodné udržovat pracovníky v psychické i fyzické kondici.

Faktor přírodních vlivů zahrnuje mnoho vnějších, většinou neovlivnitelných vlivů, které mají dopad na letecký provoz a to například vliv počasí, letecký provoz, komunikaci, letiště a mnoho dalších. S moderními technologiemi a sofistikovanými softwary se sice zmenšuje vliv tohoto faktoru. Zároveň se však zvyšují možnosti i množství dopravy a provozu.

Technický faktor je jediným faktorem, který lze předpovídat a většinou plně ovlivnit. Konstrukce musí splňovat mnoho požadavků a předpisů. Tyto předpisy jsou vyvíjeny a testovány týmy odborníků, mnoho z nich vychází z dřívějších nehod. Konstrukce jsou dimenzovány takovým způsobem, aby dokázaly do jisté míry zajistit bezpečnost při kombinaci několika selhání dohromady.

Je velmi důležité, aby nedocházelo ke kombinaci těchto faktorů, avšak k nehodě stačí i selhání jediného. Pilotní chyba může vést k rizikům a ani nejlepší pilot nemůže vykompenzovat fatální selhání letadla. Zprávy o nehodách nabízejí nespočet příkladů selhání. Nehody jsou však často způsobeny kombinací několika selhání, protože v letectví platí vícestupňová bezpečnost. V této práci se zabývám zejména jedním z těchto bezpečnostních faktorů, kterým je stroj – letadlo.

Práce je vytvořená ve spolupráci se společností GE Aviation Czech. Tato společnost s více než stoletou tradicí se zabývá výrobou a montáží leteckých motorů. Historicky byla společnost českým závodem Walter Engines založeným roku 1911, tento závod byl po válce znárodněn a přejmenován na Motorlet. Nyní se v Praze vyrábí motory H80, dále se pracuje na vývoji a následné výrobě nové řady ATP motorů.

## 2 ICAO a civilní dohlédací úřady

### 2.1. ICAO

Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organization) je specializovaná agentura OSN, kterou státy zřídily v roce 1944 pro správu a řízení Úmluvy o mezinárodním civilním letectví (Chicagská konvence).

ICAO spolupracuje se 191 členskými státy konvence a průmyslovými skupinami tak, aby dospěli k dohodě o mezinárodních normách a doporučených praktikách civilního letectví a politikách na podporu bezpečného, účinného, ekonomicky udržitelného a environmentálně odpovědného sektoru civilního letectví. Členské státy ICAO používají tyto zásady, aby zajistily, že jejich místní předpisy v oblasti civilního letectví budou odpovídat celosvětovým normám, což umožní více než 100 000 denních letů v globální síti letecké dopravy bezpečně a spolehlivě fungovat v každé oblasti světa.

Vedle své klíčové práce, kterou vyřešil souhlas řízené mezinárodní spolupráce a politiky mezi členskými státy a průmyslem a mezi mnoha dalšími prioritami a programy, ICAO rovněž koordinuje pomoc a budování kapacit pro státy podporující četné cíle rozvoje letectví, vypracovává globální plány pro koordinaci mnohostranného strategického pokroku v oblasti bezpečnosti a letecké navigace, monitoruje a podává zprávy o mnoha ukazatelích výkonnosti sektoru letecké dopravy a kontroluje možnosti státního dohledu v oblasti civilního letectví a oblasti bezpečnosti a ochrany. (1)

### 2.2. FAA

The Federal Aviation Administration (FAA). Zákon o letecké dopravě z roku 1926 byl základním kamenem federálního úřadu pro civilní letectví. Tato zásadní legislativa byla schválena na požádání leteckého průmyslu, jehož vedoucí představitelé věřili, že letadlo by nemohlo dosáhnout svého plného potenciálu bez federálních zlepšujících opatření a bez dodržování bezpečnostních norem. Poté byl vydán zákon, který pověřoval úřad o vydávání a prosazování pravidel letecké dopravy, licencováním pilotů, osvědčením letadel a zřízením leteckých cest. Pro včasné předcházení nehod a odpovědnosti při plnění úkolů v civilním letectví se ministerstvo obchodu soustředilo především na funkce, jako jsou bezpečnostní pravidla a certifikace pilotů a letadel. V roce 1934 byla pobočka letectví přejmenována na Úřad pro leteckou dopravu, aby odrážela své postavení v rámci dopravního oddělení ministerstva.

Vzhledem k nárůstu obchodních letů předsednictvo podpořilo skupinu leteckých aerolinek, aby zřídily první tři střediska pro poskytování ATC (Air Traffic Control) podél hlavních cest. V roce 1936 samotné předsednictvo převzalo střediska a začalo rozšiřovat tento systém ochrany. Zákon o civilní letecké dopravě z roku 1938 převedl odpovědnost Federálnímu úřadu pro civilní letectví FAA z oddělení dopravy a obchodu na novou nezávislou agenturu. Organizační struktura FAA se od svého vzniku nadále vyvíjí. Všechny předpisy FAA jsou řízeny federálními zákony. (1)

### 2.2.1. Výkonné a regulační úkoly

Hlavními výkonnými a regulačními úkoly agentury v současné době jsou:

- **Bezpečnostní předpisy**, FAA vydává a prosazuje předpisy a minimální normy týkající se výroby, provozu a údržby letadel. Osvědčuje také letadla a letiště, která slouží leteckým dopravcům
- **Řízení vzdušného prostoru a provozu**, bezpečné a účinné využívání vzdušného prostoru je jedním z hlavních cílů FAA. Ta provozuje síť letištních věží, řídicích středisek řízení dopravy a stanovišť letových služeb. Rovněž rozvíjí pravidla pro leteckou dopravu, přiděluje využití vzdušného prostoru a řídí leteckou dopravu
- **Letecké navigační zařízení**, FAA buduje nebo instaluje vizuální a elektronické pomůcky pro leteckou navigaci. Současně udržuje, provozuje a zajišťuje kvalitu těchto zařízení a udržuje další systémy na podporu letecké navigace a ATC, včetně hlasových a datových komunikačních zařízení, radarových zařízení, počítačových systémů a vizuálních zobrazovacích zařízení na stanicích letových provozů
- **Civilní letectví v zahraničí**, FAA dohlíží na bezpečnost v letectví, podporuje civilní letectví v zahraničí a účastní se mezinárodních konferencí. Letecké informace se vyměňují se zahraničními orgány. FAA schvaluje opravy letadel a přístrojů, poskytuje technickou pomoc. Pořádá školení a projednává „Bilaterální dohody o bezpečnosti letectví“ s jinými orgány s „prováděcími postupy pro letovou způsobilost“ umožňujícími a usnadňujícími vzájemnou certifikaci leteckých výrobků, které jsou přepravovány mezi Spojenými státy a jinou zemí
- **Komerční kosmická doprava**, FAA upravuje a podporuje průmyslovou dopravu v kosmickém průmyslu. Autorizuje komerční spouštěcí zařízení a soukromé odpalování prostorových užitečných zatížení na spotřebních raketových vozících
- **Výzkum**, inženýrství a vývoj FAA provádí výzkum a rozvíjí systémy a postupy potřebné pro bezpečný a účinný systém letecké navigace a ATC. Pomáhá vyvíjet letadla, motory a vybavení a testuje, či vyhodnocuje letecké systémy, přístroje, materiály a postupy
- **Registruje**, letadla a zaznamenává potřebné dokumenty. Vyvíjí specifikace pro letecké mapy a publikuje informace o hlavních cestách. Letištní služby a další technické předměty v letectví

Jako shrnutí činností Federální letecké správy lze říci, že FAA odpovídá za veškerou bezpečnost civilního letectví na území s jeho působností. (1)

### 2.2.2. Základní nařízení

Předpisy FAA vycházejí z federálních zákonů. Předpisy, které musí splňovat dnešní letadla, se nacházejí ve 14. kodexu Federálního předpisu (14 CFR). V hlavě 14 je uspořádáno 68 předpisů do tří svazků v oblasti letectví a vzdušného prostoru. Čtvrtý svazek se věnuje ministerstvu dopravy a pátý svazek se zaměřuje na NASA. Těchto 68 předpisů lze rozdělit do následujících tří kategorií: (1)

- Administrativní
- Certifikát letové způsobilosti
- Provoz letové způsobilosti

FAA odkazuje na zvláštní předpisy pomocí výrazu „14 CFR part XX“, a to kvůli praktičnosti. Obvykle se také používá označení "FARXX" (FAR23).

Část FAR23 (Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic and Commuter Category Airplanes) se zabývá se předpisy pro letouny kategorie 23. (5)

### 2.2.3. Poradní oběžníky

Advisory Circulars (ACs) je poradenský materiál, kde FAA vydává doporučené pokyny pro dodržení předpisů k zachování letové způsobilosti. Tyto publikace definují přijatelné prostředky, není to však jediný způsob, jak splnit nebo prokázat soulad s předpisy o letové způsobilosti. To znamená, že lze použít i jiné způsoby dodržování, avšak v tomto případě je obtížné přesvědčit FAA o platnosti splnění předpisu a zvoleného postupu.

Z obecně informativní povahy nejsou AC závazné, některé mají však vliv na normy nebo předpisy. Vzhledem k tomu, že regulaci lze interpretovat různými způsoby, může AC nabídnout specifické pokyny a poskytnout standardizovanou interpretaci, zejména pokud jsou předpisy nebo požadavky jinak nejasné.

## 2.3. EASA

The European Aviation Safety Agency (EASA) je nezávislá instituce Evropského společenství, která má právní a autonomní pravomoci v právních, správních a finančních otázkách. Tento jediný orgán byl vytvořen přijetím nařízení Evropského parlamentu a Rady ze dne 15. července 2002 o zavedení právního systému letecké bezpečnosti a regulace životního prostředí. Činnost agentury EASA začala 28. září 2003 a po přechodném období v Bruselu se agentura přestěhovala do Kolína nad Rýnem (Německo). (1)

### 2.3.1. Výkonné a regulační úkoly

Úkoly agentury se od začátku působení rozšířily a v současné době zahrnují všechny oblasti letectví. Hlavní úkoly agentury lze rozdělit do několika částí:

- **Vytváření předpisů**, vypracování právních předpisů v oblasti bezpečnosti letectví a poskytování technického poradenství Evropské komisi a členským státům
- **Programy inspekce**, odborné přípravy a normalizace, které zajistí jednotné uplatňování evropských právních předpisů v oblasti bezpečnosti letectví ve všech členských státech
  - **Bezpečnost**, a environmentální certifikace letadel, motorů a součástí
  - **Schvalování organizací**, pro návrh letadel po celém světě a výrobní organizace mimo EU
  - **Certifikace organizací**, a personálu provozu letadel
  - **Certifikace organizací řízení letového provozu (ATM) a leteckých navigačních služeb (ANS)**

- **Certifikace** a dohled nad výcvikovými organizacemi (ATC v rámci agentury EASA) a organizacemi, které nejsou členy EU, poskytující služby v rámci EU a poskytovateli služeb v celém Evropském společenství
- **Povolení provozovatelů** z třetích zemí (mimo EU) (1)

### 2.3.2. Základní nařízení

Základní nařízení (Basic Regulations) stanoví společné základní požadavky na zajištění vysoké úrovně jednotné bezpečnosti civilního letectví a ochrany životního prostředí. Vyžaduje, aby komise EASA přijala nezbytná pravidla k zajištění jejich jednotnému uplatňování pro všechny členské země.

Dále je nezbytné, aby komise vypracovávala a schvalovala přezkoumání stávajících pravidel a vytvářela nové. V roce 2002 převzala EASA odpovědnost za schvalování konstrukčních výrobků, dílů a přístrojů a postupů, které jsou používány, vyráběny pod dohledem členských států EU s výjimkou výrobků předpisem 1113, článek 1.2 (Výrobky zabývající se vojenskými, celními, policejními službami). Komise také převzala a schválila mechanismus, který uznává typová osvědčení vydané před zářím 2003. Důsledek je, že EASA nemusí vydávat nová typová označení pro stávající produkty.

Základní nařízení se dále rozděluje na jednotlivé kategorie dle použití (Initial Airworthiness, Continuing Airworthiness, Air Crew atd.) tyto kategorie se následně rozdělují na jednotlivé části (Part). Část zabývající se certifikací letadel je označovaná jako Part21 (Certification of aircraft related products, parts and appliances, and design and production organization). (1)

### 2.3.3. Specifikace certifikace

Part21 se dále rozděluje na jednotlivá nařízení CS (Certification Specifications) pro konkrétní použití a kategorie letounů. Pro letadla kategorie 23 je toto nařízení označeno CS-23 (Normal, Utility, Acrobatic and Commuter Aeroplanes). Pro vrtule je nařízení označeno CS-P (Propellers). (3)

### 2.3.4. Poradní materiál

Acceptable Means of Compliance and Guidance Material (AMC and GM) je poradenský materiál, kde EASA vydává doporučené pokyny pro dodržení předpisů k zachování letové způsobilosti obdobně jako FAA vydává AC.

## 2.4. JAA

Joint Aviation Authorities (JAA) byla uskupena na Evropské konferenci o civilním letectví (ECAC). Tu zastupovaly dohlédací úřady civilního letectví z řady evropských států, které se dohodly na spolupráci při přípravě a provádění společných standardů a postupů v oblasti bezpečnosti letectví. Cílem této spolupráce bylo primárně poskytnout vysoké a konzistentní standardy bezpečnosti a „rovných podmínek“ pro hospodářskou soutěž v Evropě. Velký důraz byl kladen také na harmonizaci předpisů JAA s již platnými předpisy FAA Spojených států. Členství v JAA bylo založeno na podpisu dokumentu o dohodách, který původně podepsaly tehdejší členské státy na Kypru v roce

1990. Na základě těchto ujednání a souvisejících závazků lze shrnout cíle a funkce, které byly základem pro JAA. (1)

#### 2.4.1. Cíle

- **Bezpečnost letectví,** Zajistit bezpečnost prostřednictvím spolupráce mezi členskými státy, aby státy JAA dosáhly vysoké a konzistentní úrovně bezpečnosti letectví
  - **Spolupráce s EASA,** Spolupracovat s EASA při plnění jejích funkcí a úkolů v souladu s dohodnutým programem zajišťujícím zapojení zemí, které nejsou členy EASA a JAA, s cílem zachovat stávající jednotu v nařízeních o celoevropském rozměru a vzájemné přijímání, uznávání certifikátů, schválení a provádění rozhodnutí o budoucnosti rozhodnutí JAA
  - **Efektivita obchodu,** Dosáhnout nákladově efektivního bezpečnostního systému, který by přispěl k efektivnímu průmyslu civilního letectví
  - **Upevnění společných norem,** Přispívat jednotnou aplikací nejvyšších možných společných norem a pravidelným přezkoumávání stávající regulační situace ke spravedlivé a rovnocenné hospodářské soutěži v rámci členských států
  - **Mezinárodní spolupráce,** Spolupracovat s jinými regionálními organizacemi nebo vnitrostátními orgány států, které hrají důležitou úlohu v civilním letectví, aby dosáhly alespoň úrovně bezpečnosti JAA a podpořily celosvětovou implementaci harmonizovaných bezpečnostních norem a požadavků prostřednictvím uzavření mezinárodních ujednání a účastí v programech technické pomoci bez ovlivnění kompetencí (1)

#### 2.4.2. Funkce

Práce JAA byla zahájena v roce 1970. Jejím původním cílem bylo pouze vytvoření společných certifikačních předpisů pro „velké“ letouny a letecké motory. Mělo to vyhovět potřebám evropského průmyslu a zejména výrobkům vyráběných mezinárodním společenstvím. Od roku 1987 se její práce rozšířila na provozní, údržbové, licenční a certifikační, konstrukční normy pro všechny třídy letadel. Přijetím nařízení Evropského parlamentu a Rady Evropy a následného zřízení EASA byl v evropském letectví vytvořen nový regulační rámec.

Podle tohoto nařízení byla vnitrostátní regulace v oblasti letové způsobilosti pro členské státy EU nahrazena nařízením EU a certifikační úkoly byly převedeny z vnitrostátních orgánů na EASA. Státy, které nejsou členy EU, si zachovávají svou odpovědnost ve všech oblastech. V srpnu 2005 byla navržena a schválena Radou JAA a Evropskou konferencí o civilním letectví (ECAC) stanovení, která nasměrovala budoucnost JAA a navrhuje přeměnu JAA na JAA-T (T pro „Transition“) později na školící kancelář (Training Office „TO“) ve městě Hoofddorp (Nizozemsko). (1)



### 2.4.3. JAA-T

JAA-T existovala a fungovala se dvěma kanceláři. Hlavní kancelář a školící kanceláři:

- Hlavní kancelář „JAA-LO“ (Liaison Office) spolupracovala mezi EASA a úřady civilního letectví s nečlenskými státy EASA a JAA. Úkolem bylo začlenit činnosti těchto států do činností EASA a JAA-LO navíc zajistila obecné řízení tvorby předpisů, včetně činností v oblasti provozu a licencování.

- Výcvikový úřad „JAA-T0“ (Training Office) poskytl společenstvu nečlenských zemí příslušný výcvik, aby se ujistil, že je dostatečně obeznámen s evropskými pravidly a předpisy v oblasti letecké bezpečnosti. Pomáhá členským státům JAA, které nejsou členy EASA, v jejich úsilí o získání členství v EASA. Od 1. července 2009, po rozpuštění JAA-T, pokračuje JAA-TO ve vzdělávacích kurzech jako holandská nadace a přidružený orgán ECAC. (1)

## 2.5. ÚCL

Úřad pro civilní letectví, státy vyspělých zemí zřídily vlastní instituce a orgány, které zaručují bezpečnost letu na jejich území. Jejich hlavními úkoly je především:

- **Předepisovat**, bezpečnostní požadavky a procedury pro certifikáty, konstrukce a úkony

- **Informovat**, o důležitých částech ohledně předpisů. To se provádí různými způsoby např. úřad vydává technické předpisy, technické normy, oběžníky a to na požádání nebo jiným způsobem. V současné době je možno všechny dokumenty dohledat na internetu

- **Kontrolovat**, letecké materiály, konstrukce a výrobce. Je kontrolováno dodržování všech příslušných předpisů. Kontrola může být provedena různými způsoby, s odpovídající účastí příslušného orgánu

- **Certifikovat**, letecké materiály, výrobce a příslušné organizace. Ty jsou deklarovány příslušným certifikátem a prohlášení o splnění požadovaných předpisů (1)

## 3 Letoun King Air 350

### 3.1. Specifikace letounu

Letoun King Air 350 společnosti Beechcraft je letoun certifikovaný dle FAR23. Disponuje dvěma výkonnými turbovrtulovými motory. Je navržen a vybaven pro let v podmínkách VFR a IFR, pro denní i noční dobu letu a má vybavení proti námraze. Je rovněž použitelný pro provoz na malých letištích i na nezpevněných drahách. Návrh trupu letounu King Air je kombinace výkonného draku se současnými, a technologicky moderními komponenty, které poskytují spolehlivé, ekonomické a všestranně použitelný letoun.

Letoun má celokovovou konstrukci s dolnoplošným samonosným křídlem. Výrazným specifikem tohoto letounu je zadní část trupu s vodorovnou ocasní plochou umístěnou na vrchol kýlové plochy. Ocasní vodorovné plochy jsou uspořádány do „T“ tvaru, tato konstrukce zlepšuje ovladatelnost celého letounu. Pro zlepšení výkonu a ovladatelnosti je křídlo zakončeno winglety. Gondola motoru obsahuje jak motor, tak hlavní podvozek letounu. Upevnění gondol na křídlo snižuje vibrace a hluk v kabině. Obecně se pro letoun používají vrtule o průměru 105“.

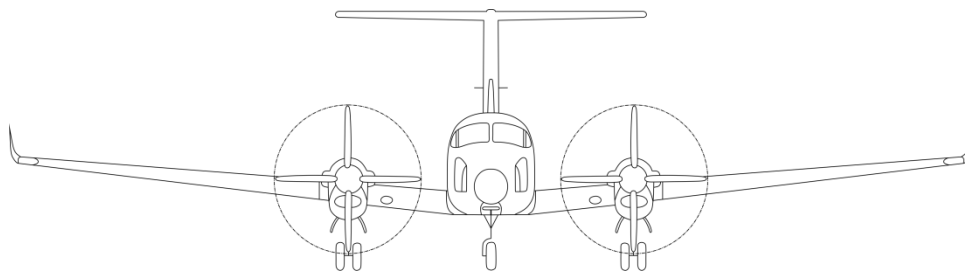
Trup je navržen konvenční skořepinovou strukturou s použitím vysokopevnostních hliníkových slitin. Základní tvar průřezu kabiny je čtvercovo - oválný, nikoli kulatý. Toto řešení zlepšuje pohodlí pro cestující.

Letoun je certifikovaný pro 15 cestujících, avšak obvyklá konfigurace je pro 6-10 cestujících a 2 členy posádky. (13)

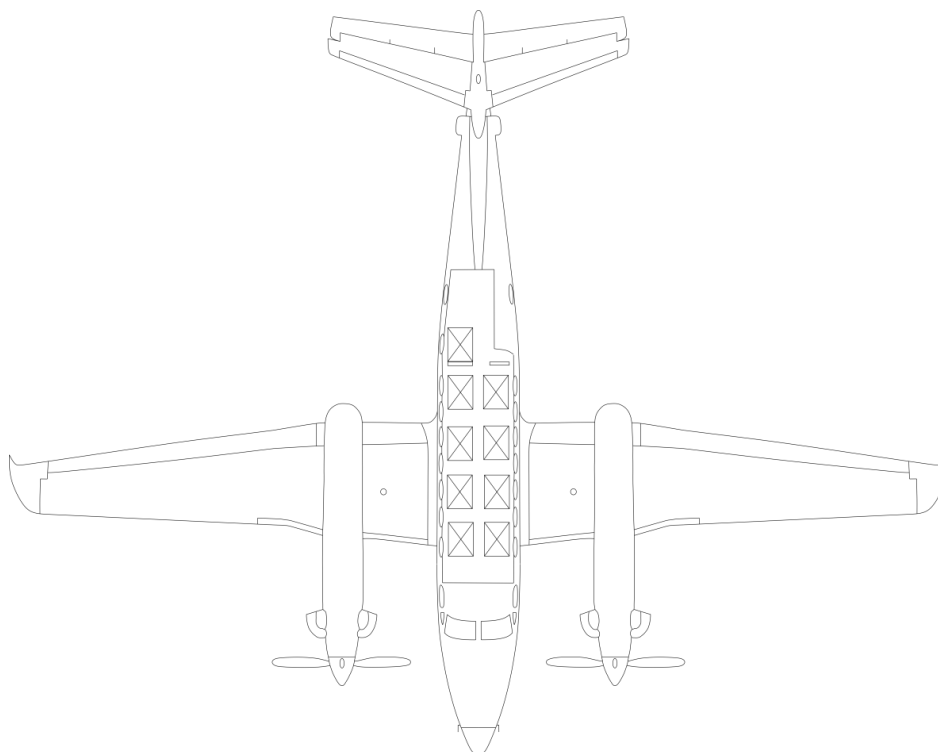
### 3.2. Projekt ATP

Projekt ATP je projektem firmy GE Aviation pro vývoj a výrobu nového turbovrtulového motoru. Nová řada motorů bude mít výkony od 850HP (630kW) až po nejsilnější 1650HP (1230kW) a to při snížení spotřeby paliva až o 20%. Dále se také očekává zvýšení výkonu ve vysokých letových hladinách a díky moderním technologiím i snížení hmotnosti.

V rámci projektu ATP bude letoun King Air 350 upraven na létající zkušebnu - FTB (Flying Test Bed). Na pravém křídle zůstane umístěný původní turbovrtulový motor PT6A-60A od firmy Pratt & Whitney Canada. Na levé křídlo bude instalován nový turbovrtulový motor firmy GE Aviation. Nový motor bude osazen novou vrtulí s kompozitovými listy od firmy McCauley. Vzhledem k neznámé geometrii nové vrtule bude pro analýzu uvažováno údajů dle certifikace původní pohonné jednotky.



Obrázek 1: Přední pohled King Air 350 (13)



Obrázek 2: Horní pohled King Air 350 (13)



Obrázek 3: King Air 350 (13)

## 4 Související předpisy

### 4.1. Relevantní předpisy dle FAA

Pro letouny kategorie FAR23 je bezpečnost při selhání vrtule definována dle §23.2410 tak, že musí být „zabráněno nepřetržitému bezpečnému letu a přistání, nebo pokud nelze zajistit bezpečný let a přistání, minimalizovat tato nebezpečí na tolerovatelné minimum“. Pro detailnější analyzování bezpečnosti konkrétního letounu, s ohledem na jeho kategorii zkušebního letounu, lze uvažovat vyšší a přísnější kategorii letounu, tedy FAR25.

#### 4.1.1. Předpisy bezpečnosti při uvolnění listu vrtule dle FAR25

Při analýze bezpečnosti letounu při uvolnění listu vrtule se vychází z jednotlivých bodů následujících předpisů 14 CFR (Title 14, Code of Federal Regulations).

§ 25.571 Damage-tolerance and fatigue evaluation of structure

§ 25.903 Engines

§ 25.905 Propellers

Následný postup analýzy poté vychází ze struktury oběžníku FAA.

AC 20-128A (Design Considerations for Minimizing the Hazards Caused by Uncontained Turbine Engine and Auxiliary Power Unit and Fan Blade Failure) (8)

#### 4.1.2. Vybrané body z předpisů FAR25

FAA vydala předpis 14 CFR část 25 v roce 1978. Vyžadovala, aby v souladu s požadavky §25.571 zahrnovala úvahy o následcích poškození při selhání vrtule.

V té době §25.571 písm. e) stanovil hodnocení odolnosti proti poškození. Letoun musel být schopen úspěšně dokončit let, během něhož došlo k poškození v důsledku:

- nárazu 4librového předmětu při pravděpodobné provozní rychlosti letounu v nadmořské výšce 8 000 stop
- náraz listu vrtule nebo lopatky dmychadla
- nekonzistentní porucha motoru při otáčkách s vysokou energií

V roce 1990 vydala FAA pozměňovací návrh 25-72 a zrušila požadavek na minimalizaci nebezpečí při poruše vrtule. Namísto toho pozměňovací návrh přidal nový odstavec d) k §25.905 „Vrtule“, který rozšířil rozsah ochrany letounu před poškozením způsobeným nárazem vrtule. Odstavec §25.905 písm. d) uváděl konstrukční opatření k minimalizaci nebezpečí pro letoun v případě selhání listu vrtule, nebo jejího uvolnění z důvodu poruchy hlavy vrtule. Dále uváděl úvahu zahrnující poškození konstrukce a primárních systémů způsobených nárazem listem vrtule.

Odstavec 25.905 (d) se týkal nejen strukturálního poškození, které se mohlo vyskytnout, ale také škody, které mohly vést k nebezpečí pro letoun, včetně:

- poškození kriticky důležitých systémů
- nebezpečí způsobená nevyvážeností vrtule v důsledku selhání nebo uvolnění listu vrtule.

Odpovědnost za poškození trupu a systémů letounu od uvolněné vrtule byla poté odstraněna z §25.571, protože FAA zjistila, že není vždy možné zajistit strukturální celistvost při poruše listů vrtule, která se dnes používají. Záměrem předpisu §25.905 písm. d) je tedy zajistit, aby poškození způsobené selháním nebo uvolněním listu vrtule bylo v zásadě řešeno stejným způsobem, jakým se řeší poškození malých částí motoru řešeno v §25.903. (6)

**Relevantní stávající směrnice.** Oběžník AC-20-128A (Design Considerations for Minimizing Hazards Caused by Uncontained Turbine Engine and Auxiliary Power Unit Rotor and Fan Blade Failures) (8) popisuje techniky minimalizace nebezpečí pro letoun po selhání dmyhadla motoru. Techniky, které jsou v něm popsány, jsou také použitelné při minimalizaci nebezpečí při uvolnění listu vrtule a hlavy vrtule. Tyto techniky zahrnují:

- oddělení kritických systémů
- separace jednotlivých funkcí
- začlenění sekundárních funkcí
- stínění a ochrana štítem

Oběžník AC 20-128A (8) také definuje oblast, která bude pravděpodobně zasažena úlomky při selhání motoru, tato oblast je totožná i pro uvolnění listu vrtule. (6)

#### 4.1.3. Bezpečnostní metody FAA

Metody analýzy dle FAA jsou dané pro konkrétní systémy a kategorie nebezpečí. Požadavky na bezpečnostní metody jsou uvedené v AC 23.1309 (7). Pro všechny základní systémy se však doporučuje zjednodušená základní strukturovaná analýza FTA.

## 4.2. Relevantní předpisy EASA

### 4.2.1. Požadavky na analýzu bezpečnosti dle EASA CS-P 150

Analýza bezpečnosti při selhání vrtule se provádí s cílem posoudit pravděpodobné důsledky každého poruchového stavu v daných provozních podmínkách letounu a okolních podmínkách. Tato analýza zvažuje:

- systém vrtule v typické konfiguraci včetně předpokládaných změnách zástavby
- následné sekundární poruchy systémů
- kombinace více poruch uvedených v CS-P 150 (d) nebo poruchy, které mají za následek katastrofální rizika

V analýze musí být provedeno shrnutí těchto poruch, které by mohly vést k významným rizikům při selhání vrtule společně s odhadem pravděpodobnosti výskytu těchto poruch.

V tomto shrnutí musí být zřetelně označené jakékoliv selhání dílu uvažováno jako kritické selhání.

Odhadovaná pravděpodobnost individuálních poruch může být nedostatečně přesná, aby bylo možné posoudit celkovou míru nebezpečí. Pro splnění předpisu je přijatelné uvažovat o tom, že záměr předpisu je dosažen, pokud pravděpodobnost výskytu nebezpečné poruchy vrtule nebude vyšší než  $1 \times 10^{-8}$  za letovou hodinu vrtule. Bude rovněž uznáno, že při řešení pravděpodobností tohoto malého rozsahu není absolutní důkaz možný z důvodu mnoha ovlivňujících faktorů a proto se spoléhá na inženýrský úsudek a předchozí zkušenosti v kombinaci se zkušebními filosofiemi. (3)

#### 4.2.2. Postup analýzy při uvolnění listu vrtule dle EASA AMD P 150

Cílem bezpečnostní analýzy je zajistit, aby bylo riziko pro letadlo ze všech podmínek selhání vrtule přijatelně nízké. Základem je koncepce, že přijatelné celkové riziko konstrukce vrtule je dosažitelné při řízení jednotlivých závažných a nebezpečných rizik vrtule na přijatelné úrovni. Tento koncept zdůrazňuje snížení pravděpodobnosti úměrně závažnosti jeho následků. Bezpečnostní analýza by měla požadovat konstrukční cíle vrtule tak, aby nedošlo k větším katastrofálním následkům, které by překročily požadovanou tolerovanou pravděpodobnost výskytu. Analýzu lze rozdělit do několika bodů: (4)

- Základní rozbor geometrie a vliv na letoun,
- Analýza a určení rizik pro jednotlivé díly a komponenty,
- Typické vybavení letounu
- Vliv nebezpečného rizika (Hazard) při uvolnění vrtule
- Vliv velkého rizika (Major) při uvolnění vrtule
- Stanovení účinků a opatření pro minimalizaci nebezpečí

#### 4.2.3. Bezpečnostní analýzy

EASA popisuje různé techniky pro provádění analýzy bezpečnosti. Existují i jiné srovnatelné techniky, které mohou být použity. Různé varianty či kombinace těchto technik jsou rovněž přijatelné. U vrtulí, odvozených od již certifikovaného návrhu, je přijatelné omezit rozsah analýzy na modifikované součásti nebo provozní podmínky a jejich účinky na zbytek vrtule.

Pro ověření inženýrského úsudku jsou k dispozici různé metody pro posouzení příčin, stupně závažnosti a pravděpodobnosti případných selhání. Různé typy analýz jsou založeny na induktivních nebo deduktivních přístupech, akceptovatelné mohou být i analýzy založené na inženýrském úsudku. Příkladem těchto analýz můžou být základní analýzy. (3) (4)

- MMEL/FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)
- FTA (Fault Tree Analysis)

### 4.3. Předpisy kategorií letadel

#### 4.3.1. Kategorie letounů dle FAA

Letouny kategorie FAR23 jsou definovány ve FAR23.3 jako letouny s maximální vzletovou hmotností 5 670 kg (12 500 liber) nebo méně a konfigurací 9 sedadel včetně sedadel pro piloty. Pro speciální případy je vzletová hmotnost 8 618 kg (19 000 liber) nebo méně a konfigurace 9 sedadel. (5)

#### 4.3.2. Kategorie letounů dle EASA

Certifikace letounů dle EASA v normální kategorii (CS23.2005, (3)) se vztahuje na letouny s konfigurací 19 sedadel pro cestující nebo méně a maximální schválenou vzletovou hmotností 8 618 kg (19 000 liber) nebo méně. (3)

- Kategorie 1, u letounů s maximální konfigurací sedadel 0 až 1 cestujících
- Kategorie 2, u letounů s maximální konfigurací sedadel od 2 do 6 cestujících
- Kategorie 3, u letounů s maximální konfigurací sedadel od 7 do 9 cestujících
- Kategorie 4, u letounů s maximální konfigurací sedadel od 10 do 19 cestujících

### 4.4. Zhodnocení bezpečnostních analýz EASA, FAA

Bezpečnostní analýzy při uvolnění listu vrtule a vrtulové hlavy jsou dle výše zmíněných předpisů FAA FAR23 a EASA CS-23 shodné s ohledem na konečný výsledek analýzy, a to ke dni vytvoření této práce. Rozdílné jsou mezi těmito předpisy kategorizace letounů. Analýzy dle FAA však požadují podrobnější rozbor dané problematiky, k tomuto rozboru jsou volně přístupné potřebné podklady a návody, jak postupovat a analýzu vytvořit. Analýza dle FAA také používá více prostředků a postupů pro specifikaci nebezpečí, postup dle EASA více spoléhá na inženýrský úsudek, avšak při určení pravděpodobnosti jsou postupy EASA přísnější.

Dále v této práci budu postupovat dle předpisů a postupů FAA a to z důvodu lepší dostupnosti podkladů od FAA.

## 5 Vliv na bezpečnost

Pro analýzy a specifikaci nebezpečí se obecně využívají definované pojmy. Ty jsou shodné pro FAA i EASA. Rozdílné je přiřazení těchto potenciálních rizik pro selhání jednotlivých systémů.

### 5.1. Definice pojmů uvedených v analýze

**Kritická součást** (Critical Component). Každá součást, jejíž porucha by přispěla nebo způsobila poruchovou situaci, která by zabránila pokračujícímu bezpečnému letu a přistání letounu se nazývá kritická. Tyto komponenty by měly být zváženy jednotlivě, ale zároveň i ve vztahu k ostatním komponentům, které by mohly být poškozeny stejným fragmentem nebo jinými fragmenty ze stejné nekonzistentní události.

**Úhel rozprostření fragmentů** (Fragment Spread Angle). Úhel měřený vpřed a vzad od roviny rotace vrtule

**Oblast zasažení** (Impact Area). Oblast letounu, která může být ovlivněna nekonzistentními fragmenty uvolněnými v případě porušení listu vrtule nebo při selhání hlavy vrtule.

**List vrtule** (Propeller Blade). Plocha vrtule od upevnění v hlavě po vnější rozteč lopatky. Zahrnuty jsou všechny součásti připevněné k listu, jako jsou protizávaží nebo svorky.

**Nekonzistentní selhání** (Uncontained Failure). Pro účely posouzení letounu podle této analýzy je to jakákoliv porucha, která vede k uvolnění fragmentů z listu vrtule, včetně celé sestavy vrtule a hlavy. (6)

### 5.2. Druhy vlivů na bezpečnost

- **NSE (No Safety Effect)**

**Žádné bezpečnostní riziko.** Stav selhání, který by při selhání neměl žádný vliv na bezpečnost (tj. Podmínky selhání, které by neměly vliv na provozní způsobilost letounu nebo zvýšení pracovního zatížení posádky).

- **Minor**

**Malé riziko.** Stav selhání, který by při selhání neměl významně snížit bezpečnost letounu a zahrnout činnosti posádky. Posádka je v rámci svých možností schopná vyřešit daný problém. Drobné poruchové podmínky mohou zahrnovat mírné snížení bezpečnostních mezí nebo funkčních schopností, mírný nárůst pracovní zátěže posádky (např. změny běžných letových plánů) nebo určité fyzické nepohodlí cestujících nebo palubních průvodčích.

- **Major**

**Velké riziko.** Stav selhání, který by při selhání snížil schopnost letounu nebo schopnost posádky vyrovnat se s nepříznivými provozními podmínkami do té míry, do jaké by



došlo k významnému snížení bezpečnostních mezí nebo funkčních schopností. Kromě toho má stav selhání výrazný nárůst pracovní zátěže posádky, nebo v podmínkách, které narušují výkonnost posádky a nepohodlí pro letovou posádku nebo fyzické utrpení cestujících či palubního personálu, případně včetně zranění.

- **Hazardous**

**Nebezpečný.** Stav selhání, který by při selhání snížil schopnost letounu nebo schopnost posádky vypořádat se s nepříznivými provozními podmínkami do té míry, že by došlo k:

- i. Velkému snížení bezpečnostních rezerv nebo významného omezení funkčnosti,
- ii. Vyšší pracovní zátěž až fyzická nemožnost letové posádky, které selhání nedovoluje splnit přesné nebo úplné zadání jejich úkolů, až fyzická nemožnost provedení úkonů,
- iii. Vážné nebo smrtelné zranění cestujícího, s výjimkou letové posádky.

- **Catastrophic**

**Kritický (katastrofický) stav.** Stav selhání, u kterého se očekává, že bude mít za následek vícenásobné úmrtí cestujících, nebo nezpůsobilost či smrtelné zranění člena letové posádky obvykle při ztrátě letounu.

Poznámka:

- i. Fráze „očekává se, že bude mít následek“ nemá za cíl vyžadovat 100% jistotu, že následky budou vždy katastrofické. Fráze je uvedena pouze z právního důvodu při extrémních případech.
- ii. Termín „katastrofální“ byl definován v předchozích verzích poradních materiálů jako podmínka selhání, která by zabránila pokračování bezpečného letu a přistání. (3) (7)

### 5.3. Druhy pravděpodobnosti rizik nebezpečí

- **Frequent**

Častý. Stav pravděpodobně mnohokrát se vyskytující.

- **Occasional**

Příležitostný. Stav pravděpodobně se vyskytující.

- **Remote**

Málo pravděpodobné. Není pravděpodobné, že se vyskytne, ale je to možné.

- **Improbable**

Nepravděpodobný. Velmi nepravděpodobně se vyskytující.

- **Extremely improbable**

Velmi nepravděpodobný. Téměř nemožné, že se vyskytne. (3) (7)

#### 5.4. Pravděpodobnost výskytu

Pravidla pravděpodobnosti jsou založena na historických datech nehod, analýzách systémů a technickém posouzení pro každou kategorii letounu. Při posuzování přijatelnosti konstrukce dle FAA uznala odborná komise potřebu stanovit racionální hodnoty pravděpodobností. Historické důkazy naznačují, že pravděpodobnost katastrofální nehody v omezených nebo ztížených podmínkách je přibližně jedna na deset tisíc letových hodin nebo  $10^{-4}$  za letovou hodinu pro letouny SRE.

Je rozumné předpokládat, že pravděpodobnost fatální nehody ze všech těchto stavů selhání nebude vyšší než jedna za sto tisíc letových hodin, nebo  $10^{-5}$  za letovou hodinu u nově navrženého letounu. Přípustná průměrná pravděpodobnost výskytu selhání za letovou hodinu je  $10^{-5}$ , takto byla rovnoměrně rozdělena pravděpodobnost mezi rozdílné poruchové podmínky, což vedlo k přidělení nejvýše  $10^{-6}$  na každou.

Horní limit pro průměrnou pravděpodobnost výskytu selhání za letovou hodinu pro katastrofické selhání by byl  $10^{-6}$ , což určuje přibližnou hodnotu pravděpodobnosti pro výraz „Mimořádně nepravděpodobné“.

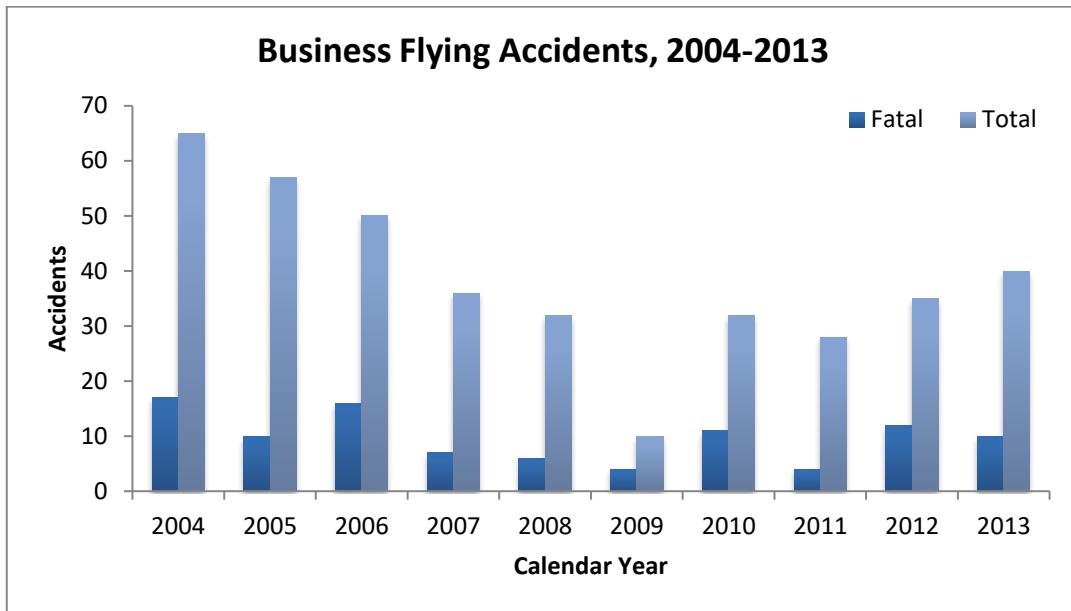
Podmínky selhání s méně závažnými následky by mohly být relativně pravděpodobnější. Podobně letouny nad 6 000 liber mají nižší počet fatálních nehod, proto mají nižší pravděpodobnostní hodnoty pro katastrofické poruchové podmínky. (7)

Klasifikace selhání	No Safety Effect	Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Přípustná pravděpodobnost	Frequent	Occasional	Remote	Improbable	Extremely improbable
Vliv na letoun	Žádný vliv na provozní schopnosti nebo bezpečnost	Mírné snížení funkčních schopností nebo bezpečnosti	Výrazné snížení funkčních schopností nebo bezpečnosti	Velké snížení funkčních schopností nebo bezpečnosti	Obvykle ztráta trupu
Vliv na cestující	Žádný vliv na cestující	Fyzické nepohodlí cestujících	Fyzický strach cestujících, případně včetně zranění	Vážné nebo smrtelné zranění cestujícího	Smrtelné zranění více cestujících
Vliv na posádku	Žádný vliv na posádku	Mírné zvýšení pracovního vyčerpání nebo použití bezpečnostních postupů	Fyzické nepohodlí, výrazné zvýšení pracovního zatížení	Fyzický strach nebo nadměrná zátěž zhoršuje schopnost plnit úkoly	Smrtelné zranění nebo pracovní neschopnost
Kategorie letounu	Přípustná kvantitativní pravděpodobnosti, softwarové (SW) a komplexní hardwarové (HW) zabezpečení				
Kategorie I	Žádná pravděpodobnost nebo požadavek na zabezpečení SW a HW	$P < 10^{-3}$ Poznámka 1	$P < 10^{-4}$ Poznámka 1 a 3	$P < 10^{-5}$ Poznámka 3	$P < 10^{-6}$ Poznámka 2
Kategorie II	Žádná pravděpodobnost nebo požadavek na zabezpečení SW a HW	$P < 10^{-3}$ Poznámka 1	$P < 10^{-5}$ Poznámka 1 a 3	$P < 10^{-6}$ Poznámka 3	$P < 10^{-7}$ Poznámka 2
Kategorie III	Žádná pravděpodobnost nebo požadavek na zabezpečení SW a HW	$P < 10^{-3}$ Poznámka 1	$P < 10^{-5}$ Poznámka 1 a 3	$P < 10^{-7}$ Poznámka 3	$P < 10^{-8}$ Poznámka 2
Kategorie IV	Žádná pravděpodobnost nebo požadavek na zabezpečení SW a HW	$P < 10^{-3}$ Poznámka 1	$P < 10^{-5}$ Poznámka 1 a 3	$P < 10^{-7}$ Poznámka 3	$P < 10^{-9}$ Poznámka 2
Poznámka 1: Číselné hodnoty udávají pořadí pravděpodobnostního rozsahu a jsou zde uvedeny jako reference. Poznámka 2: Na úrovni funkce letounu nedojde k žádnému selhání v důsledku katastrofické poruchy Poznámka 3: Sekundární systém nemusí být povinen splnit pravděpodobnostní cíl. Pokud je instalován, měl by splňovat uvedená kritéria.					

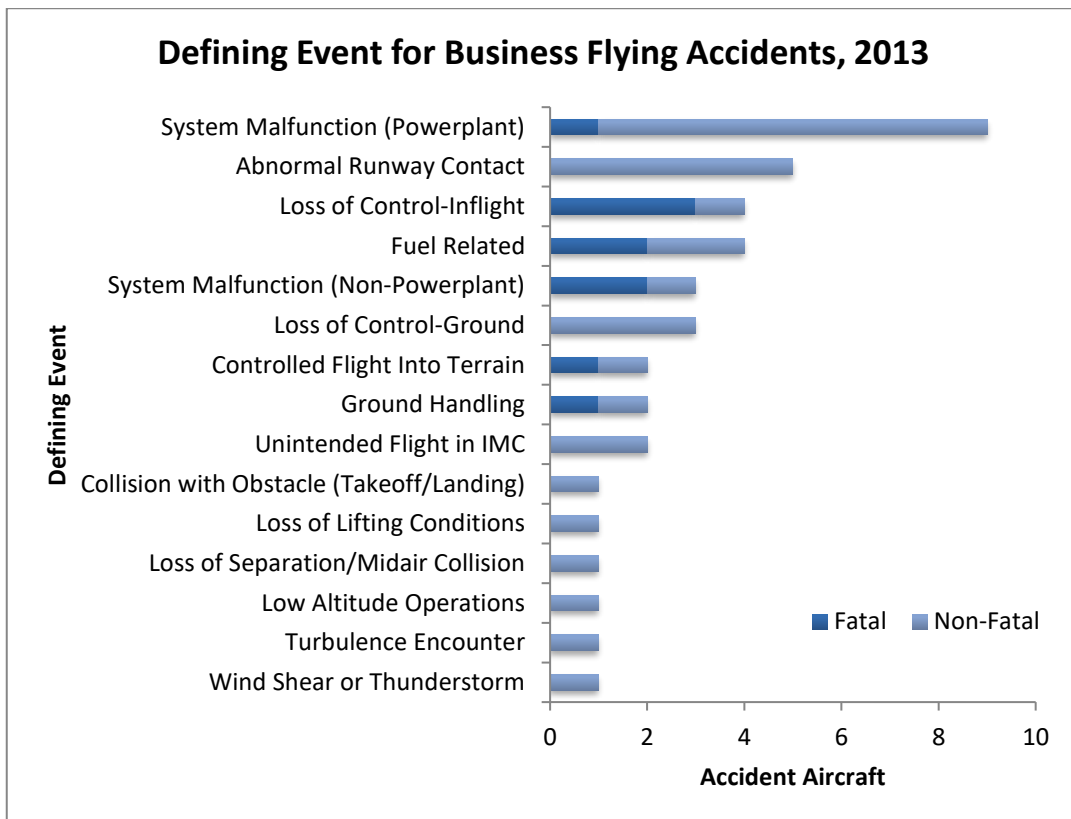
Tabulka 1: Klasifikace selhání (7)

### 5.5. Statistika nehod

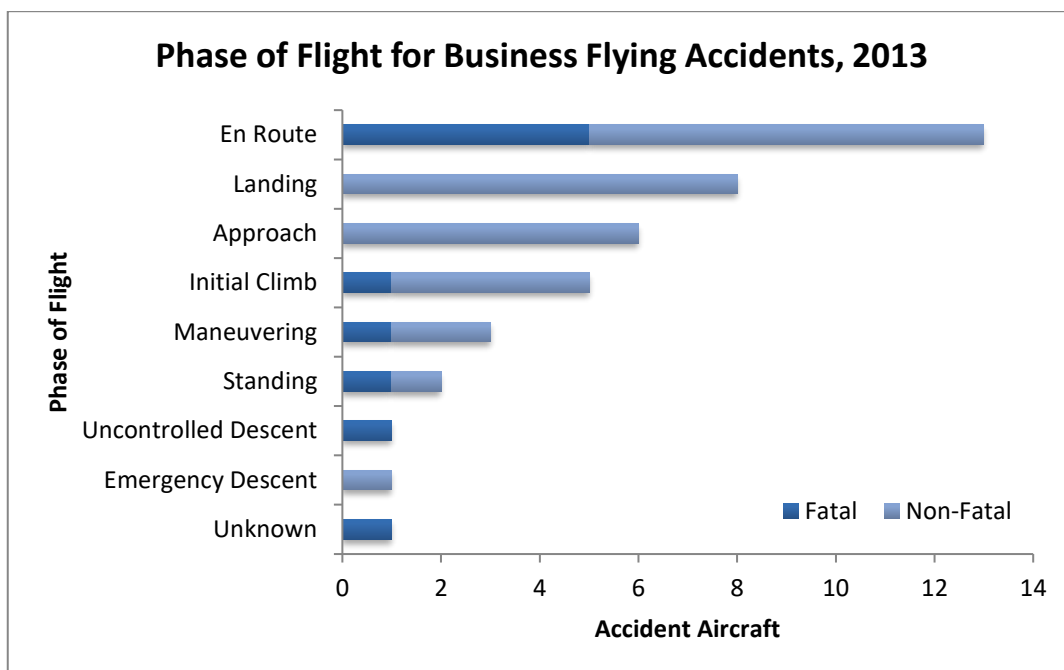
Přehled statistik nehod na území USA mezi roky 2004-2013 pro obchodní letouny kategorie FAR 23. Statistika pro území Evropy není centrálně dohledatelná. EASA převádí vyšetřování leteckých nehod na dohlédací úřady jednotlivých zemí, které tyto statistiky ve většině případů veřejně neuvádí. (9)



Graf 2: Statistika nehod na území USA pro obchodní letouny (11)



Graf 3: Statistika příčin nehod letounů kategorie FAR23 (11)



Graf 4: Přehled nehod ve fázi letu (11)



Obrázek 4: Zasažení trupu letounu King Air listem vrtule (12)

## 5.6. Možné příčiny selhání vrtule a vrtulové hlavy

Nekonzistentní selhání vrtule může být způsobeno mnoha předvídatelnými i nepředvídatelnými důvody. Při vzletu se obvodová rychlost špičky listu vrtule přibližuje rychlosti zvuku. Listy odolávají vibracím od motoru a vibracím způsobených proudem vzduchu. Dalším faktorem je odstředivé zatížení v uložení listů ve vrtulové hlavě, to může dosahovat zatížení až 20 tun na list (napětí v uchycení listu může být až 250 MPa).

Listy jsou také zatíženy ohybem a krutem, pro celý list lze uvažovat nesouměrné střídavé zatížení. Napětí, které namáhají vrtulový list a hlavu vrtule, jsou koncentrované v malých oblastech, tyto místa jsou poté iniciátory únavového lomu a stávají se kořenem vruby, kde dochází k mikroskopickým tržným či střížným poruchám, ty se poté šíří až po mezní stav do úplného lomu. U kompozitových vrtulí je složité předvídat lomovou mechaniku, jelikož záleží na mnoha faktorech a na zpracování samotných kompozitů.

Po ztrátě jednoho listu z vrtule dochází k celkovému nevyvážení rotace vrtule. To způsobuje vysoké vibrace, které mohou mít za následek odtržení celé vrtule nebo v extrémních případech odtržení celé pohonné jednotky.

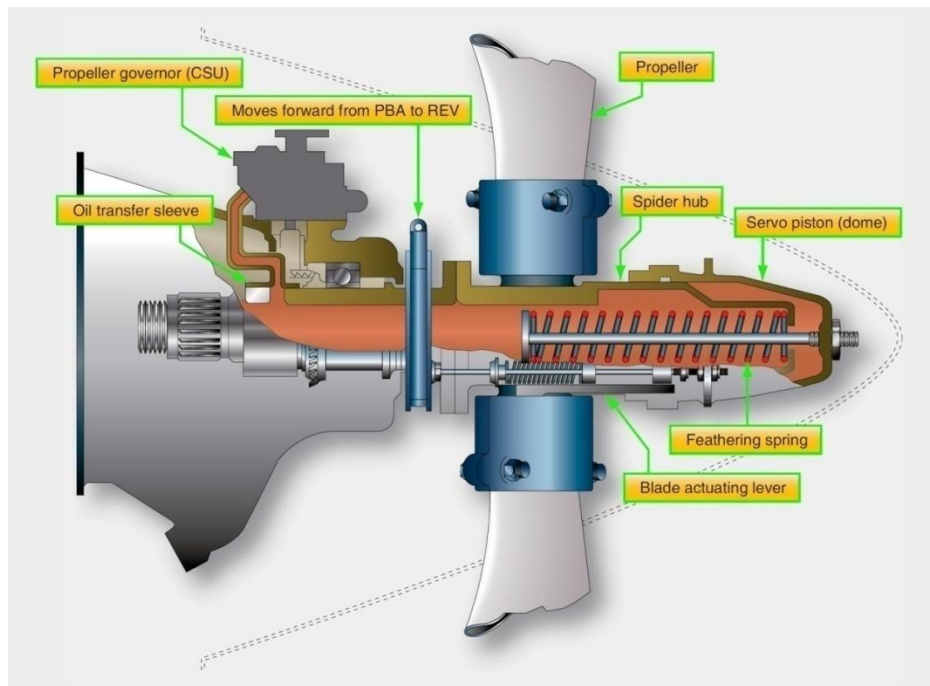
Po nekonzistentním selhání vrtule z důvodu uvolnění listu následuje vypnutí poškozené pohonné jednotky, to způsobí asymetrický tahu letounu, což má za následek zvýšené zatížení na posádku. Příčiny selhání listu vrtule a vrtulové hlavy jsou nejčastěji:

- **List vrtule**, dnes má značná část vrtulí kompozitové listy, dále se využívají slitiny hliníku. Tyto vrtule jsou navrhovány pro vysoké výkony a musí odolat vibracím. Nejčastější model utržení listu vrtule je utržení v kořeni, pro tento model selhání jsou i obvykle dimenzovány. Utržení v jiné části listu není příliš obvyklé a dochází k němu ve většině případů při nárazu jiným předmětem (např. Bird Strike). Všechny vrtule musí splňovat předpisy a certifikace vydávané dohlédacími úřady.

- **Hlava vrtule**, hlava má za funkci upevnit listy vrtule k hnací hřídeli. V případě stavitelných listů vrtule se mohou listy otáčet v hlavě dle aktuálních potřeb letu. Nejčastějším důvodem uvolnění listu je selhání uchycení listu vrtule, je proto nutné tomuto problému věnovat pozornost při údržbě. Častým důvodem tohoto selhání je špatné seřízení a nepozornost.

Obvykle jsou problémy s hlavou vrtule způsobené prasknutím vlivem únavy. Korozní inicializace uvnitř hlavy může způsobit mikroskopické praskliny a vruby. Pokud je hlava vystavena vysokému provoznímu namáhání, dochází k šíření prasklin do kritické meze. Před selháním je prasklá hlava možná poznat náhlým únikem maziva nebo únikem oleje, případně vibracemi.

- **Ztráta tlaku oleje**, pro ovládání natáčení listů vrtule je používán integrovaný regulátor. Ten je ovládán elektricky, nebo využívá tlakový olej z hlavní dodávky od motoru. Interní čerpadlo poté zvyšuje tlak oleje. Tlakový olej namáhá součásti a při poruše tohoto zařízení může dojít k uvolnění některých částí. Nejčastější příčinou tohoto selhání jsou vysoké otáčky na hřídeli, přetočení. (10)



Obrázek 5: Sestava vrtulového jádra (10)

## 5.7. Bezpečnostní postupy

- **FHA (Functional Hazard Assessment)**

FHA je systematická a komplexní metoda pro analyzování funkcí letounu a systémů, které identifikují pravděpodobné selhání. Analýza FHA se zabývá zranitelnostmi systémů, neřeší podrobnou analýzu skutečných příčin.

V závislosti na rozsahu funkcí, které mají být zkoumány, a na vztahu mezi funkcemi systému mohou být přijaty různé přístupy k FHA. V případech, kde existuje jasná vazba mezi funkcemi a systémy a kde jsou vzájemné vztahy systému a funkcí poměrně jednoduché, může být proveditelné samostatné FHA pro každý systém. Postup analýzy je z pohledu shora, od neobecnějších vztahů, dolů. (7)

- **FTA (Fault Tree Analysis)**

Analýza stromu poruchových stavů je strukturovaná, deduktivní a postupná analýza shora. Používá se k identifikaci stavu selhání a událostí, které by způsobily selhání. FTA je grafickou metodou identifikace logického vztahu mezi jednotlivými stavy selhání a selhání primárního prvku nebo součásti, případně dalších událostí nebo jejich kombinací, které mohou způsobit selhání. Poruchový strom by měl být vyvinut na nejnižší úroveň, pro kterou lze poruchovou míru doložit. Informace získané z

provozních zkušeností, přijatelných průmyslových zdrojů, dat ze zkoušek výrobce nebo z analýzy FMEA mohou být použity jako vstupy pro události nejnižší úrovně. (7)

- **MMEL/FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)**

Strukturovaná a postupná analýza zdola, která se používá k vyhodnocení vlivu každého možného selhání prvku nebo součásti na systém a letoun. Při správném formátování by měla pomoci při identifikaci skrytých poruch a možných příčinách všech selhání. Analýza poskytuje metodiku a podrobné pokyny, které lze použít k provedení tohoto typu analýzy.

FMEA lze dělit na vady součástí a technologií, a na vady funkčnosti. U moderních rozsáhlých jednotek a systémů není analýza FMEA pro součásti prakticky proveditelná současným stavem techniky. Poté se uvažuje se selháním celého prvku, systému. V tomto kontextu může být FMEA mnohem funkčnější než ostatní analýzy. (7)



## 6 Úhel zasažení systémů

Za účelem analyzování bezpečnosti trupu letounu při zasažení listem vrtule byl vytvořen vlastní 3D model konkrétního letounu King Air 350. Jako výchozí podklady pro model skořepiny letounu byly použity veřejně dostupné informace a obrázky dostupné z (13). Systémové vybavení letounu bylo nafoceno, naměřeno a vymodelováno za pomoci stáže v Beechcraft Berlin Aviation.

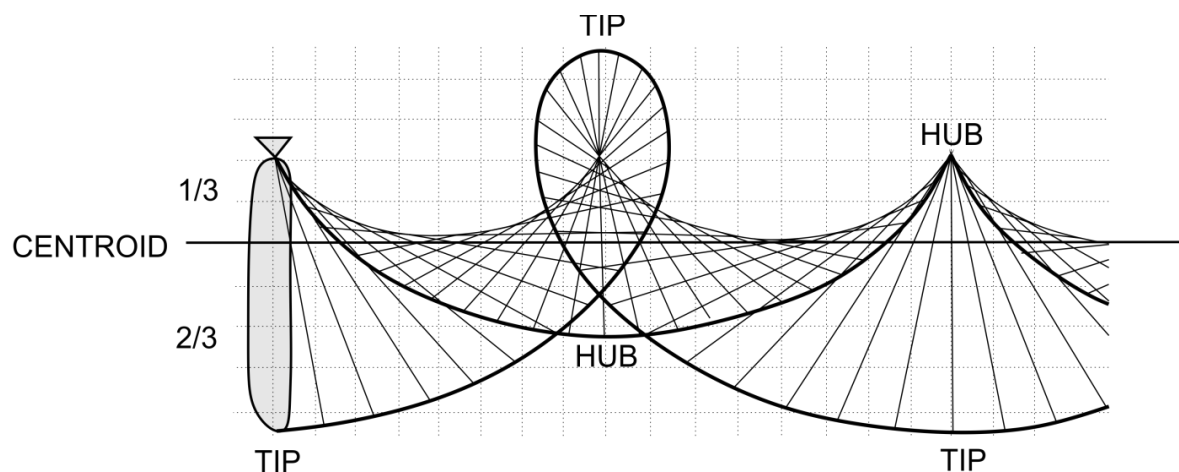
Model byl modelován v softwaru SolidWorks s dostupnou studentskou licenci.

### 6.1. Trajektorie uvolněného listu

Při provádění bezpečnostní analýzy je třeba zvolit vhodný model uvolněného listu vrtule. Určení správného modelu je velmi náročné s ohledem na další nepředpokladatelné vlivy, kterými může být například proměnlivá geometrie kompozitového listu, přírodní vlivy, nebo proměnlivé prostředí. Jako možný model lze využít zjednodušený model na obrázku 6. Tento model nezahrnuje další nepředpokladatelné vlivy a vychází z dlouhodobých výsledků zkoušek a zkušeností. Je definován a schválen pro použití dle (6).

Model trajektorie uvolněného listu zobrazuje maximální šířku trajektorie. Při rotaci vrtule dochází k rozdílným úhlovým rychlostem listu z důvodu rozdílné vzdálenosti vrcholu listu a kořenu listu od středu otáčení. Osa těžiště listu se uvažuje v jedné třetině délky listu a uvažuje se, že při uvolnění se pohybuje po přímce. Rozdílné úhlové rychlosti vrcholu listu a kořenu listu způsobují pohyb po trajektorii zobrazené na obrázku 6.

Rozdílné otáčky způsobují rozdílné periody trajektorie vrcholu. Z tohoto důvodu se uvažuje celková šířka uvolněného listu jako dvě rovnoběžné symetrické přímky od osy těžiště, které spojují vrcholy křivky trajektorie (uvedeno dále na obr. 11).



Obrázek 6: Model trajektorie listu vrtule – vějíř (6)

## 6.2. Geometrie vějíře

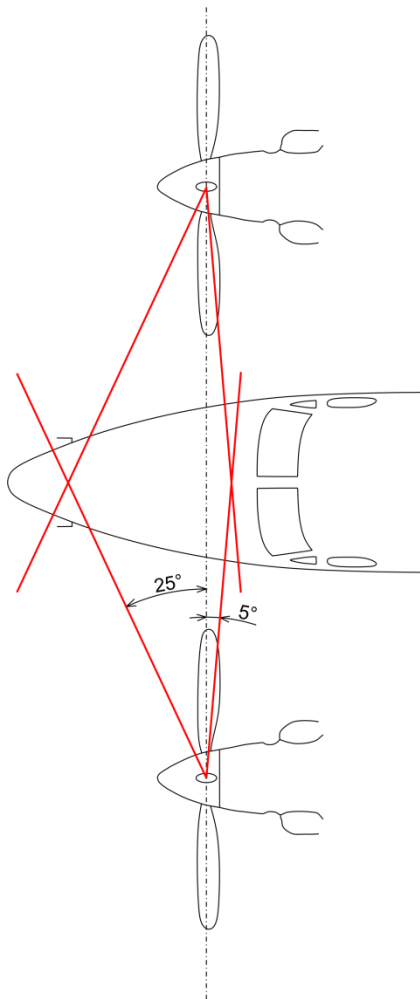
Relevantní stávající směrnice AC 20-128A (8) popisuje techniky minimalizace nebezpečí pro letoun po selhání rotoru motoru. Postup, který je v něm popsán, je také použitelný při minimalizaci poškození od uvolněného listu vrtule. Tento postup zahrnuje:

- Oddělení kritických systémů
- Izolační funkce
- Začlenění redundantních funkcí
- Stínění

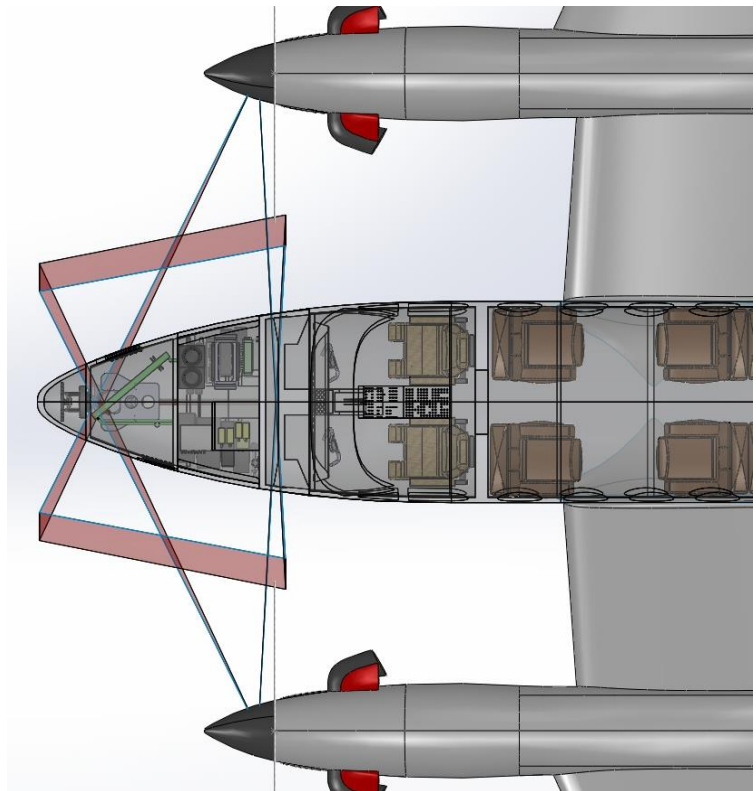
Předpis AC 20-128A (8) také definuje oblast, která bude pravděpodobně zasažena nekontrolovaným nárazem při selhání pohonné jednotky. Oblast zasažení, která by měla být uvažována při selhání listu vrtule, se však může lišit podle velikosti, tvaru a složení listu. Oblast nárazu od uvolněného listu vrtule, která by měla být brána v úvahu pro tradiční vrtule, je založena na úhlu rozptýlení  $\pm 5$  stupňů od roviny rotace vrtulí.

Kompozitové listy vrtule a netradiční vrtule (např. propfan nebo vrtule se šavlovitými listy) mají netradiční geometrii listů, která vykazuje méně předvídatelnou trajektorii při selhání s trajektorií až o 25 stupňů před rovinou otáčení vrtulí. Na základě těchto informací by měla být oblast zasažení pro letouny s netradičními a kompozitovými vrtulemi hodnocena individuálně. Oblast zasažení by se měla stanovit na základě testů, analýz, nebo obojího. Lze použít i údaje z vrtulí s podobnými fyzikálními a provozními charakteristikami pro stanovení oblasti nárazu.

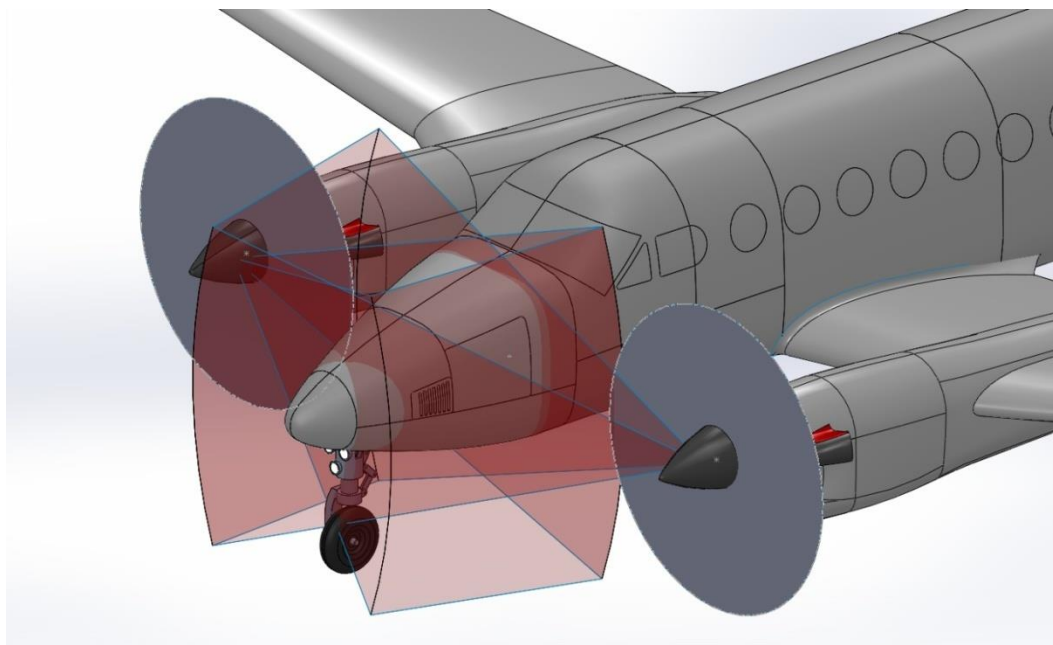
Pro následující analýzu je vhodné, s ohledem na bezpečnost, uvažovat úhel rozptýlení za osou rotace vrtule  $-5$  stupňů a před osou rotace vrtule  $+25$  stupňů. Geometrie rozptylu fragmentů je znázorněna na následujících obrázcích 7 a 8.



Obrázek 7: 2D model zasažené oblasti



Obrázek 8:3D model zasažené oblasti



Obrázek 8: 3D pohled zasažené oblasti

**Pravděpodobnost zasažení letounu**

Pravděpodobnost, že uvolněný list vrtule zasáhne trup, se rovná poměrné části úhlu, který může zasáhnout trup a celkového úhlu rotace vrtule. Pro levou pohonnou jednotku by výpočet vypadal následovně:

$$R = \frac{\varphi_{in} - \varphi_{out}}{360^\circ} = \frac{234^\circ - 159^\circ}{360^\circ} = 0,201$$

Obdobný výpočetní model platí pro jednotlivé systémy. U systémů se porovnává poměrná část zasažení komponenty systému a celkového úhlu rotace vrtule.

### Podélný úhel

Model selhání předpokládá přední úhel zasažení od roviny rotace vrtulí  $+25^\circ$  a zadní  $-5^\circ$ , pak celkový podélný úhel zasažení je maximálně  $30^\circ$ . Pokud může být kritická součást zasažena pouze v omezené poloze uvnitř tohoto rozpětí, pak zasažení této komponenty systému může být zohledněno v závislosti na podélné poloze uvnitř rozptylu. Pro zjednodušení lze uvažovat pouze se šířkou listu vrtule jako s maximální plochou zásahu tj.  $5^\circ$ . Pro exaktní řešení by bylo nutné pomocí testů zjistit křivku pravděpodobností zásahů na podélnou oblast, která není po celé šířce lineární.

$$L = \frac{\delta_{front} - \delta_{rear}}{30^\circ} = \frac{5^\circ}{30^\circ} = 0,167$$

Celková geometrická pravděpodobnost pouhého zasažení systému, bez ohledu na jeho funkci, je potom součinem těchto dvou pravděpodobností. (8)

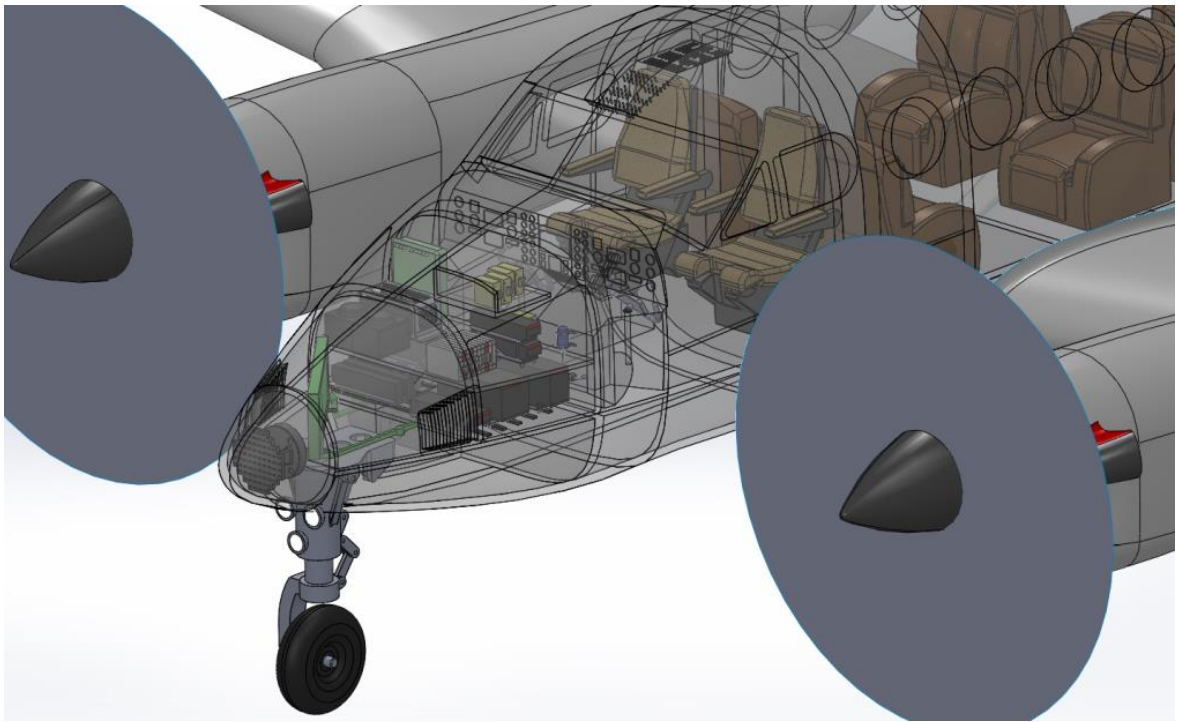
Z výše uvedených výpočtů je pravděpodobnost pouhého zasažení letounu rovna následujícímu výpočtu:

$$P = R * L = 0,201 * 0,167 = 0,0336$$

### 6.3. Metodika určení úhlů zasažení

Pravděpodobnost zasažení systémů je řešeno pomocí geometrické metody. Tato metoda zahrnuje uspořádání průřezů a půdorysů, v těchto jednotlivých řezech se poté dopočítávají potřebné úhly zasažení. Letoun je připraven jako počítačový 3D model celého letounu. Toto uspořádání zobrazuje umístění komponentů systémů, včetně hydraulických vedení, avioniky, elektrických kabelových svazků, spojovacích skříní, pneumatických a potrubní klimatizačních systémů.

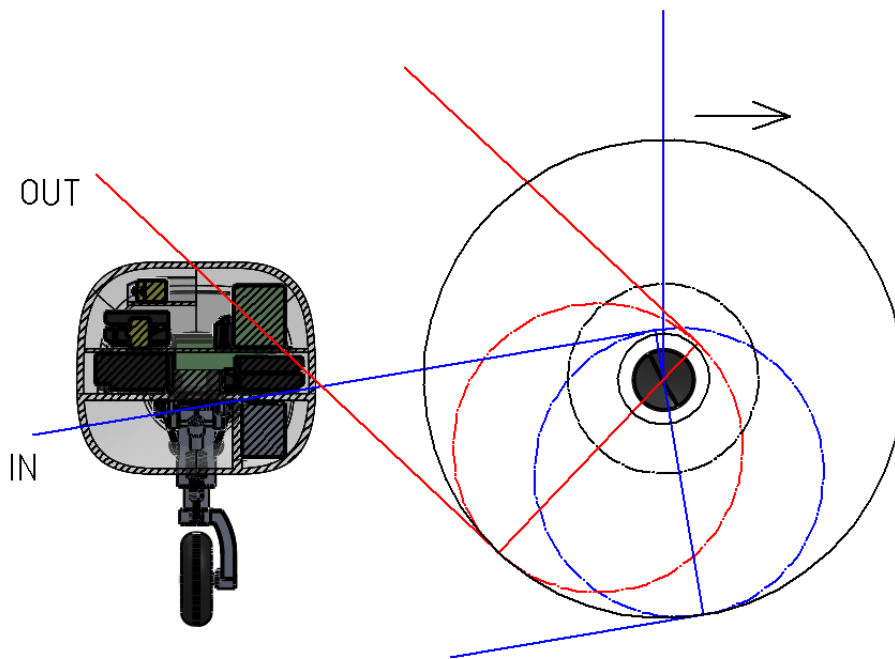
V rovině rotace vrtulí je umístěna základní rovina. Od této roviny jsou ve výše zmíněných úhlech odsazené ostatní roviny. Každá z těchto rovin obsahuje pohled na všechny součásti systému v daném řezu a příslušnou vnější obálku letounu.



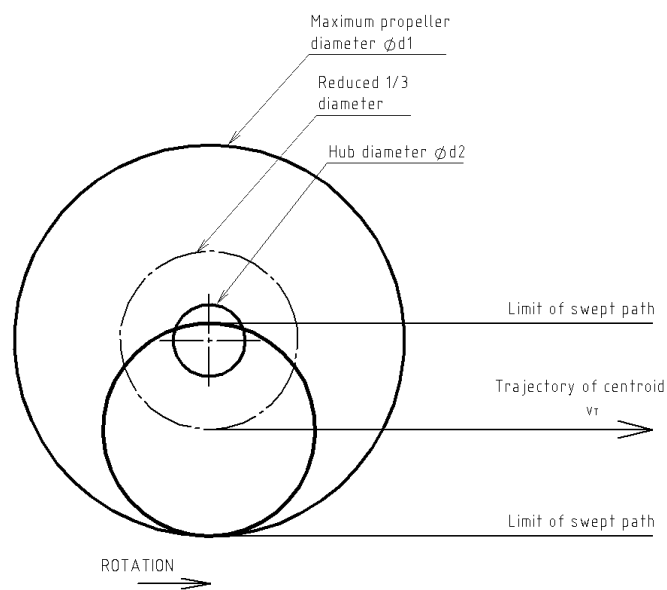
Obrázek 9: Konfigurace instalace systémů

Samotná oblast zasažení je řešena způsobem minimálního úhlu vstupu uvolněné vrtule a maximálního úhlu výstupu. Tím je myšlena obálka šířky uvedená v kapitole 5.1 a na obrázku 11 a 12. Jako minimální úhel vstupu je myšlen stav, kdy se poprvé obálka šířky vrtule dotkne analyzovaného systému. Reálně je tento stav popsitelný jako stav, kdy při různých otáčkách může dojít ke kontaktu vrcholu vrtule a systému. Maximální úhel výstupu je poté obdobný jako stav, kdy je možné dojít ke kontaktu vrcholu vrtule a systému.

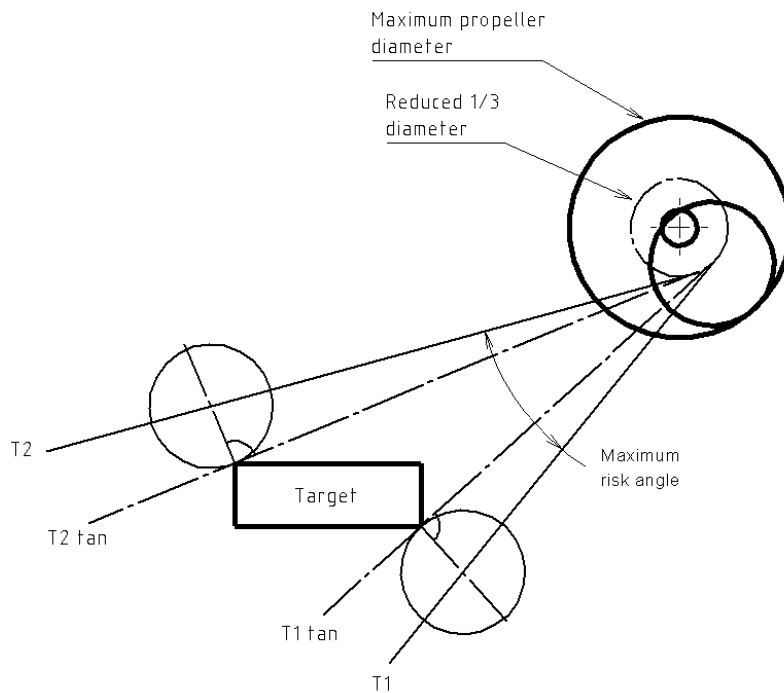
Tyto úhly jsou poté dopočítány a uvedeny jako úhel vstupu a výstupu. Tímto způsobem jsou vytvořeny samostatné grafy pro všechny roviny listu vrtule. Výsledný graf (příloha 1 a 2) je brán jako nejhorší možná varianta z jednotlivých grafů pro každou dílčí rovinu.



Obrázek 10: Model pro určování vstupních a výstupních úhlů



Obrázek 11: Trajektorie centroidu (6)



Obrázek 12: Určení maximálního úhlu zásahu (6)

Takto zaznamenané úhly se poté zapisují do tabulek tak, aby bylo možné studovat souběžné důsledky. Z obrázku 12 je tedy zřejmé, že účinky zasažení systémů jsou určeny jako nejhorší možné případy.

Tyto případy zasažení listem vrtule, které mají potenciál způsobit katastrofický stav, jsou v analýze hodnoceny ve snaze vyčísřit skutečnou pravděpodobnost nebezpečí, která bude ve všech případech záviset na následujících faktorech:

- Umístění motoru, ze kterého pochází fragment, a jeho směr otáčení
- Umístění kritických systémů a kritické struktury
- Fáze listu a geometrie fragmentu
- Translační trajektorie fragmentu listu
- Podélný úhel šíření fragmentu
- Konkrétní fáze letu, otáčky, při němž dojde k poruše
- Specifický rizikový faktor spojený s vnějšími vlivy

### Umístění motoru

Analýza by se také měla zabývat účinky na systémy během jednoho letu po vysazení jedné pohonné jednotky s pravděpodobností 1,0. Vzhledem k tomu, že příčinou může být jedna z pohonných jednotek, tak riziko z každé jednotky je později zprůměrováno pro počet pohonných jednotek.

Celý graf úhlů zasažení (příloha 1 a 2), pak zřetelně ukazuje, že určité škody na systému jsou rozdílné pro list vrtule každé z pohonných jednotek v důsledku směru rotace vrtule.

### Fáze letu

Určité typy poškozených systémů mohou být katastrofální pouze během určité fáze letového profilu, jako je např. zasažení protilehlého motoru během vzletu. Zvláštní případ pak může být odpovídajícím způsobem zohledněn.

Nejpravděpodobnějším časem, kdy dojde k nekontrolovanému selhání listu vrtule, je doba vzletu, při které je motor nejvíce namáhán. Pro určení nejzávažnějšího selhání během fáze letu se využívají následující hodnoty závažnosti selhání: (11)

- Vzlet před rychlostí odpoutání 35 %
- Rychlost odpoutání po první snížení výkonu 20 %
- Stoupání 22 %
- Let v letové hladině 14 %
- Sestup 3 %
- Přiblížení 2 %
- Přistání / pojíždění 4 %

### Další rizikové faktory

Rizikové faktory, jako je požár, ztráta tlaku v kabině atd., jsou individuálně posuzována pro každý případ. V případech, kde je to možné, tak za použití konzervativního technického a odborného úsudku.

Výše uvedené faktory se používají ve spojení s rozsahem kritické trajektorie, který je definován tak, že vytváří pravděpodobnost specifické události vyskytující se při jakémkoli náhodném rozložení listu vrtule.

Tato hodnota je pak zohledněna rizikovým faktorem posuzovaným pro daný případ. Lze odvodit vypočtenou pravděpodobnost katastrofy pro každý konkrétní případ. Všechny pravděpodobnosti jednotlivých případů jsou poté předloženy a shrnuty. Průměrné hodnoty letů se získávají zprůměrováním hodnot pro všechny letové hodiny. Pro výpočet letové střední hodnoty pro každý model selhání lze použít následující postup:

- Z tabulky pravděpodobnosti zasažení (tabulka 5) lze určit oblast, kde v důsledku individuálních škod vzniká katastrofické riziko
  - Pro každou fázi určit všechny rizikové faktory a případně faktor, pro rozdělení letové fáze



## 7 Systémy v zasažené oblasti

Je správné říci, že moderní letadlo by jednoduše nemohlo létat bez elektronických systémů, které poskytují posádce informace k ovládní letadla. Avionické systémy se používají v nejrůznějších aplikacích od řízení letu a přístrojů až po navigaci a komunikaci. Ve skutečnosti se zdá, že by se letadlo, které používá moderní techniky „fly-by-wire“, nemohlo dokonce dostat ze země bez elektronických systémů.

Zásadní význam v každém letadle má systém, který se používá ke snímání a indikování polohy letadla a směru letu, dále k určení nadmořské výšky a rychlosti. Ve starších letadlech byli tyto přístroje jednoduchými elektromechanickými nebo mechanickými zařízeními. Při létání podle VFR (Visual Flight Rules) je důležitým zdrojem vizuální kontakt. U IFR (Instrument Flight Rules) se pilot spoléhá na údaje přístrojů. V dnešní době se díky sofistikované avionické a grafické technologii doplněné o digitální logiku a počítačové systémy, umožnilo letadlu letět výhradně prostřednictvím přístrojů.

Různé nástroje se používají k tomu, aby pilotovi poskytli informace týkající se letu, jako je aktuální směr letu, rychlost a výška letadla. Moderní letadla používají elektronické měniče, elektronické displeje a indikátory. CRT obrazovky nahrazují modernější a kompaktnější LCD displeje a stále častěji se k zobrazení těchto informací používají obrazovky, a to především z důvodu přehlednosti. Tato sestava se stala známá jako „glass cockpit“. Moderní letadla mají obecně řadu takovýchto displejů, včetně těch, které se používají pro primární letová data a multifunkční displeje, které lze konfigurovat tak, aby zobrazovaly různé informace. Avšak každé letadlo musí splnit požadavky na základní systémy a informace. Základními informacemi pro bezpečný let jsou:

- Poloha letadla
- Nadmořská výška
- Rychlost letu
- Úhel podélného a příčného sklonu
- Rychlost stoupání (nebo sestupu)

a) Indikátor polohy zobrazuje polohu letadla vzhledem k horizontu. Z tohoto může pilot zjistit, zda je horizont letadla směruje nad nebo pod horizont okolí. Toto je primární ukazatel pro přístrojový let a je také užitečný v podmínkách špatné viditelnosti. Piloti jsou vyškoleni k použití kombinací jiných přístrojů, pokud tento přístroj, či jeho napájení selže.

b) Výškoměr udává výšku letadla (ve stopách nebo metrech) nad referenční úrovní, kterou je obvykle průměrná hladina moře. Poskytuje přesný odečet a korekci, aby byl přístroj nastavitelný pro lokální barometrický tlak. Často je k dispozici i druhý záložní výškoměr.

c) Indikátor rychlosti letu zobrazuje rychlost letadla (v uzlech) vzhledem k okolnímu vzduchu. Přístroj porovnává celkový tlak v pitotově sondě se statickým

tlakem. Uvedená rychlost vzduchu musí být korigována vzhledem k hustotě vzduchu, která se mění s nadmořskou výškou, teplotou či vlhkostí a na vliv větru, aby se dosáhlo přesné rychlosti vzhledem k zemi.

d) Magnetický kompas označuje směr letadla vzhledem k magnetickému severu. Nicméně kvůli sklonu magnetického pole země může být přístroj při nesprávném otáčení, stoupání, sestupu, nebo urychlení nespolehlivý. Z tohoto důvodu se používá HSI indikátor. Pro správnou navigaci je nutné opravit směr, který je určen pro získání směru pravého severu nebo jihu.

e) Horizontální situační indikátor (HSI) zobrazuje půdorys pohledu na polohu letadla. Je to kombinace gyrokompasu a radionavigačních vstupů. Informace používané v HSI jsou odvozeny z kompasového a radionavigačního zařízení (VOR), které poskytuje přesné informace pomocí pozemních stanic. V lehkých letadlech je přijímač VOR často kombinován s VHF komunikačním rádiovým zařízením, ale ve větších letadlech je nainstalován samostatný přijímač VOR.

f) Variometr je indikátor vertikální rychlosti (stoupání a sestupu), zobrazuje rychlost stoupání, nebo sestupu ve stopách za minutu, nebo v metrech za sekundu snímáním změn tlaku vzduchu.

Moderní letadla využívají rozsáhlé elektronické přístroje a displeje. Jednou z výhod používání elektronických přístrojů je, že data mohou být snadno vyměňována mezi různými přístrojovými systémy a použita jako základ pro automatické řízení letu. (2)

## 7.1. Popis avionických systémů v zasažené oblasti

**MPU (Multifunction Processor Unit)** je jednotka, která převádí vstupní informace z jednotlivých systémů, kterými jsou informace z gyrokompasu, VOR/LOC, informace z výškoměru, polohy a dalších systémů, na signál zobrazený na PFD obrazovky. Multifunkční procesorová jednotka poskytuje zpracování a přepínání ze vstupních informací a potřebné signály pro vychylování a korekci na video signály pro multifunkční displej. MPU může poskytnout dva nezávislé obrazové signály na dvou displejích v případě selhání zobrazení jedné, nebo obou jednotek procesoru.

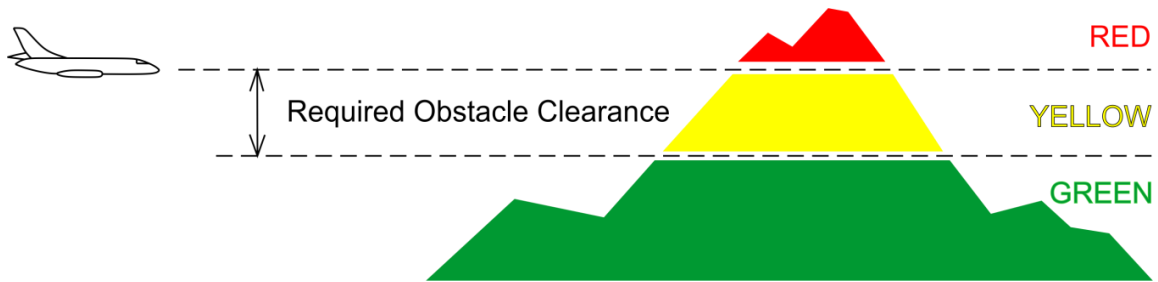
**DPU (Display Processor Unit)** Jednotka nabízí zpracování a přepínání vstupních signálů, koriguje potřebné odchylky, video signály a napájí elektronické letové displeje. DPU je schopen řídit dva elektronické letové displeje s různými video signály.

**VHF-22C (Communication Transceiver)** je radiostanice zajišťující komunikaci letounu. Vysílá a přijímá vícekanálový VHF signál v daném frekvenčním rozsahu.

**VIR-32 (Navigation Receiver)** je systém, zajišťující navigaci letounu. Navigaci provádí pomocí digitálních přijímačů polohy VOR/LOC a příčného sklonu letu.

**TAWS (Terrain Awareness and Warning system)** je systém, který předchází nehodám způsobeným kontaktem se zemí, a tím ochraňuje letoun i jeho posádku. Systém zobrazuje terén na displeji a to pomocí barevné mapy. Vstupem do systému je

pozice letounu, výška, rychlost letu, příčný a podélný sklon letu a letový plán. Dalším vstupem je databáze terénu z jednotlivých oblastních databází.



Obrázek 13: Systém TAWS

**VXP Radar (Weather Radar)** Meteorologický radar pro zobrazení meteorologických podmínek

**UNS-1K FMS (Flight Management System)** se skládá ze samostatné jednotky UNS s obrazovkou a dálkově připojené navigační počítačové jednotky (NCU). Jednotka NCU obsahuje integrovaný přijímač GPS s dynamickým plánováním letu. Tento systém je schopen podporovat a zpracovat informace z komunikace, navigace a řízení letového provozu (ATM).

**APC-65J (Autopilot Computer)** je samostatný počítač zpracovávající informace pro řízení autopilotem.

**ADC-85A (Air Data Computer)** je jednotka zpracující a převádějící analogové letové informace o výšce, tlaku a teplotě. Tyto informace dále převádí pomocí digitálních signálů do dalších systémů.

**ADF-60 Receiver (Automatic Direction Finder)** radiokompas je přijímač a odpovídač zajišťující příjem signálů z vybraných pozemních stanic, indikuje polohu k této stanici. Pozemní stanice musí být v daném kmitočtovém rozsahu. Přijímač ADF má tři funkce.

- V režimu antény (ANT) pracuje ADF jako přijímač, který poskytuje pouze výstup přijímaného signálu
- V režimu automatického směřování (ADF) funguje jako automatický přijímač směru, v němž je relativní poloha ke stanici znázorněna na přidruženém indikátoru obrazovky a je poskytován výstup přijímaného signálu
- Režim tónu (TONE) poskytuje zvukový výstupní signál 1000 Hz při příjmu signálu pro identifikaci signálů. Přijímač ADF je napájen prostřednictvím dvoufázového jističe ADF, který je umístěn na panelu jističů

**HPU-74A/HSI Processor Unit** je jednotka skládající se z několika HSI procesorových jednotek používaných v elektronickém systému k určení horizontální polohy. Pro určení využívá vstupní data z různých zdrojů, jako jsou VOR/LOC, kompasové systémy, ADF pro zobrazení horizontální navigace a dalších navigačních dat na displeji.

**Gyrokompas** je jednotka zpracující a převádějící analogové gyroskopické informace. Tyto informace dále převádí pomocí digitálních signálů do dalších systémů.

**Audio Unit** je jednotka převádějící veškeré výstražné signály na hlasové.

**Pressure Computer** je systém zpracující vstupní tlak od pitotových sond a sond statického tlaku. Tyto tlaky jsou převáděny na digitální signály, ty jsou poté zpracovávány a využívány do dalších systémů. (2) (12)

## 7.2. Určení rizika v zasažené oblasti

Při určování rizika jednotlivých systému se vychází z následků selhání těchto systémů. Primárním cílem je co nejmenší vliv na pokračující bezpečný let a přistání. Samotné riziko při selhání jedné vrtule je uvedeno v AC 35-1 (9) a je bráno jako samostatný kritický stav pro letoun. Další kombinace rizik při selhání jednotlivých systémů a jeho částí jsou kombinací rizikového faktoru letem s jedním motorem a rizika selhaného systému.

Jednotlivá rizika pro systémy jsou stanovena dle poradního oběžníku AC 1309-1 (7), nebo po konzultaci. Samotná pravděpodobnost zasažení se vypočítá jako součin předepsané pravděpodobnosti uvolnění listu vrtule a pravděpodobnosti zásahu samotného systému pomocí geometrického výpočtu, pro uvažovaná rizika „Major“ a vyšší je tato hodnota  $10^{-5}$  uvedená v AC 35-1 (9).

Pro letoun kategorie IV. (Zkušební letoun) je jako mezní hranice pravděpodobnosti pro hazardní stav uvažováno  $10^{-7}$ . Z tabulky 5 lze dojít k závěru, že všechny systémy pro daný letoun a uvažovanou zasaženou oblast splňují tento předpis.

SYSTEM	COMPONENT		DAMAGE TO	FAILURE CONDITION	PROBABILITY
Nose Landing Gear	NLG STRUCTURE		SURFACE	Major	2,13E-10
	TIRE/BRAKE		SURFACE/TRACK	Major	2,04E-10
	HYDRAULICS	Yellow	TUBE	Minor	1,76E-10
		Blue	TUBE	Minor	1,76E-10
		Red	TUBE	Major	1,76E-10
	LIGHT		SURFACE/CABLES	NSE	1,02E-10
	FLUID RESERVOIR		SURFACE/TUBE	Major	1,67E-10
Structure	FUSELAGE		SURFACE	Minor	3,43E-10
Avionics	DPU		SURFACE/CABLES	Hazard	1,81E-10
	MPU		SURFACE/CABLES	Hazard	1,81E-10
	VHF-22C	Upper	SURFACE/CABLES	Minor	2,41E-10
		Bottom	SURFACE/CABLES	Minor	2,41E-10
	VIR-32	Upper	SURFACE/CABLES	Minor	2,37E-10
		Bottom	SURFACE/CABLES	Minor	2,37E-10
	TAWS		SURFACE/CABLES	Minor	2,27E-10
	UNS-1K FMS		SURFACE/CABLES	Major	2,27E-10
	APC-65J		SURFACE/CABLES	Major	1,67E-10
	ADC-85A		SURFACE/CABLES	Minor	1,72E-10
	ADF-60		SURFACE/CABLES	Minor	2,32E-10
	HPU-74A		SURFACE/CABLES	Major	1,72E-10
	GYROSCOPE		SURFACE/CABLES	Major	2,27E-10
	AUDIO UNIT		SURFACE/CABLES	Minor	1,67E-10
	PRESSURE COMPUTER		SURFACE/CABLES	Major	1,67E-10
	PITOT PILOT		TUBE	Minor	1,21E-10
PITOT COPILOT		TUBE	Minor	1,21E-10	
Environment	CONDENSATOR		SURFACE	Minor	2,41E-10
	MIXING PLENUM		SURFACE	Minor	2,55E-10
	COOLING TUBE		TUBE	Minor	2,04E-10
No specification	VACUM PRESS. REG.		SURFACE/TUBE	Minor	1,58E-10
	OPPOSITE ENG. DAMAGE		SURFACE	Hazard	2,41E-10
	CONDENSER BOX		SURFACE	Major	2,37E-10
	FUZE BOX		SURFACE	Major	2,55E-10
	CABLE BINDING	Upper	CABLES	Major	1,90E-10
		Bottom	CABLES	Major	2,09E-10
	LOGIC CONV. BOX		SURFACE	Minor	1,72E-10
	WXP RADAR		CABLES	Minor	2,13E-10

Tabulka 5: Tabulka pravděpodobnosti zasažení pro jednotlivé systémy

## 8 Kritická selhání

### 8.1. Zhodnocení kritických systémů a selhání v zasažené oblasti

Mezi kritická selhání můžeme zařadit rizika definovaná jako „Hazard“. Tato rizika snižují schopnost letounu nebo posádky samostatně se vypořádat s tímto selháním a ovlivní bezpečné pokračování letu. Samotné selhání vrtule je definované jako hazardní stav, vyžaduje potřebné znalosti a trénink posádky na tento stav. Nejvhodnějším způsobem při selhání vrtule je nezasažení letounu uvolněnými částmi nebo listem vrtule.

Pravděpodobnost tohoto stavu je rovna  $10^{-7}$  a tento stav dále neovlivní funkci systémů. Důsledek tohoto selhání je asymetrický tah letounu z důvodu indispozice jedné pohonné jednotky. Všichni piloti, kteří splňují certifikaci na dvoumotorové letouny kategorie FAR23, jsou na tento stav cvičeni.

### 8.2. Kritické selhání

V případě zasažení letounu jsou za nejhorší poruchy uvažované následující možnosti vzhledem k jejich poloze a funkci. Tyto poruchy mají vliv na bezpečné pokračování letu a přistání. (12)

- **Zasažení DPU jednotky.** Následkem tohoto selhání je přerušení přenosu informací na zobrazovací LCD display. Posádka tudíž nedostává potřebné informace o letu, výšce, rychlosti a dalších potřebných údajích. Základní informace může posádka zjistit ze záložních mechanických nebo mechanicko-elektrických ukazatelů po stranách přístrojového panelu

- **Zasažení MPU jednotky.** Má za následek přerušení přenosu informací ze systémů do zobrazovací jednotky, a tedy i identické následky

- **Zasažení druhého motoru.** Následkem zasažení druhého motoru dojde k úplné ztrátě tahu letounu. Toto selhání může mít kritické následky při vzletu a počáteční fázi stoupání. Při praktickém uvažování zjistíme, že k tomuto selhání nedojde vzhledem k chování kompozitového listu vrtule, který při uvolnění zasáhne letoun v kladném podélném úhlu, nikoli v záporném nebo nulovém úhlu (kapitola 5.2). Toto selhání může být nicméně způsobené v kombinaci se zasažením jiného systému, jehož následně uvolněné části mohou poškodit pohonnou jednotku na opačné straně letounu.

### 8.3. Další možné varianty a kombinace zasažení

Další možné varianty a kombinace poruchy při uvolnění listu vrtule. Tyto poruchy nemají vliv na bezpečné pokračování letu a přistání. Při těchto poruchách je nutno postupovat dle relevantních postupů v příručkách. (12)

- **Zasažení a narušení funkce předního podvozku.** Při zásahu některé z částí předního podvozku lze při nejhorší variantě uvažovat s nevysunutím této části podvozku. Selhání předního podvozku má za následek zvýšení zatížení a úkonů na posádku. Při dodržení pilotních postupů lze předpokládat, že toto selhání není kritické

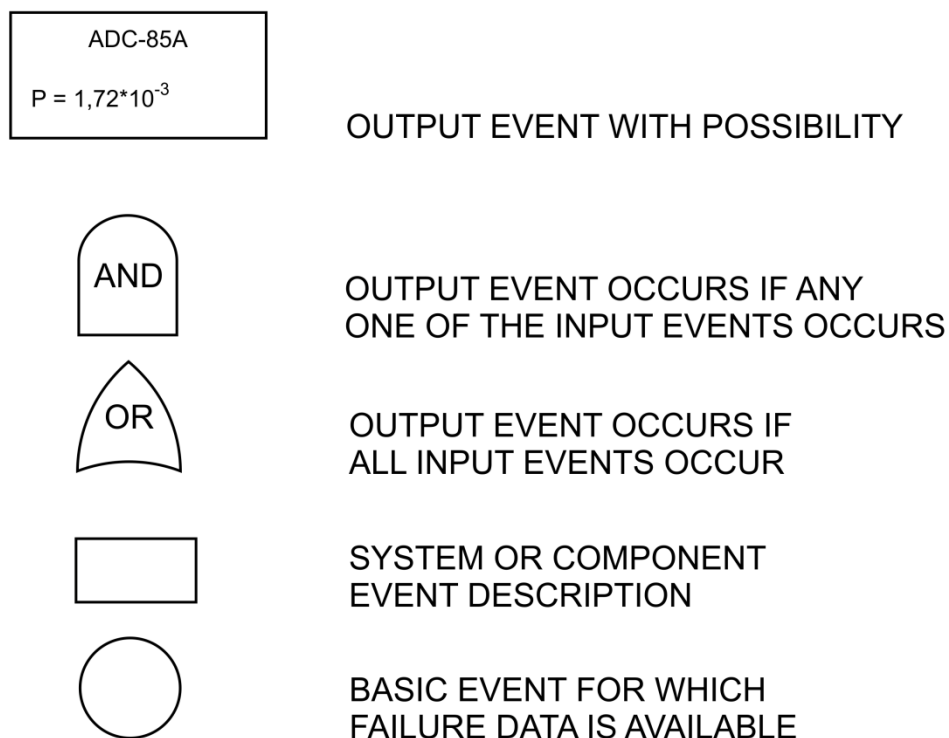
- **Zasažení částí environmentálního systému.** Zasažení těchto částí nemá za následek velké zvýšení zátěže na posádku, ale snížení komfortu posádky a cestujících

z důvodu selhání klimatizačního a vytápěcího systému letounu. Přetlakování kabiny je zajištěno pomocí ventilů na vedení tlakového vzduchu od motorů ve středové části kabiny. Přetlakování kabiny není ohroženo při uvolnění listu vrtule

- **Zasažení počítače autopilota APC.** Sníží komfort posádky, ale nemá vliv na bezpečné pokračování letu a přistání
- **Zasažení komunikačních jednotek.** Zásah těchto jednotek má za následek zvýšení zátěže posádky z důvodu ztráty komunikace. Avšak nemá vliv na bezpečnost letu a neovlivňuje bezpečné přistání
- **Zasažení UNS-1K FMS a TAWS systémů.** Má za následek snížení zobrazovaných údajů na přístrojovém panelu. Při správné funkci dalších systémů není selhání těchto systémů nebezpečné

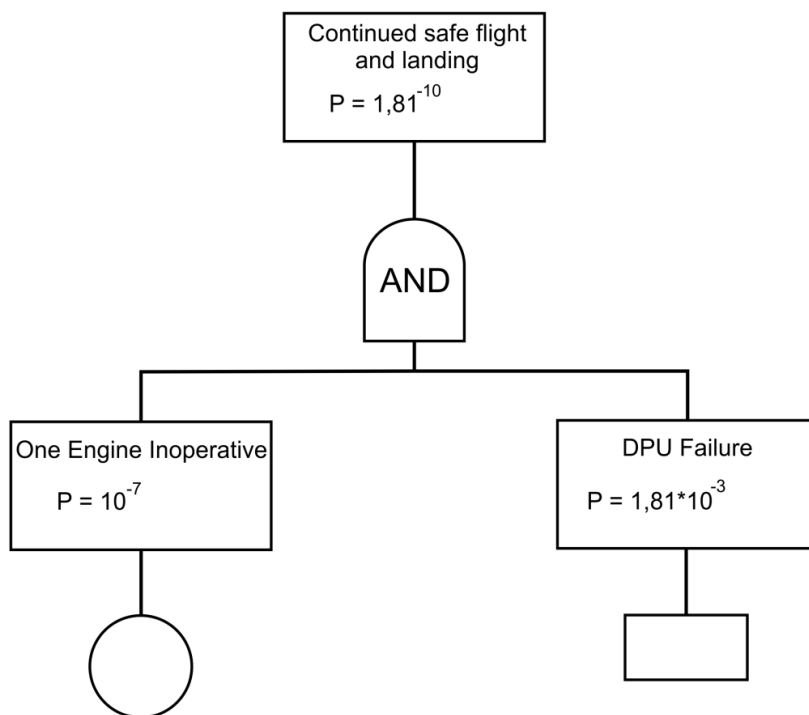
### 8.4. Bezpečnostní analýzy

Z výše uvedeného postupu lze určit kritické varianty selhání. Pro jednotky DPU a MPU použijeme analýzu FTA. Tuto metodu volíme z důvodu zjištění závislosti na dalších systémech, které by mohly ovlivnit bezpečné pokračování letu a přistání. (12)

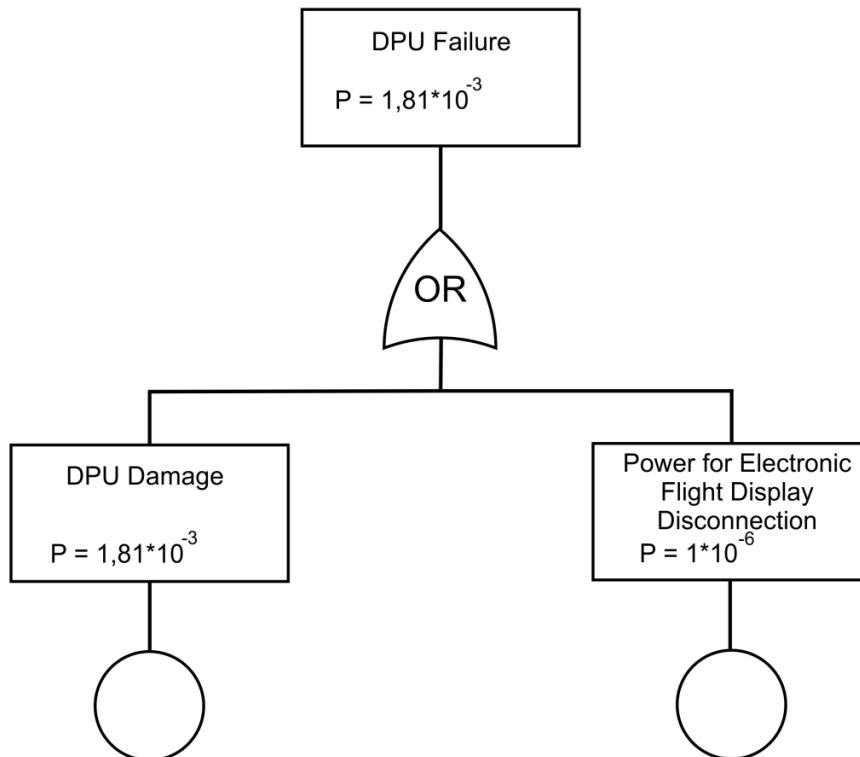


Obrázek 14: Popis bloků bezpečnostní metody FTA

8.4.1. Metoda FTA pro jednotku DPU



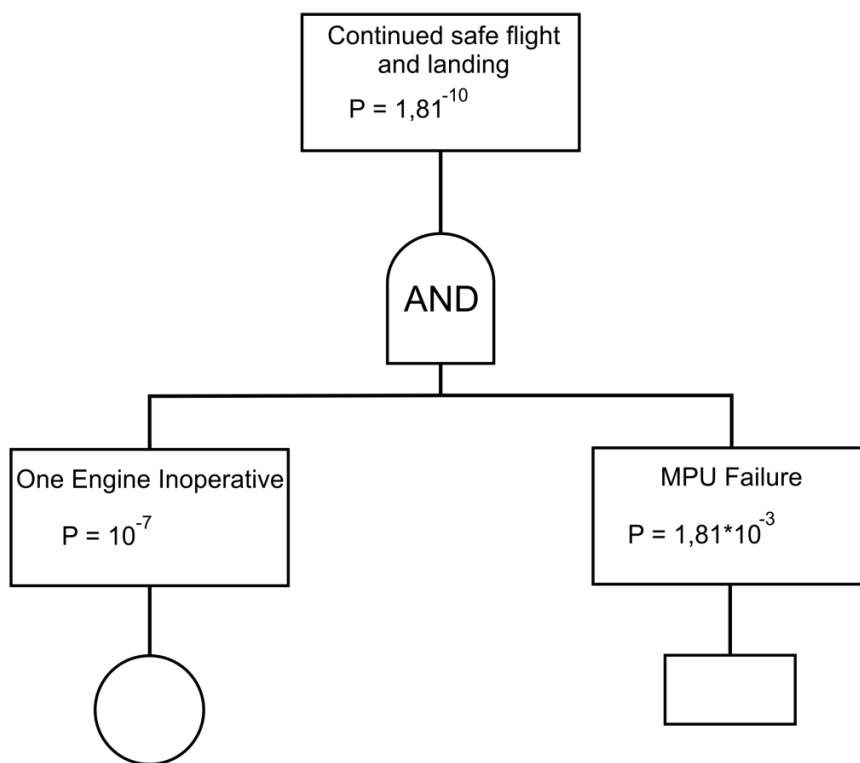
Obrázek 15: FTA Analýza DPU



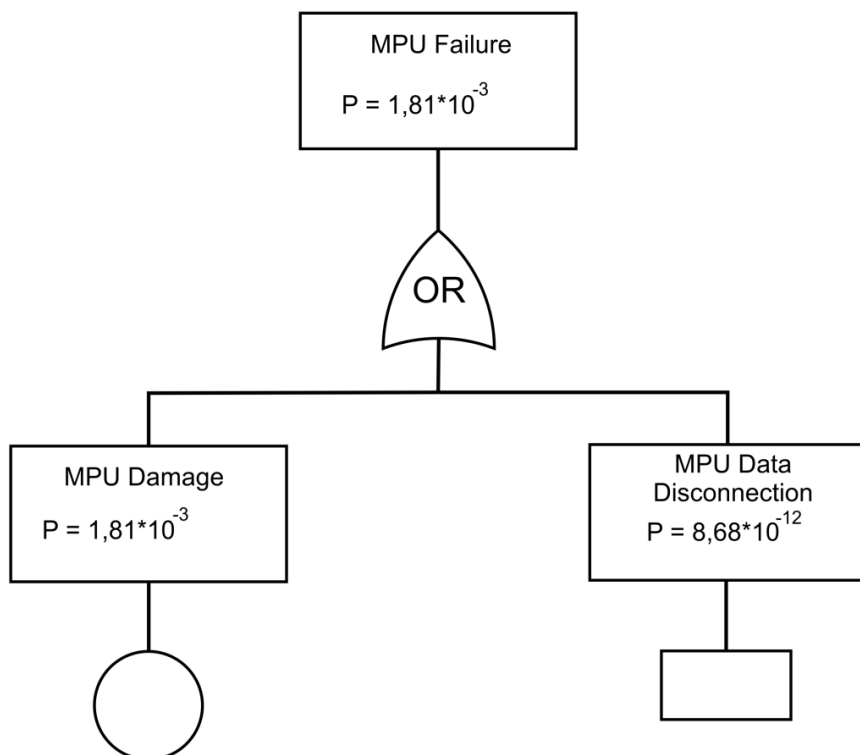
Obrázek 16: FTA Analýza DPU selhání



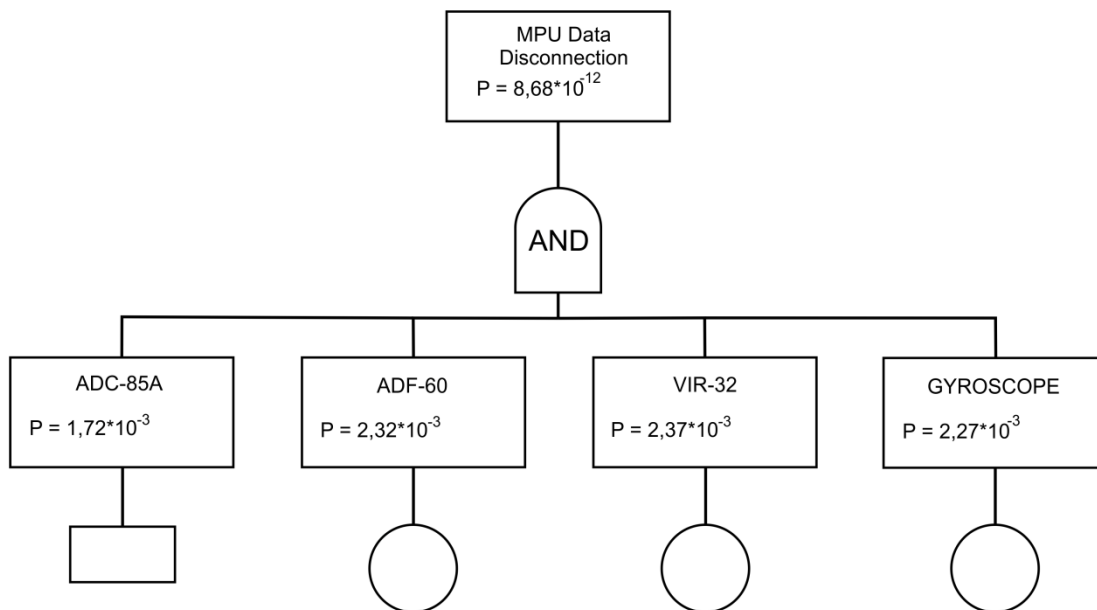
8.4.2. Metoda FTA pro jednotku MPU



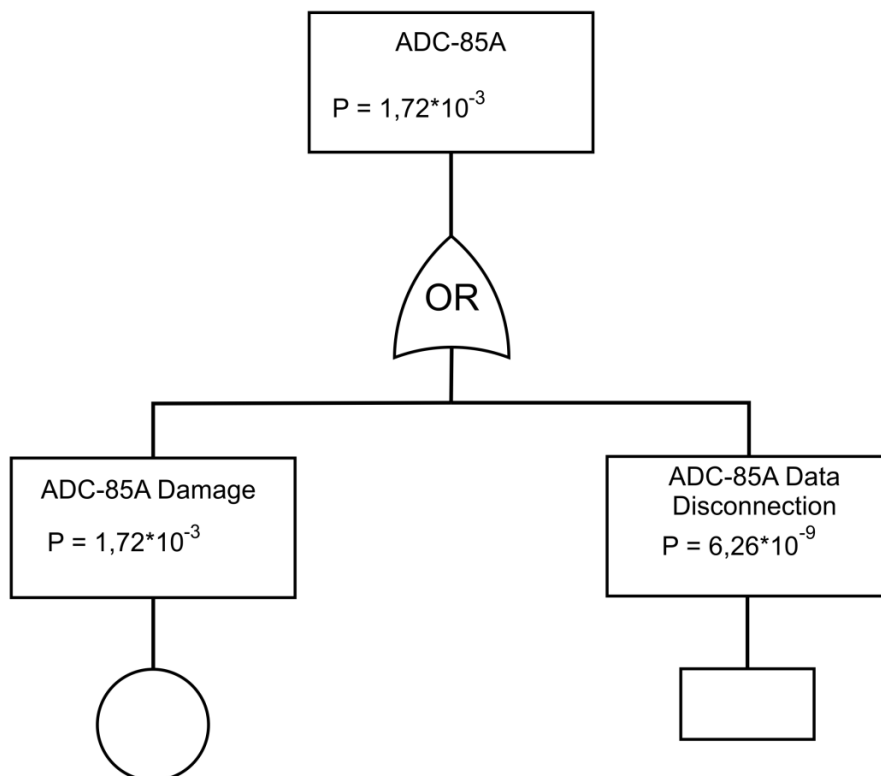
Obrázek 17: FTA Analýza MPU



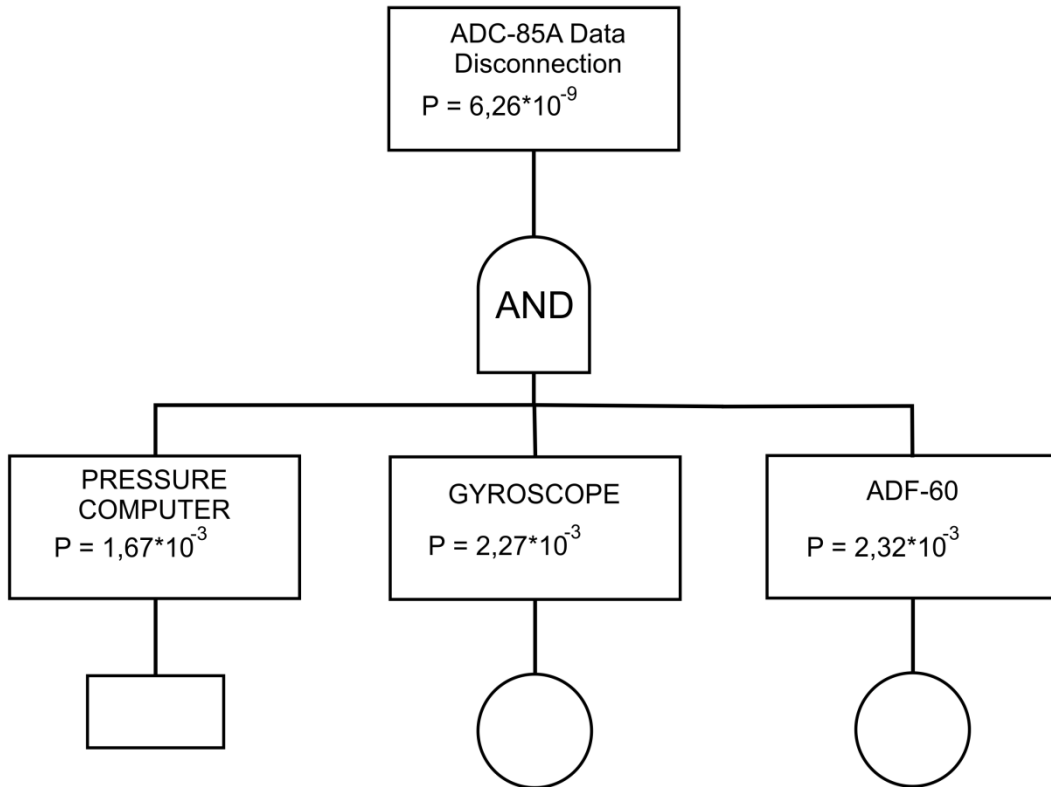
Obrázek 18: FTA Analýza MPU selhání



Obrázek 19: FTA Analýza MPU přerušení signálu



Obrázek 20: FTA Analýza ADC



Obrázek 21: FTA Analýza ADC přerušení signálu

## 9 Opatření pro minimalizaci nebezpečí

### 9.1. Navrhovaná opatření

Pro danou konfiguraci instalace systémů a avioniky pro létající zkušebnu (FTB) nejsou z analýzy zjištěny nedostatky, z tohoto důvodu není potřebné letoun doplnit o speciální úpravy. Všechny systémy splňují požadovanou pravděpodobnost  $10^{-7}$  pro zkušební letouny uvedené v předpisech FAR23. Při dostatečném výcviku a přípravě posádky, která by měla být pro zkušební letouny na tyto situace připravena a dostatečně srozuměna s postupy při selhání, je letoun schopen bezpečného pokračování letu a přistání.

### 9.2. Postup při selhání

Selhání jakékoliv kritické části je velmi nebezpečné. Každý pilot by však měl být na tyto situace trénovaný a měl by umět postupovat dle pilotních příruček a vlastního úsudku. Proto jsou zřejmá i doporučení, jak se při těchto situacích postupovat. Doporučeným postupem při selhání jednoho motoru je:

- Okamžitě snížit výkon poškozené pohonné jednotky
- Při úplném selhání obou pohonných jednotek v dostatečné letové hladině co nejdříve převést letoun do klouzavého letu anebo zvýšit rychlost snížením výšky, pokud není letoun v dostatečné letové hladině pro dosažení přistání na letištní ploše, začít bezprostředně hledat vhodné místo k nouzovému přistání v terénu
- Pokud není selhání úplné (kritické), je potřeba provést kontrolu všech důležitých systémů a případně postupovat dle pilotních příruček pro daný problém. Stále je však stav závažný z důvodu indispozice jedné pohonné jednotky. Postupuje se dle pilotní příručky na pokračování a dokončení letu s jednou pohonnou jednotkou (10)

## 10 Závěr

V práci byl proveden rozbor struktury předpisů dle dohlédacích úřadů FAA a EASA. Dále byly porovnány předpisy bezpečnosti pro konkrétní případ uvolnění listu vrtule dle FAR23 a CS-23. Ze srovnání vyplývá snaha o harmonizaci předpisů. Zjištěné rozdíly nemají vliv na bezpečné pokračování letu a přistání, odlišnosti jsou v postupech při provádění analýzy.

Dále byla provedena analýza bezpečnosti trupu letounu při zasažení listem vrtule pro konkrétní letoun kategorie FAR23 King Air 350. Jako podklady byly použity dostupné předpisy FAA. Všechny kroky a postupy analýzy byly detailně popsány a vyhodnoceny. Byly uvedeny poruchy, které nejvíce ovlivňují bezpečné dokončení letu a přistání. Při správné funkci záložních systémů zvýší porucha zatížení posádky, avšak bezprostředně neohrozí bezpečnost letu.

Byla vypočítána pravděpodobnost všech zasažených systémů. Z výpočtů lze dojít k závěru, že všechna nebezpečí jsou v limitu s dostatečnou rezervou v rámci předpisů pro zkušební letouny. Výsledky této analýzy tedy prokázaly, že daný letoun s novou zástavbou motoru a konkrétní konfigurací instalace systémů splňuje požadavky a předpisy pro kategorii letounu FAR23 i vyšší kategorii FAR25. Letoun je schopen bezpečného pokračování letu a přistání a není potřeba dalších speciálních úprav.

**Zdroje**

- (1) DE FLORIO, Filippo. *Airworthiness: an introduction to aircraft certification : a guide to understanding JAA, EASA, and FAA standards*. 1st. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 0750669489;9780750669481.
- (2) WYATT, David a TOOLEY, Mike. *Aircraft Electrical and Electronic Systems*. Routledge, 2009, 424 s. ISBN 9781136444340.
- (3) *Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes: CS-23*. In: . European Aviation Safety Agency, 2009 [cit. 2018-05-08]., Amendment 5. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-23-20Amdt-5-20Combined.pdf>
- (4) *Certification Specifications for Propellers: CS-P*. In: . European Aviation Safety Agency, 2006, Amendment 1. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-P-20Amdt-20-201.pdf>
- (5) *FAR23 — AIRWORTHINESS STANDARDS: NORMAL, UTILITY, ACROBATIC, AND COMMUTER CATEGORY AIRPLANES*. Federal Aviation Administration, 2011 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2011-title14-vol1/pdf/CFR-2011-title14-vol1-part23.pdf>
- (6) *MINIMIZING THE HAZARDS FROM PROPELLER BLADE AND HUB FAILURES*. In: . Advisory Circular FAA, 9/27/00, AC\_25.905-1.
- (7) *SYSTEM SAFETY ANALYSIS AND ASSESSMENT FOR PART 23 AIRPLANES*. In: . Advisory Circular FAA, 11/17/2011, AC\_23.1309-1E.
- (8) *DESIGN CONSIDERATIONS FOR MINIMIZING HAZARDS CAUSED BY UNCONTAINED TURBINE ENGINE AND AUXILIARY POWER UNIT ROTOR FAILURE: AC 20-128A* [online]. Federal Aviation Administration, 3/25/97, AC\_20.128A
- (9) *CERTIFICATION OF PROPELLERS: AC 35-1*. Federal Aviation Administration, 12/29/08 Dostupné z: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_35-1.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_35-1.pdf)
- (10) LANDSBERG, Bruce. *Safe Pilots. Safe Skies* [online]. 421 Aviation Way, Frederick, Maryland 21701: AOPA Air Safety Foundation, 2005, SA06-12/05, , 12 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/-/media/files/aopa/home/pilot-resources/asi/safety-advisors/sa06.pdf?la=en>
- (11) *NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD: PART 121 Air Carriers* [online]. USA [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.ntsb.gov/investigations/data/Pages/AviationDataStats.aspx>
- (12) Interní informace a konzultace GEAC
- (13) KingAir350. In: Beechcraft Textron Aviation [online]. 2018 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://beechcraft.txtav.com/en/king-air-350#exterior>