



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy

**Spolehlivost a údržba pneumatického systému skupiny ATA36 u  
provozovatelů B737NG**

Bakalářská práce

**Karel Mündel**

**2020**



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

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Karel Mündel**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – TUL – Technologie údržby letadel**

Název tématu (česky): **Spolehlivost a údržba pneumatického systému  
ATA36 u provozovatelů B737NG**

Název tématu (anglicky): **ATA36 Pneumatic System Reliability and Maintenance for  
B737NG Operators**

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cíl práce: analýza spolehlivosti a údržby systému ATA36 u provozovatelů letounu B737NG s následným doporučením pro zvýšení spolehlivosti v provozu
- Analýza metodik hodnocení spolehlivosti letadlových komponent a celků
- Analýza pneumatického systému ATA36 a jeho údržby na letounu B737NG
- Vytvoření konceptuálního schématu systému ATA36 letounu B737NG
- Analýza a propojení dat o spolehlivosti a údržbě z provozu s vytvořeným konceptuálním schématem
- Návrh doporučení pro provozovatele B737NG z pohledu údržby pneumatického systému ATA36



- 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: A. Birolini. Reliability Engineering. Theory and Practice. Springer. 2017  
Arlow, J. a Neustadt, I. UML 2 a unifikovaný proces vývoje aplikací: objektově orientovaná analýza a návrh prakticky. 2., Computer Press, 2007.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Andrej Lališ, Ph.D.**  
**Ing. Oldřich Štumbauer**

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

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

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Karel Mündel  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. října 2019

## **Prohlášení**

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

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

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního materiálu 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 8. Srpna 2020

.....

Podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Andrejovi Lališovi, Ph.D. a panu Ing. Oldřichovi Štumbauerovi za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytovali po celou dobu mého studia. Dále bych pak chtěl poděkovat společnosti Smartwings za umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím a materiálům. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## **Abstrakt**

Předmětem bakalářské práce „Spolehlivost a údržba pneumatického systému skupiny ATA36 u provozovatelů B737NG“ je analýza pneumatického systému na letadle Boeing 737 NG. Cílem bylo pomocí metody FTA identifikovat nejméně spolehlivé komponenty a na základě zjištěného statistického rozdělení jejich zaznamenaných poruch vyhledat inovativní řešení v údržbě tohoto systému, které má za výsledek redukci nákladů provozovatele v oblasti údržby daného typu letadla.

## **Klíčová slova**

Pneumatický systém, ATA 36, Porucha, Spolehlivost, Údržba letadel, B737NG, UML, FTA

**Abstract**

The subject of the bachelor's thesis "Reliability and maintenance of the ATA36 group pneumatic system for B737NG operators" is analysis of a pneumatic system on an aircraft Boeing 737 NG. The aim was, using the FTA method, to identify the least reliable components and based on the exponential distribution of their recorded failures to find innovative solutions for the maintenance of this system, which results in a reduction of the operator's maintenance costs for a given type of aircraft.

**Key words**

Pneumatic system, ATA 36, Fault, Reliability, Aircraft maintenance, B737NG, UML, FTA

# OBSAH

Úvod .....	1
1 Současný stav .....	2
1.1 Údržba letadel .....	2
1.1.1 Základní pojmy .....	2
1.1.2 Programy údržby letadel.....	2
1.1.3 Předpisy údržby.....	4
1.1.4 Současný přístup k údržbě letadel.....	4
1.2 Společnost Smartwings .....	5
1.2.1 Údržba letadel u společnosti Smartwings .....	5
1.3 Identifikace problémového systému .....	6
1.4 Historie letounu Boeing 737 .....	8
2 Technický popis.....	9
2.1 Historie pneumatického systému na typu B737 .....	9
2.2 Popis pneumatického systému letadla B737NG .....	9
2.3 Vzduch odebíraný od motoru .....	11
2.4 Údržba pneumatického systému .....	14
2.5 Provozní omezení.....	14
3 Metodika práce.....	16
3.1 UML.....	16
3.1.1 Základní pojmy jazyka .....	16
3.1.2 Struktura jazyka UML .....	17
3.1.3 Statický diagram (Diagram komponent) .....	17
3.1.4 Dynamický diagram (Funkční diagram).....	18
3.2 Metody pro analýzu spolehlivosti .....	18
3.2.1 FTA .....	18
3.2.2 FMEA .....	20



4	Spolehlivostní analýza .....	22
4.1	Popis pneumatického systému na B737NG pomocí UML.....	22
4.1.1	Statický diagram pneumatického systému .....	22
4.1.2	Dynamický diagram pneumatického systému .....	24
4.2	FTA analýza pneumatického systému na B737NG .....	27
4.2.1	Intenzita poruch komponent pneumatického systému .....	28
4.2.2	Strom poruchových stavů pneumatického systému .....	29
4.2.3	Identifikace kritických komponent systému .....	31
5	Návrh inovativního řešení v údržbě pneumatického systému .....	35
5.1	Vyhodnocení snížené spolehlivosti komponent pneumatického systému .....	35
5.1.1	Sledování technických dat .....	36
5.1.2	Údržba zaměřena na komponenty PRSOV, PCV a HSV .....	37
5.1.3	Doporučená doba zvýšené údržby .....	38
5.2	Ekonomické zhodnocení snížené spolehlivosti pneumatického systému .....	40
5.2.1	Odhad provozních nákladů AOG pro B737NG .....	41
5.2.2	Průměrná doba provozní neschopnosti B737NG .....	41
5.2.3	Porovnání dosažených výsledků .....	41
5.3	Vyhodnocení celkového řešení .....	42
6	Závěr .....	44
	Seznam použité literatury .....	45

# Seznam obrázků

Obrázek 1 - Potrubní síť a zdroje pneumatického systému B737NG .....	10
Obrázek 2 - Uživatelské systémy a jejich umístění v potrubní síti ATA 36.....	11
Obrázek 3 - Graf zachycující vztah mezi otáčkami motoru a tlakem v potrubním systému..	12
Obrázek 4 - Systém odebírající vzduch od motoru .....	13
Obrázek 5 – stručný popis relací jazyka UML .....	17
Obrázek 6 – Příklad statického (objektového) diagramu .....	17
Obrázek 7 – Příklad dynamického diagramu .....	18
Obrázek 8 - Vstupní prvky spojeny logickým prvkem OR .....	19
Obrázek 9 - Vstupní prvky spojeny logickým prvkem AND .....	20
Obrázek 10 – Obecný statický diagram pneumatického systému B737 NG .....	23
Obrázek 11 – Detailní statický diagram pneumatického systému B737NG .....	24
Obrázek 12 - Odběr stlačeného vzduchu od pohonné jednotky .....	25
Obrázek 13 - Odběr vzduchu od APU a PGC .....	26
Obrázek 14 – Ovládání a zobrazení stavu systému .....	26
Obrázek 15 - Poruchové stavy elektrické sítě.....	30
Obrázek 16 - Poruchové stavy mechanických komponent .....	30
Obrázek 17 - Strom poruchových stavů .....	31
Obrázek 18 - Graf distribuční funkce komponenty HSV .....	38
Obrázek 19 – Distribuční funkce komponenty PRSOV v logaritmickém měřítku.....	39
Obrázek 20 – Distribuční funkce komponenty PCV v logaritmickém měřítku.....	39
Obrázek 21 – Distribuční funkce komponenty HSV v logaritmickém měřítku.....	40

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Počet závad na jednotlivých systémech .....	7
Tabulka 2 - Intenzita poruch komponent skupiny ATA 36 za použití letových hodin .....	27
Tabulka 3 – Roční závady ze skupiny ATA 36 (Pneumatický systém) .....	28
Tabulka 4 – Intenzita poruch komponent skupiny ATA 36 za použití naléтанých cyklů .....	28
Tabulka 5 - Intenzita poruch komponent skupiny ATA 36 za použití letových hodin .....	28
Tabulka 6 - Výpočet kritických komponent za použití naléтанých cyklů .....	32
Tabulka 7 - Výpočet kritických komponent za použití letových hodin .....	33
Tabulka 8 - Střední doba poruch komponent pneumatického systému .....	34
Tabulka 9 - MTTF udávané výrobcem Honeywell.....	35
Tabulka 10 – Odhadované náklady za zvýšenou údržbu pneumatického systému.....	42
Tabulka 11 – Odhadované náklady optimalizované údržby pneumatického systému .....	42

## Seznam použitých zkratek

ACAU	Air Conditioning Accessory Unit	Klimatizační jednotka
AOG	Aircraft On Ground	Provozně neschopné letadlo
APU	Auxiliary Power Unit	Pomocná motorová jednotka
BAR	Bleed Air Regulator	Regulátor stlačeného vzduchu
BCAR	British Civil Airworthines Requirements	Britské letecké předpisy
CAA	Civil Aviation Authority	Britský letecký vládní úřad
CTAI	Cowl Thermal Anti Ice	Tepelné vyhřívání krytu motoru
EFIS	Electronic Flight Information System	Elektronický informační systém
FAA	Federal Aviation Administration	Americký letecký vládní úřad
FAR	Federal Aviation Regulation	Americké letecké předpisy
FH	Flight Hours	Letové hodiny
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis	Analýza vad a jejich následků
FTA	Fault Tree Analysis	Analýza stromu poruchových stavů
FL	Flight Level	Letová hladina
HSR	High Stage Regulator	Regulátor vysokotlakého ventilu
HSV	High stage valve	Vysokotlaký ventil
JAA	Joint Aviation Authorities	Evropský letecký úřad
JAR	Joint Aviation Requirements	Sjednocené letecké předpisy
MCC	Maintenance Control Center	Technický dispečink
MMEL	Master Minimum Equipment List	Seznam minimálního vybavení
MOE	Maintenance Organisation Exposition	Výklad organizace údržby
MTTF	Mean Time To Failure	Střední doba do poruchy
PCV	Precooler Control Valve	Ventil výměníku precooler

PGC	Pneumatic Ground Connect	Pozemní zdroj stlačeného vzduchu
PRSOV	Pressure Regulate and Shut Off Valve	Tlakový regulátor a uzavírací ventil
P/N	Part Number	Číslo komponenty
RPN	Risk Priority Number	Prioritizace rizika
UML	Unified Modeling Language	Unifikovaný modelovací jazyk
WTAI	Wing Thermal Anti Ice	Tepelné vyhřívání křídla
390PCVS	390 Precooler Control Valve Sensor	Senzor 390 F výměníku precooler
450T	450 Thermostat	Termostat 450 F
490OS	490 Overtemperature switch	Teplotní čidlo 490 F

# Úvod

Letecká doprava je stále se rozvíjející druh dopravy, který se díky velkému zájmu veřejnosti po celém světě stále rozšiřuje. Díky tomuto faktu se tak na trhu letecké dopravy snaží zaujmout své místo stále více a více leteckých společností, často s vidinou velkého zisku.

Dnešním velice diskutovaným tématem je provoz nízkonákladových společností, které svým působením na trhu velice ovlivňují celé dopravní letectví. Tyto společnosti jsou typické svou snahou o minimalizaci nákladů ve snaze nabídnout tak cestujícím levně své služby. Svě náklady se snaží optimalizovat ve všech činnostech, které s provozem souvisí. Jednou z nich je i údržba jejich flotily. Nutno dodat, že takto nastavená politika společnosti pak může v případě nesprávně řízených rizik mít dopad i na bezpečnost provozu, což není v dnešní letecké dopravě žádoucí.

Z hlediska redukce nákladů v údržbě se provozovatelé zaměřují jen na vzniklé problémy a závady. Tyto závady však vychází z celkové spolehlivosti provozovaného typu letadla, jeho systémů a komponent. Spolehlivostní analýzou se v dnešní době zabývá především výrobce. Ten pak na základě svých, ale i provozních dat od leteckých společností inovuje své manuály pro personál údržby nebo konkrétní jednotlivé letadlové celky. Z dnešních moderních dopravních letadel lze při jejich údržbě získat velké množství technických dat, podle kterých může pak provozovatel identifikovat a následně inovovat svůj přístup k řešení problémů, které se na jeho flotile vyskytují. Pokud se tedy sám provozovatel stane v údržbě takto aktivním, může pomocí těchto dat předcházet závadám, které se v provozu vyskytují.

Zaměření této bakalářské práce je přímo na provozovatele, tedy aerolinky. Cílem je na základě sledování dostupných technických dat a jejich následné analýze identifikovat systém, který v provozu vykazuje známky nízké spolehlivosti. Na tomto systému vyhledat komponenty, které jsou z hlediska poruchovosti konkrétního systému v provozu nejvíce kritické a následně vytvořit návrh inovativního řešení v přístupu k údržbě tohoto systému, které má za účel zvýšení provozní spolehlivosti a v důsledku také efektivnosti provozu.

Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s českým leteckým dopravcem Smartwings, jenž se svou politikou také řadí na seznam nízkonákladových společností.

# 1 Současný stav

V této kapitole se zabývám obecným popisem základních programů údržby letadel a s tím související legislativou. Následující část popisuje současný stav údržby letadel u společnosti Smartwings. Konkrétně přístup údržby k pneumatickému systému, skupina ATA 36, na letadle B737NG.

## 1.1 Údržba letadel

Svět letecké dopravy je spojen s podstatně většími riziky než ostatní druhy dopravy. Tato rizika nejsou myšlena jen pro letadlo, ale i pro jeho posádku, přepravované cestující, náklad, a pro tzv. třetí strany jako jsou například škody na zemi v důsledku havárie letadla. Z tohoto důvodu je tak v oblasti letecké dopravy velký tlak na eliminaci pravděpodobnosti naplnění těchto rizik na co nejnižší úroveň. A to u všech oblastí majících přímou i nepřímou vazbu na provoz letadla. Jednou z nejdůležitějších odvětví letecké dopravy je správně nastavená údržba letadel, která má za následek snížení rizik v oblasti technického stavu flotily. Cílem je pak zvýšení bezpečné letecké dopravy.

### 1.1.1 Základní pojmy

*Údržba letadel je vysoce regulovanou činností, kde každý zásah musí být plně dokumentován, prověřen a musí být vykonán certifikovaným mechanikem používajícím schválené nářadí, postupy i náhradní díly [1].*

Dnešní dopravní letadla jsou konstruována tak aby vyhovovala všem mezinárodním standardům i příslušným národním předpisům ohledně spolehlivosti i bezpečnosti po celou dobu provozu letounu. Tyto body už však výrobce nemůže zcela sám zaručit, a proto zde platí pravidlo sdílené odpovědnosti mezi výrobcem, majitelem a provozovatelem letadla.

Základní dokument, který osvědčuje letadlo schopné provozu je certifikát o letové způsobilosti. Tento certifikát je příslušným státním úřadem vydán a prodlužován ve chvíli, kdy provozovatel předloží mimo jiné i doklady o zajištění předepsané údržby letadla.

### 1.1.2 Programy údržby letadel

Celkový program údržby se výrazně liší podle složitosti letadel a podmínek pro které byly navrženy a v jakých jsou letadla provozována. Pro správně zvolený program je rozhodující očekávané denní nebo roční využití letadla, vyjádřené poměrem letových hodin a cyklů tzv. *hour/cycle ratio*. Společným prvkem většiny programů údržby dopravních letadel jsou pak

*následující úrovně prováděné údržby, které můžeme dělit na tzv. Lehkou údržbu, která se dále dělí na traťovou údržbu a A-check, B-check. Druhá úroveň je pak tzv. Těžká údržba, která se dále dělí na C-check a D-check [2].*

**Traťová údržba (Line maintenance)** – tento proces lehké údržby zahrnuje především denní a týdenní prohlídky, které zahrnují nejzákladnější údržbu letadla jako je například doplňování olejů a maziv do pohonných jednotek, nebo výměna jednoduchých komponent. Tato údržba zpravidla vyžaduje minimum speciálního vybavení a lze ji provádět i na venkovní stojance. Traťovou údržbu navíc zvládne i dvoučlenný tým kvalifikovaných mechaniků, kterým práce zabere desítky minut maximálně však několik hodin.

**A-check, B-check** – program pro lehkou údržbu se provádí po dosažení stanoveného počtu letových hodin nebo cyklů. Tato údržba již zahrnuje podrobnější prohlídky a inspekce letadlových celků, vyžadující již vyšší počet kvalifikovaných techniků a práci v hangáru. Lehká údržba pak trvá několik hodin někdy jednotky dnů. Vzhledem k tomu, že některé letadlové celky mají různé termíny prohlídek, které korespondují s různými násobky mezi *A-checky*, rozlišujeme zpravidla více stupňů této údržby označovaných např. 1A/2A/3A. Toto označení v dnešní době nahrazuje i dřívější *B-check*.

**C-check** – Tento program údržby může mít dvě až tři úrovně. Tato údržba je na letadle prováděna každých 18 – 24 měsíců a sdružuje více servisních úkonů, u kterých byl nebo v nejbližší době bude vyčerpán maximální povolený interval nalétaných hodin, nebo cyklů mezi výměnami nebo kontrolou těchto letadlových celků. Podobně jako u *A-checku* rozlišujeme úrovně 1C/2C/3C atd. Vzhledem ke složitosti provedení této údržby, která vyžaduje rozebrání podstatných částí letadla, musí jej provádět kvalifikovaná údržbová organizace disponující speciálními přípravky a nářadím v náležitě vybaveném hangáru. V závislosti na typu letadla a organizace práce údržbové organizace trvá provedení *C-checku* od jednoho týdne až po několik týdnů.

**D-check** – nejvyšším stupněm těžké údržby je pak generální oprava neboli *overhaul inspection*. Při této údržbě je letadlo téměř kompletně rozebráno a všechny letadlové části a celky jsou zkontrolovány, případně vyměněny. *D-check* je také ideální příležitostí pro modernizaci některých letadlových celků, které byly pro daný typ vyvinuty až po jeho vyrobení. Např. instalace wingletů, update avioniky, přestavba interiéru. *D-check* se provádí každých 4-6 let. Tento program údržby je vysoce nákladný jak časově, tak z hlediska finančních nákladů provozovatele a provádí ho jen specializované údržbové organizace nebo přímo výrobce daného typu letadla [2].



### 1.1.3 Předpisy údržby

Mezi původní letecké předpisy patří britské *British Civil Airworthiness Requirements* (BCAR) – vydávané vládním úřadem *Civil Aviation Authority* (CAA) a americké předpisy *Federal Aviation Regulation* (FAR) vydávané úřadem *Federal Aviation Administration* (FAA). Tyto předpisy pak byly přijaty pro sjednocené *Joint Aviation Requirements* (JAR), vydávané dřívějším evropským úřadem *Joint Aviation Authorities* (JAA). V dnešní době však byl v Evropě nahrazen organizací EASA, která nahradila nedostatky JAA jako organizace zodpovědné za bezpečnost civilního letectví. Hlavním cílem EASA je oproti JAA pokrýt všechny oblasti civilního letectví. Organizace tak zpracovává společné standardy pro oblast civilního letectví, dohlíží na jejich jednotnou aplikaci v Evropě a prosazuje je na celosvětové úrovni.

Pro údržbu vydala EASA předpisy, které mají základy v předpisech JAR s názvem *Nařízení Komise č.2042/2003*. Tyto předpisy se týkají zachování letové způsobilosti letadel a leteckých výrobků, letadlových částí a zařízení a schvalování organizace a personálu zapojených do těchto úkolů [3]. Toto nařízení má čtyři přílohy, které obsahují společné technické požadavky a administrativní postupy.

- Příloha I Část M (Part M) – Požadavky na zachování letové způsobilosti.
- Příloha II Část 145 (Part 145) – Oprávnění organizace k údržbě.
- Příloha III Část 66 (Part 66) – Osvědčující personál.
- Příloha IV Část 147 (Part 147) – Požadavky na výcvikové organizace.

Na území České republiky je příslušným leteckým úřadem ÚCL – Úřad pro civilní letectví.

### 1.1.4 Současný přístup k údržbě letadel

Jak už bylo v úvodu zmíněno, údržba letadel je neodmyslitelnou a vysoce regulovanou součástí aktivit každého provozovatele letecké dopravy. Pro leteckého dopravce je to však také velice nákladná část finanční politiky. Redukce nákladů na údržbu je tak velice častým krokem společností, které řeší svou schopnost přežít ve vysoce konkurenčním prostředí letecké dopravy. Jednou z cest, která vede k výraznému snížení nákladů v oblasti údržby je vytvoření vlastní CAMO organizace, tedy získání certifikátu, který opravňuje prodlužovat letadlu certifikát o zachování letové způsobilosti, jinými slovy mít vlastní „lehkou údržbu“. Taková organizace pak nemusí platit vysoké částky za prováděnou údržbu třetí straně a může tak sama zodpovídat za technický stav své flotily. Dalším krokem, jak redukovat tyto náklady je pak nákup repasovaných komponent, které mají výrazně nižší cenu než komponenty nové.

Životnost a spolehlivost těchto komponent by měla být s těmi novými srovnatelná. Každá komponenta, tedy nový, opravený nebo repasovaný musí vždy projít kontrolní inspekcí, před uvolněním do provozu. V této bakalářské práci bych rád poukázal na takové přístupy v údržbě, kterými při práci s daty získanými během údržby letadla můžeme předcházet opakovaným závadám a tím redukovat vysoké náklady spojené s neplánovanou údržbou, kompenzacemi za zpožděné lety, či odstavení letadla z důvodu provozní neschopnosti.

## **1.2 Společnost Smartwings**

Smartwings je největší českou a nejrychleji rostoucí středoevropskou leteckou společností. Společnost je součástí koncernu Smartwings Group společně s leteckými společnostmi České Aeroline, Smartwings Slovakia, Smartwings Poland a Smartwings Hungary. Smartwings je certifikována pro obchodní dopravu cestujících i nákladů podle pravidel Evropské unie. Rovněž však splnila náročné požadavky federálního úřadu pro letectví FAA v USA. [4]

Sídlo společnosti Smartwings je na letišti Praha (LKPR), kde společnost disponuje i dvěma hangáry (A a E) pro lehkou a traťovou údržbu. Typy, na kterých má společnost povoleno provádět údržbu jsou Boeing 737 Next Generation, Boeing 737 MAX a Cessna 680. Z důvodu rozdílného provozu letadel Cessna je hangár A umístěn v blízkosti Terminálu 3. Technický úsek společnosti a údržba letadel B737 pak probíhá v hangáru E, který se nachází v jižní části LKPR. Flotila společnosti se pohybuje okolo 30 kusů letadel typu B737NG ve verzích -700/-800/-900 a 7 kusů typu B737MAX ve verzi 8. Vzhledem k uvedenému počtu provozovaných kusů se v této práci zaměřuji na letadlo B737NG.

### **1.2.1 Údržba letadel u společnosti Smartwings**

Společnost je také oprávněnou CAMO organizací, tedy organizací, která je oprávněna řízením o zachování letové způsobilosti. Jinými slovy společnost má vlastní kvalifikovaný a oprávněný personál pro uvedení letadel zpět do provozu po údržbě. Celková údržba u společnosti je popsána v dokumentu MOE, jenž je celkovým výkladem o prováděné údržbě u společnosti. Tento dokument je schvalován Úřadem pro civilní letectví.

Pro účely údržby je společnost držitelem těchto osvědčení podle Nařízení Komise EU č.1321/2014:

- Osvědčení o oprávnění k řízení letové způsobilosti (part M)
- Osvědčení o oprávnění k údržbě (part 145)
- Osvědčení o oprávnění pro výcvik údržby (part 147)

Celková údržba je ve společnosti řízená pomocí interního systému, který automaticky hlídá veškerou údržbu, kterou je na flotile potřeba provést. Tato údržba se spojuje s dalšími potřebnými pracemi do tzv. *AV checků*, podle kterých jsou následně prováděny. Vedle samotných techniků, kteří přímo provádí údržbu na flotile B737 je dále technický úsek rozdělen na oddělení plánování, inženýringu, technický dispečink *Maintenance Control Center (MCC)*, oddělení zástupců společnosti Boeing a oddělení technické dokumentace. MCC je částí technického úseku, kterým protéká nejvíce informací. Toto oddělení má dvacetičtyř hodinový provoz a slouží jako přímá podpora pro posádky v případě jakéhokoliv problému, nebo vzniklé závady na letadle. Oddělení plánování má za úkol dlouhodobě, ale i náhle plánovat údržbu, která je na flotile potřeba provést. Hlavním úkolem oddělení je zaručit, aby na místě, kde bude údržba prováděna, byl potřebný materiál a dostatek lidských zdrojů pro její provedení. Společnost je také v přímém kontaktu se zástupci společnosti Boeing. S těmito zástupci tak může technický úsek přímo konzultovat akutní nebo atypické problémy vzniklé v provozu, u kterých je potřeba asistence výrobce.

Pro účely této práce je nejdůležitější spolupráce s oddělením inženýringu. Personál tohoto oddělení je rozdělen na tzv. inženýry, kde každý z inženýrů má odpovědnost za určité systémy na letadle. Tito inženýři na základě vzniklé závady vytváří tzv. *work karty*, podle kterých pak technici provádí příslušnou údržbu na letadle. Jejich dalším úkolem je také sledování dat, která registrační systémy letadla během provozu zaznamenávají o funkci jednotlivých systémů. Sledováním těchto dat lze identifikovat některé závady dříve, než se ve skutečnosti projeví v provozu a lze tak předcházet finančním ztrátám, které vznikají při přerušení provozu letadla z důvodu technické závady.

Přesto, že jde o profesionálně nastavený systém údržby, navíc osvědčený historií její provozní bezpečnosti, je zde z mého pohledu stále prostor pro zlepšení a inovace postupů. Jedním z řešení, které bych zdůraznil je především odlehčení zahlcenému oddělení inženýringu. Toto oddělení převážně řeší aktuální technické závady na flotile. Z tohoto důvodu zde pak není prostor pro sekundární činnost, kterou je právě analýza spolehlivosti systémů letadla, která může přinést inovativní řešení v údržbě. Vzhledem k rostoucímu počtu provozovaných letadel ve flotile, by bylo dobré posílit i toto oddělení z hlediska lidských zdrojů.

### **1.3 Identifikace problémového systému**

Pro identifikaci a následnou analýzu systému, který na flotile B737NG vykazuje nízkou spolehlivost jsem nejvíce spolupracoval s inženýry z oblasti spolehlivosti a dále pak s inženýry, kteří mají odpovědnost za příslušné systémy. Z dostupných provozních dat jsem tak

identifikoval pneumatický systém (skupina ATA36) jako nejvýznamnější. Hlavním důvodem tohoto rozhodnutí je nejen důležitost správné funkce samotného systému v provozu, ale i dopad jeho závad na ostatní systémy na letadle. Striktní provozní omezení v případě nefunkčnosti pneumatického systému a následná potřebná údržba, mohou způsobit přerušení operační činnosti letadla minimálně na několik hodin. Z následující tabulky 1 tak můžeme vypočítat počet závad, které vedly až k výměně komponent na systému v porovnání s ostatními systémy na letadle za období jednoho roku na flotile 30 letadel typu B737NG ve verzích -700/800 a 900ER. Důležité je však správné pochopení této tabulky. Nelze vybírat kapitolu podle nejčetnějších výměn, ale je třeba tyto kapitoly třídit s ohledem na omezení, která plynou z nefunkčnosti konkrétního systému.

*Tabulka 1 - Počet závad na jednotlivých systémech [5]*

*21 – Klimatizace a přetlakování, 22 – Autopilot, 23 – Komunikace, 24 – Elektrická síť, 25 – Vybavení, 26 – Požární ochrana, 27 – Ovládací prvky letu, 28 – Palivo, 29 – Hydraulický systém, 30 – Ochrana proti dešti a ledu, 31 – Indikace a záznamy, 32 – Přistávací zařízení, 33 – Osvětlení, 34 – Navigační systémy, 35 – kyslík, 36 – Pneumatický systém, 38 – Vodní a odpadní systém, 44 – Kabinové systémy, 46 – Informační systém, 48 – Systém tvorby dusíku, 49 – APU, 71 – Pohonná jednotka, 73 – Palivový systém a ovládání pohonné jednotky, 74 - Zapalování*

KAPITOLA (ATA)	POPIS	POČET PORUCH
21	Air Conditioning	79
22	Autoflight	19
23	Communications	105
24	Electrical Power	28
25	Equipment & Furnishings	564
26	Fire Protection	56
27	Flight Controls	34
28	Fuel	33
29	Hydraulic Power	19
30	Ice & Rain Protection	21
31	Indicating & Recording	51
32	Landing Gear	1834
33	Lighting	135
34	Navigation	144
35	Oxygen	178
36	Pneumatic	93
38	Water & Waste	35
44	Cabin Systems	67
46	Information Systems	3
48	Nitrogen Generation Sys.	12
49	APU	42
71	Power Plant	12
73	Engine Fuel & Control	28
74	Ignition	8

Z pohledu údržby letounů verze B737NG můžeme v provozu pozorovat časté a opakované výměny dílů ze skupiny ATA 36, které mají významný dopad na správnou funkci celého

pneumatického systému. Komponenty tohoto systému charakterizuje v první řadě vysoká pořizovací cena, a to i v případě repasovaných dílů. Díky obtížnému přístupu k těmto komponentám, které jsou umístěny převážně na motoru, je i doba za kterou lze díl vyměnit relativně dlouhá a vyžaduje specifické nářadí a ideálně kryté pracovní prostředí, tedy hangár. Vzhledem k těmto faktům, jsem se rozhodl provést analýzu spolehlivosti právě na tomto systému, a tím se pokusit předcházet situacím, kdy systém v provozu nečekaně vypoví svou funkci.

## **1.4 Historie letounu Boeing 737**

V oblasti letecké dopravy je společnost Boeing tradičním producentem civilních letadel, která se opírají o prověřená konstrukční řešení jednotlivých systémů letadla, doplněná o inovativní řešení u nových modelů. Z mého pohledu právě takto nastavená politika ve výrobě nejlépe charakterizuje tuto společnost, která svými produkty ovládla světové nebe v oblasti letecké přepravy.

Nejprodávanějším typem této společnosti je model 737, který je vůbec nejprodávanějším letadlem v historii letectví. Tento typ je koncipován jako dvoumotorové, proudové, úzkotrupé letadlo na krátké a střední tratě s přepravní kapacitou od 65 až do 215 cestujících. Model 737 byl představen již v roce 1964 ve verzi -100 a -200 s prodlouženým trupem, avšak do provozu se dostal až v roce 1968 leteckou společností Lufthansa. V roce 1984 pak společnost představila první modernizaci tohoto typu a to ve verzích -300, -400 a -500. Modernizace této série, známá také pod názvem EFIS, spočívala především v použití dvouproudových motorů CFM-56 3B s větším obtokovým poměrem a vylepšenou avionikou, včetně nového letově navigačního počítače.

Na začátku devadesátých let pak byla představena druhá modernizace tohoto typu s názvem Next Generation, a to ve verzích -600/-700/-800/-900. Pro jeho vývoj se společnost Boeing rozhodla s cílem odpovědět na konkurenční A320 od evropské společnosti Airbus. Modernizace typu proběhla především použitím ještě větších a výkonnějších motorů CFM-56 7B, dále pak použití většího rozpětí křídel a nového digitálního kokpitu.

Poslední modernizací typu 737 je pak verze MAX, která se do provozu dostala v roce 2018. Použitím velice úsporných a výkonných motorů CFM LEAP 1B, úpravou aerodynamiky a využitím nejmodernější elektroniky a avioniky vyhnala koncept 737 na samou hranici, kterou původní koncepce letounu umožňovala [6].

## 2 Technický popis

V této kapitole popisují funkci pneumatického systému Boeingu 737 NG. Hlavním cílem je seznámení se s funkcí celého systému a jeho komponent, za pomoci oficiálních manuálů „*Boeing maintenance manual*“ [7] typu B737NG používaných v údržbě u společnosti Smartwings a odborné práci ze stáže v údržbě B737NG u společnosti AeroAsia [8].

### 2.1 Historie pneumatického systému na typu B737

V průběhu vývoje nových sérií typu B737 bylo mnoho letadlových celků převzato ze sérií předchozích. Větší výkony nových typů tak mají za příčinu větší zatěžování těchto letadlových celků, systémů nebo komponent, což vede i k podstatnému snížení životnosti v provozu. Jedním z takovýchto celků je pneumatický systém na sérii 737 NG, který byl plně převzat z předchozích verzí -300/-400/-500.

U verze -300/400/500 je systém dimenzován na výkony motoru CFM-56 3B a díky tomu zde systém nevykazuje potřebu zvýšené údržby. Série NG však používá výkonnější motory CFM-56 7B, u kterých tyto zvýšené výkony vedou k nárůstu teplot a tlaku v systému, a tím dochází ke snížení spolehlivosti systémových komponent. Důležitost správné funkce komponent kapitoly ATA 36 dokazuje i fakt, že vzniklé závady na tomto systému dále ovlivňují funkčnost dalších, neméně důležitých systémů na letadle.

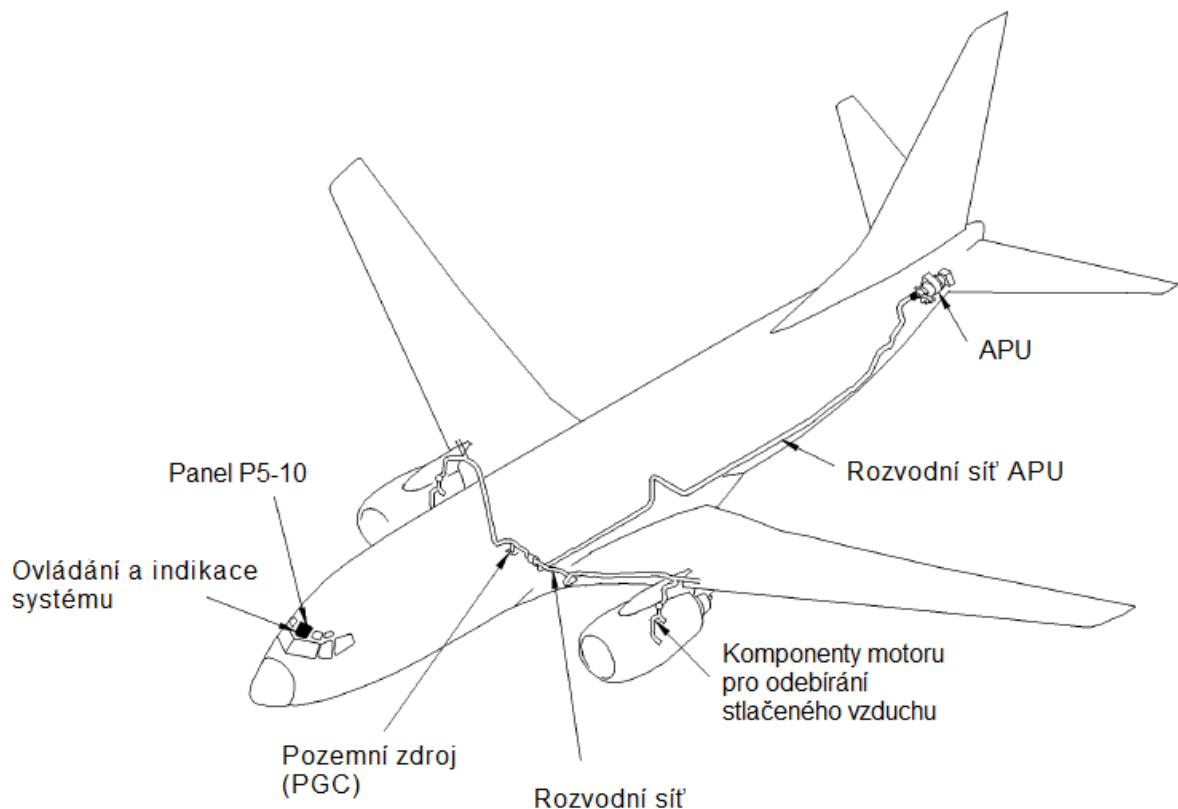
### 2.2 Popis pneumatického systému letadla B737NG

Pneumatický systém dodává stlačený vzduch od jeho zdrojů k dalším uživatelským systémům na letadle.

Zdroje stlačeného vzduchu jsou:

- Odběry od motoru 1 a 2
- Odběry od pomocné pohonné jednotky APU
- Pozemní zdroj *Pneumatic Ground Connection* (PGC)

Systém je tvořen převážně mechanickými prvky a potrubní sítí, která stlačený vzduch rozvádí po letadle. Hlavní funkcí mechanických prvků je neustálá regulace teploty a tlaku v systému. Ovládání systému je pak za pomoci elektrotechnického bloku ACAU, který je pro levou i pravou větev systému instalován zvlášť. Veškeré indikace o stavu systému a jeho ovládací prvky jsou v kokpitu umístěny na horním středovém panelu P5-10. Na obrázku 1 můžeme vidět potrubní síť pneumatického systému a jeho zdroje umístěné na letadle série B737NG.



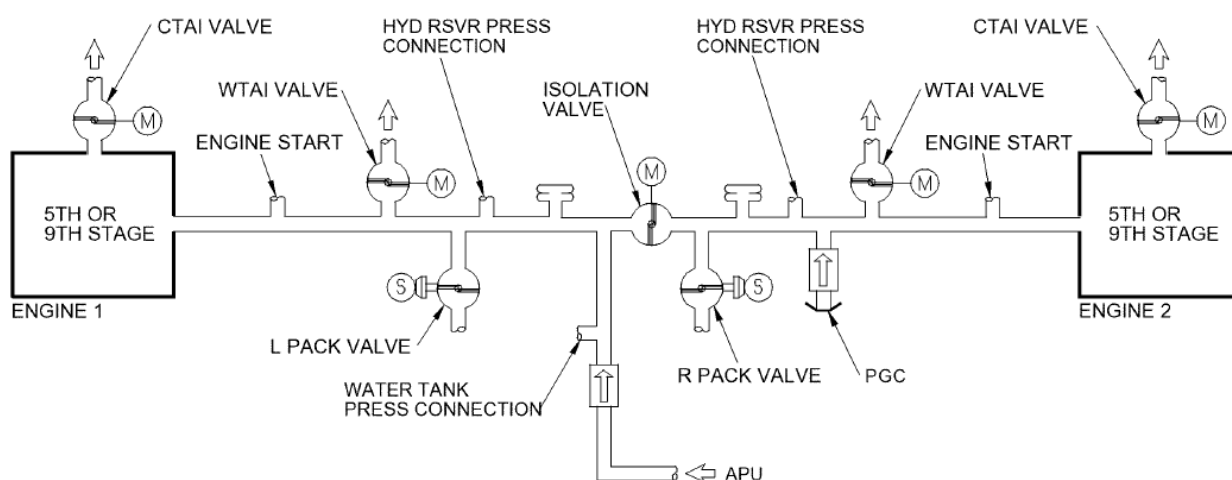
Obrázek 1 - Potrubní síť a zdroje pneumatického systému B737NG [7]

Na motorech 1 a 2 se vzduch odebírá z pátého a devátého stupně kompresoru. Odběry od APU jsou využívány jen za podmínek, kdy je letadlo na zemi, nebo při letu do FL170. Toto potrubní vedení od APU vede do levé větve potrubní sítě a je chráněno zpětným ventilem. Pozemní konektor PGC je součástí pravé větve a je umístěn pod letadlem. Tohoto zdroje se využívá v případě, kdy je letadlo na zemi a je za potřeby stlačený vzduch pro funkci některého z uživatelských systémů. Pneumatický systém lze pomocí mechanického ventilu s názvem „*Isolation valve*“ rozdělit na levou a pravou stranu. Tato funkce je velice praktická při selhání některého z komponent systému. Pomocí dalších mechanických ventilů, můžeme také izolovat systém od jednotlivých zdrojů stlačeného vzduchu.

Jak už bylo zmíněno, hlavní funkcí pneumatického systému je dopravit stlačený vzduch pro další systémy letadla. Přívod z potrubí k těmto systémům, reguluje vždy mechanický ventil. Na obrázku 2 můžeme vidět tuto potrubní síť společně s mechanickými prvky, kterými se stlačený vzduch do jednotlivých systémů přivádí.

Pomocí stlačeného vzduchu od zdrojů, se pak na letadle pohání tyto uživatelské systémy:

- Systém spouštění motorů
- Systém klimatizace a přetlakování kabiny – ATA 21
- Tlakování vodního systému – ATA 38
- Tlakování rezervoárů hydraulického systému – ATA 29
- Systém tepelného vyhřívání vstupního krytu na motorech *Cowl Thermal Anti-Ice* (CTAI)
- Systém tepelného vyhřívání náběžných hran křídla *Wing Thermal Anti-Ice* (WTAI)



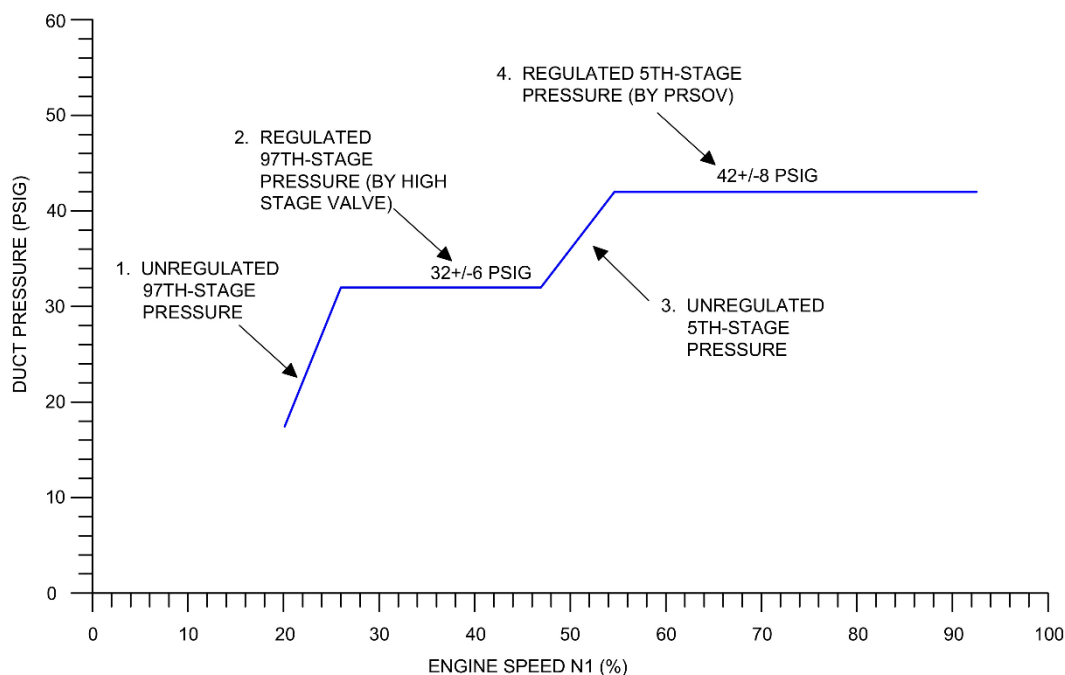
Obrázek 2 - Uživatelské systémy a jejich umístění v potrubní síti ATA 36 [7]

ENGINE 1 and 2 - Motor 1 a 2, 5TH and 9TH STAGE – Odebírání stlačeného vzduchu od 5. nebo 9. stupně kompresoru, CTAI VALVE – Ventil pro regulaci vyhřívání krytu motoru, ENGINE START – Rozvodní síť ke startéru motoru, WTAI VALVE – Ventil pro regulaci vyhřívání náběžné hrany křídla, R/L PACK VALVE – Ventil pro regulaci dodávky stlačeného vzduchu pro klimatizační packy, HYD RSVR PRESS CONNECTION – Tlakování hydraulického rezervoáru, PGC – Pozemní zdroj stlačeného vzduchu, WATER TANK PRESS CONNECTION – Tlakování vodního rezervoáru

## 2.3 Vzduch odebíraný od motoru

Na letadle B737NG je pro každý motor vlastní odebírací systém (Bleed System). Po spuštění motorů se stává tento zdroj primárním zdrojem stlačeného vzduchu. Tento systém je nainstalován přímo na motoru a reguluje přívod množství odebíraného vzduchu, dále pak jeho teplotu a tlak. Vzduch je odebírán z pátého a devátého stupně vysokotlakého kompresoru. Při nízkých otáčkách motoru je vzduch odebírán primárně z devátého stupně, díky většímu tlaku a teplotě. Nad 48% N1 otáček motoru, je pak vzduch do systému odebírán z pátého stupně. Tento průběh je zachycen na obrázku 3.





Obrázek 3 - Graf zachycující vztah mezi otáčkami motoru a tlakem v potrubním systému [7]  
ENGINE SPEED N1 – Motorové otáčky N1, DUCT PRESSURE – Tlak v rozvodní síti  
1 - Neregulovaný tlak odběru od 9. stupně, 2 – Regulovaný tlak odběru od 9. stupně pomocí HSV  
3 - Neregulovaný tlak odběru od 5. stupně, 4 – Regulovaný tlak odběru od 5. stupně pomocí PRSOV

Ideálním stavem tedy je, pokud se tlak v systému pohybuje okolo 42 psi v obou větvích, v závislosti na otáčkách motoru.

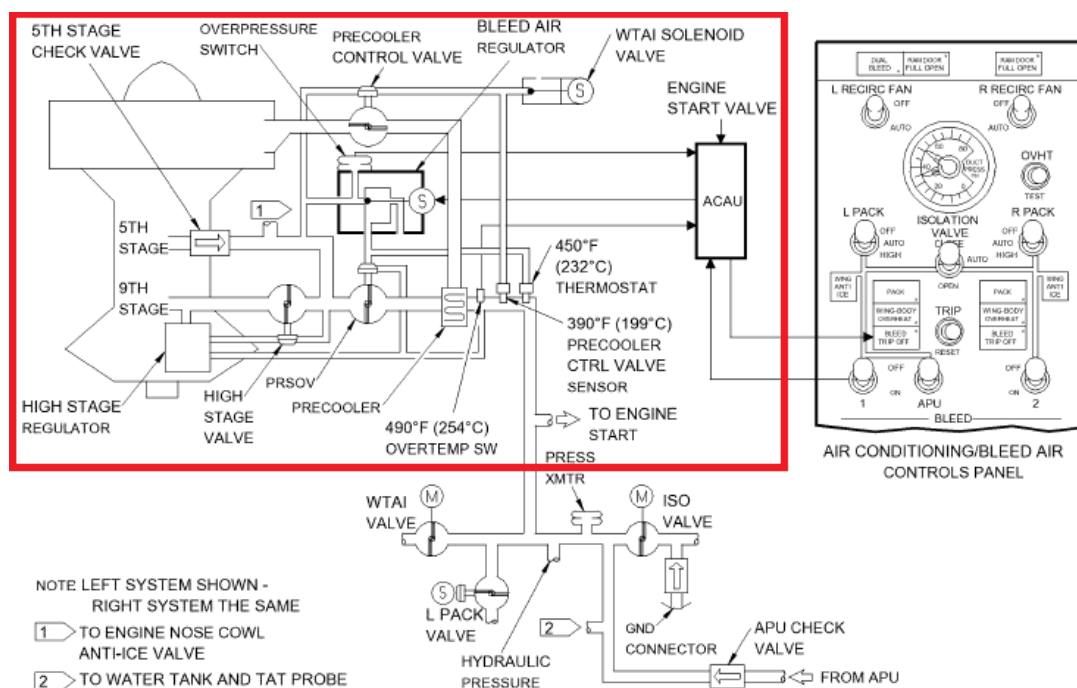
Komponenty regulující průtok vzduchu od devátého stupně jsou *High Stage Regulator* (HSR) a *High Stage Valve* (HSV), tedy vysokotlaký regulátor a vysokotlaký ventil. Pokud zvýšíme otáčky motoru a HSV se zcela uzavře, odebírá se pak horký vzduch od pátého stupně přes kontrolní ventil „5th stage check valve“, který zároveň brání i průtoku z opačné strany, tedy ze systému do motoru.

Celkový odběr je pak řízen pomocí ventilu *Pressure Regulate and Shut Off Valve* (PRSOV), který reguluje správnou teplotu a tlak odebíraného vzduchu. Pomocí tohoto ventilu se tak reguluje celkový průtok horkého vzduchu, který později ochlazujeme. Tento ventil nám zároveň umožňuje uzavření celého odběru z motoru. Mechanická funkce ventilu PRSOV je ovládána pomocí regulátoru *Bleed Air Regulator* (BAR), který sleduje rozdíly teploty a tlaku v systému a podle toho pak s ventilem pohybuje.

Horký vzduch dále pokračuje do komponentu s názvem *Precooler*, ve kterém se ochlazuje na teplotu okolo 199 - 227°C a to odebraným studeným vzduchem od dmychadla na stejném

motoru. Tento studený vzduch je regulován pomocí *Precooler Control Valve* (PCV). Na obrázku 4. můžeme vidět, že za *Precoolerem* jsou pak instalovány teplotní a tlaková čidla 450 *Thermostat* (450T), 490 *Overtemperature Switch* (490OS) a 390 *Precooler Control Valve Sensor* (390PCVS), pro kontrolu správné teploty dodávaného vzduchu v systému. Pomocí těchto hodnot pak zpětně regulují mechanické prvky jako BAR, PRSOV a PCV proudy vzduchu odebírané od motoru.

Termostat 450T má za úkol udržovat teplotu v systému pod 450°F (232°C). Pokud teplota stoupne nad tuto hodnotu termostat vyše řídící tlak do PRSOV, čímž sníží průtok odebíraného vzduchu. Čidlo nadměrné teploty 490°F (254°C) je kontrolním čidlem, které chrání přehřátí pneumatického vedení. V případě, že v systému dojde k přehřátí čidlo vyše signál přes elektrotechnický blok ACAU do BAR, který pomocí PRSOV uzavře celý odběr a zároveň v kokpitu rozsvítí signalizaci „BLEED TRIP OFF“, která signalizuje přerušení odběru od motoru.



Obrázek 4 - Systém odebírající vzduch od motoru (zvýrazněn červeným obdélníkem) [7]

5TH STAGE CHECK VALVE – Ventil pro regulaci odběru od 5. stupně kompresoru, HIGH STAGE REGULATOR – Regulátor regulující pohyb vysokotlakým ventilem, HIGH STAGE VALVE – Ventil pro regulaci odběru od 9. stupně kompresoru, PRSOV – Ventil pro regulaci celkového odběru stlačeného vzduchu, PRECOOLER – Výměník, 490OS – Teplotní čidlo na 490F, 450T – Teplotní čidlo na 450F, 390PCVS – Teplotní čidlo na 390F, BLEED AIR REGULATOR – Regulátor regulující pohyb PRSOV  
AIR CONDITIONING BLEED AIR CONTROLS PANEL – Ovládací panel P5-10 pneumatického systému a klimatizačních jednotek umístěný na horním středovém panelu

## 2.4 Údržba pneumatického systému

Z hlediska údržby je největší nevýhodou integrita samotného systému. Pokud dojde k závadě na systému odběrů od motoru systém pouze hlásí informaci, že je nefunkční a neodkazuje se pomocí tzv. „*fault message*“ přímo na komponenty, které jsou nefunkční, na což jsme u jiných systémů B737NG zvyklí. Je to především z toho důvodu, že systém je ovládán zcela automaticky, a to za pomoci rozdílů tlaku a teploty. Elektrotechnický blok ACAU tak přenáší pouze data o zapnutí odběru z kokpitu, nebo o jeho vypnutí z důvodu přehřátí. Vzhledem k takovéto konstrukci systému se při jeho závadě jedná s určitostí o mechanickou závadu, která ve většině případů znamená výměnu 2 až 3 komponent systému.

Jedním ze způsobů, jak lze těmto situacím předcházet je tzv. „*Health Check*“ systému. Jedná se o časově náročnou proceduru, která vyžaduje speciální měřící aparaturu se stlačeným vzduchem. Procedura spočívá v postupném izolování jednotlivých mechanických součástí systému a následně kontrolou jejich správné funkce pomocí stlačeného vzduchu. Nevýhodou této procedury, která má za úkol identifikaci poškozených komponent v systému, je již zmíněný čas. Zkušenému technikovi trvá tato procedura i několik hodin. Z tohoto důvodu se v údržbě tato procedura nedělá preventivně, ale jen ve chvíli, kdy dojde k mechanické poruše některé z komponent a systém vypoví svou funkci. Letadlo je pak nutno dopravit na hangár a tím se s časovou náročností identifikace a výměny komponent stává dlouhodobě provozně nepoužitelné.

## 2.5 Provozní omezení

Mezi provozní omezení, která plynou přímo z *Master Minimum Equipment List* (MMEL) [9] Boeingu 737 NG pro závady z ATA 36, patří především let v nižší hladině a let mimo podmínky s rizikem vzniku námrazy. Z technického pohledu pak z MMEL vyplývá, že letadlo je schopno letu, i když je systém plně nefunkční. V takovém případě se ale jedná o let s významnými omezeními, zejména pak výškovým do FL100 a mimo podmínky, kde se může tvořit na letadle námraza. Takovýto let je však značně neekonomický a díky požadavku na let mimo podmínky námrazy i často neproveditelný, a tudíž neslučitelný s praktickým využitím letadla. V běžném provozu z MMEL vyplývá, že jakákoliv závada, vyskytující se na komponentách ATA 36, omezuje provoz letadla maximální FL250, kde ale letadlo letí se značně vyšší spotřebou paliva, a zároveň musí opět letět mimo podmínky kde se tvoří námraza.

V reálném provozu pak dochází k situacím, kdy je posádkou letadlo neakceptováno pro let právě z důvodu meteorologické předpovědi. Letadlo se tak stává *Aircraft on Ground (AOG)*, přestože technicky vzato jím není.

Vzhledem k závažnosti těchto omezení a početným závadám na tomto systému v provozu letadla je z mého pohledu důležité se touto problematikou blíže zabývat. Je tedy třeba analyzovat celý systém z hlediska jeho spolehlivosti a následně nalézt řešení, u kterých dílů by bylo potřeba zavést největší prohlídková opatření.

## 3 Metodika práce

V této kapitole popisují postupy a metody, které se obecně využívají pro řešení spolehlivostních analýz a které využijí ve své práci. Zaměřují se především na metody, které se využívají pro takové analýzy systémů, kde sledujeme spolehlivost systému a jeho komponent a následnou reakci systému na projevené závady.

### 3.1 UML

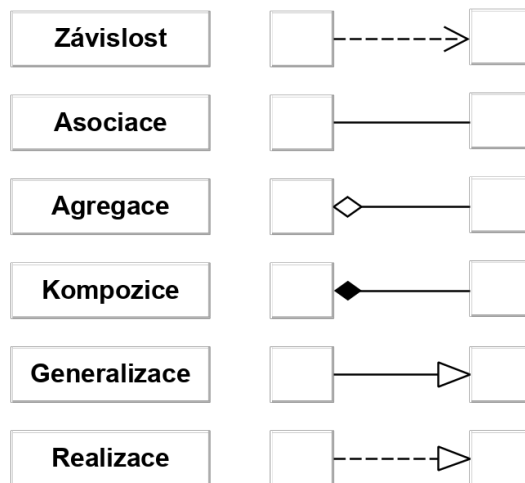
Pro přehledné zobrazení objektových a funkčních schémat systému, analýz a jejich výsledků jsem se v této bakalářské práci rozhodl pro využití unifikovaného jazyka UML. Tento jazyk nám pomáhá pro přehledné zobrazení struktury systému nebo vyjádření jeho funkce. Takto sestavené modely je pak jednoduché použít pro výpočet spolehlivostních analýz a zároveň jasně a přehledně zobrazit kritická místa v systému.

Jazyk UML je univerzální jazyk pro vizuální modelování systémů. Tento jazyk je nejčastěji spojován s objektově orientovaným modelováním, avšak díky svým zabudovaným mechanismům má daleko širší využití. Hlavním úkolem tohoto jazyka je převedení systému do jednoduše orientované a pochopitelné struktury jak pro software, tak pro softwarového inženýra.

#### 3.1.1 Základní pojmy jazyka

Předměty (Things) – Jedná se o samostatné prvky (objekty) modelu. Prvky dále dělíme na strukturální předměty, což jsou podstatná jména modelu UML. Tyto prvky vyjadřují jednotlivé komponenty systému jako statickou část. Dále je zde chování, což označujeme za slovesa jazyka, neboť vyjadřují interakce a stavy v dynamické části modelu. Dalším dělením je pak seskupení což jsou balíčky, které používáme pro seskupení významově souvisejících prvků modelu, a poznámky, které lze do modelu implementovat s úmyslem zachytit informaci sestavenou jen k tomuto účelu.

Vztahy (Relations) – Tyto prvky nám v systému spojují dva nebo více předmětů. Do modelu tak přidávají sémantickou informaci, která popisuje vztah mezi jeho jednotlivými předměty. Tyto relace jsou klíčovou součástí ke správnému pochopení modelu vytvořeným jazykem UML. Stručný přehled relací v jazyce UML popisují v následujícím obrázku 5.



Obrázek 5 – stručný popis relací jazyka UML

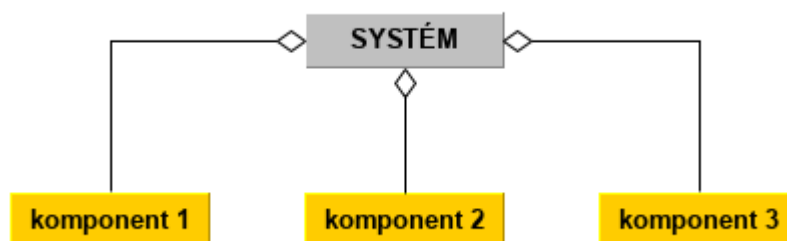
Diagramy – Vyjadřují kombinaci vztahů a předmětů. Sestavený diagram vyjadřuje celek navrhovaného nebo zobrazovaného systému. Ke správnému popisu systému obvykle potřebujeme více jak jeden diagram, neboť záleží na úhlu pohledu, s jakým systémem popisujeme. Tyto pohledy lze jednoduše rozdělit na statický, dynamický a uživatelský.

### 3.1.2 Struktura jazyka UML

Strukturu tohoto jazyka vyjadřujeme pomocí diagramů, jenž jsou grafickou reprezentací navrhovaného nebo zobrazovaného systému. Tyto diagramy jsou složeny z přesně definovaných bloků, které nám charakterizují, zda se jedná o statickou strukturu nebo dynamickou funkci.

### 3.1.3 Statický diagram (Diagram komponent)

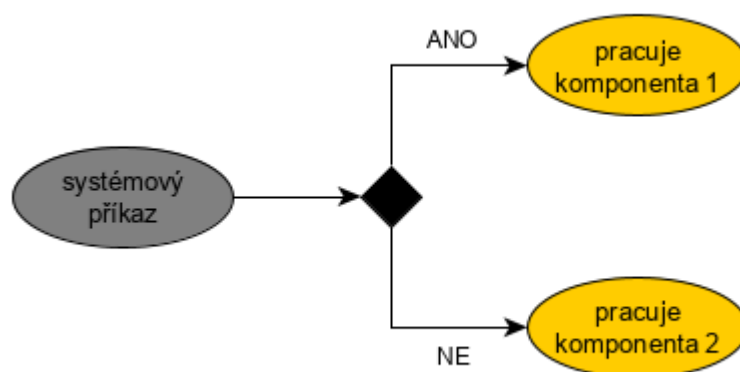
Tento diagram nepopisuje samotnou funkci daného systému, ale komponenty použité pro jeho funkčnost. Tento diagram dává statický nadhled nad celým systémem. Takto sestavený diagram tedy používáme pro vizualizaci komponent obsažených v systému a způsob jejich agregace do celků. Sestavený diagram pak můžeme vidět na obrázku 6.



Obrázek 6 – Příklad statického (objektového) diagramu

### 3.1.4 Dynamický diagram (Funkční diagram)

Dynamický diagram se používá pro modelování logiky jednotlivých procesů a zachycení pracovního postupu systému. Takto sestavený diagram je reprezentován sekvencí kroků, které jsou zobrazovány jako jednotlivé akce nebo aktivity. Počátek takového diagramu jsou vždy vstupní data, která předávají data na výstup. Výhodou tohoto diagramu je pak jednoduše zmapovaná cesta těchto dat, a to jak jejich aktivit, tak i k nim korespondujícím objektům, ze kterých tyto funkce vyplývají. Příklad diagramu aktivit můžeme vidět na obrázku 7.



Obrázek 7 – Příklad dynamického diagramu

Jazyk UML využívám v této práci především pro jasnou definici hloubky problematiky, které se chci v této práci dále věnovat. Pro detailnější pochopení jazyka UML existuje řada podrobných publikací, jako například [10] [11].

## 3.2 Metody pro analýzu spolehlivosti

V této části se zabývám základním popisem běžných spolehlivostních analýz. Tyto metody slouží k zajištění bezpečnosti a spolehlivosti systémů v provozu, ale často se používají již při samotném návrhu těchto systémů.

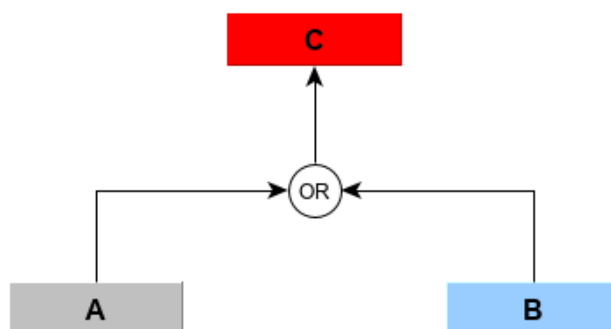
### 3.2.1 FTA

*Fault tree analysis* neboli analýza stromu poruchových stavů je jedna ze základních metod spolehlivostních analýz. Koncept této metody vyvinula společnost *Bell Telephone Laboratories* v roce 1962 a to pro letectvo spojených států amerických. Později byl přijat a velice rozšířen ve společnosti *Boeing Company*, která tento koncept pro analýzu spolehlivosti využívá dodnes.

Metoda analýzy stromu poruchových stavů využívá logické blokové diagramy, které zobrazují stav systému, který je vždy postaven odshora dolů. Důležité pro metodu FTA je, že výsledkem jsou poruchové prvky, nebo kombinace poruch. Takovéto stromové zobrazení tedy vyjadřuje graficky jednotlivé cesty, podle kterých můžeme následně předvídat nežádoucí poruchové stavy, tedy selhání systému.

Jednotlivé prvky systému se nejčastěji spojují pomocí logických operátorů AND a OR, které nám zároveň vyjadřují i vztahy a závislosti s okolními prvky systému. U této metody má každý prvek fixní pravděpodobnost, která vyjadřuje spolehlivost určitého komponentu, resp. jeho funkci. Tyto prvky můžeme rozlišovat na tzv. vstupní a výstupní.

Na obrázku 8 můžeme vidět spojení vstupních prvků symbolem OR. Znamená to, že selhání kteréhokoliv vstupního prvku může přímo ovlivnit selhání prvku na výstupu.



Obrázek 8 - Vstupní prvky spojeny logickým prvkem OR

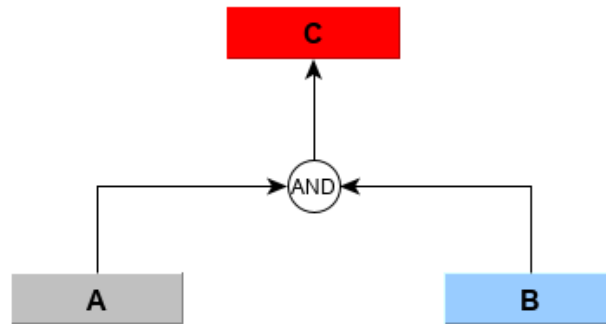
Pro výpočet celkové spolehlivosti to znamená, že pokud jsou prvky A a B spojeny logickým prvkem OR, spolehlivost prvků se spočítá jako součet fixních spolehlivostí prvků A a B tedy:

$$A + B = C$$

Spolehlivost prvku C je tedy logicky nižší, neboť k jeho selhání stačí, aby selhal jen jeden z prvků A nebo B.

Symbol AND používáme na takové části systému, kde musí selhat všechny prvky na vstupu, aby došlo k selhání výstupního prvku. Na obrázku 9 můžeme vidět spojení vstupních prvků právě symbolem AND. Tento symbol tedy značí, že pokud má dojít k selhání prvku C musí dojít jak k selhání prvku A tak i prvku B. Jde tedy o jakousi formu zálohy v systému.





Obrázek 9 - Vstupní prvky spojeny logickým prvkem AND

Spolehlivosti prvku C se pak v tomto případě vypočítá násobením fixních spolehlivostí prvků A a B, tedy:

$$A \times B = C$$

V tomto případě pak spolehlivost prvku C roste, neboť jeho selhání je takto zálohováno vždy druhým prvkem. Každý správně navržený systém by měl toto spojení mezi prvky obsahovat z důvodu zálohy systému, která vede ke zvýšení jeho celkové spolehlivosti.

K identifikaci nejméně spolehlivých komponent systému využíváme výpočet vycházející také z metody FTA. Tento výpočet spočívá v přepočítávání celkové spolehlivosti systému ve stromu poruchových stavů. Tento přepočet provádíme tak, že postupně každému koncovému prvku systému přiřadíme nulovou hodnotu a následně přepočítáme celkovou spolehlivost celého stromu. Komponenty, které nám celkovou spolehlivost systému nejvíce ovlivňují identifikujeme, podle nejnižší vypočtené spolehlivosti z těchto výsledků. Tyto výsledky přepočítáváme na procenta a zobrazujeme pomocí tabulky. Pro pochopení této analýzy jsem využil publikaci [12] a online publikaci [13].

### 3.2.2 FMEA

„*Failure Mode and Effects Analysis*“ je také preventivní metoda, která umožňuje včasné identifikovat možné poruchy, chyby či vady, které mohou ovlivnit funkce systému nebo výslednou kvalitu či bezpečnost, čímž také snižuje míru rizik. Zatímco analýza FTA, uvedenou problematiku zkoumá z pohledu systému, FMEA má zcela opačný přístup. Přístup k řešené problematice tak vychází od uživatele směrem k systému, která následně zkoumá a hodnotí potenciální rizika, která vedou k selhání systému.

Při aplikování této metody se vytváří tabulka, která je rozdělena minimálně na tyto pole:

- Funkce
- Selhání
- Dopad selhání na celkovou funkci
- Příčiny selhání

Následně pak do tabulky zapisujeme jednotlivé funkce a jejich potenciální poruchy a následné stavy systému. Jednotlivé poruchové stavy následně hodnotíme pomocí tzv. *risk priority numbers* (RPNs). Tato čísla jsou pro každý stav tři a vyjadřují hodnocení závažnosti následku selhání, pravděpodobnost výskytu a pravděpodobnost detekce potenciálního selhání.

- Závažnost (SEV)
- Výskyt (OCC)
- Detekce (DET)

Čísla se vybírají od jedné do deseti, kde deset vyjadřuje „nejvíce závažné“ hodnocení a jedna „nejméně závažné“. Celkové hodnocení poruchového stavu se následně vypočítá pomocí dále uvedeného vzorce. Výsledkem je tedy číslo, které je součinem těchto námi dosazených parametrů.

$$RPN = SEV \times OCC \times DET$$

Výsledky, tedy RPN, lze následně použít k porovnání problémů v rámci analýzy pro stanovení priorit pro řešení následných opatření. Důležité je zmínit, že tato metoda vyžaduje zkušenost a znalost analyzovaného systému. Identifikace možných poruch a jejich důsledků je tak založena na zkušenostech s provozováním systému. Pro detailnější pochopení analýzy FMEA používám publikaci [14], a podrobný web [15].

## 4 Spolehlivostní analýza

V této kapitole se zaměřuji na analýzu pneumatického systému letadla Boeing 737 NG. Pro analýzu vybraného systému využívám metodu FTA, která umí pracovat s funkčním zapojením systému, a zároveň umožňuje detailní identifikaci způsobu selhání jednoho prvku a jeho vliv na funkci celého systému. V první řadě představím zobrazení tohoto systému pomocí statického a dynamického UML diagramu, který efektivně zobrazí funkci systému na letadle a následně diagram a výsledky spolehlivostní metody FTA. Tato analýza je založena na provozních datech od společnosti Smartwings.

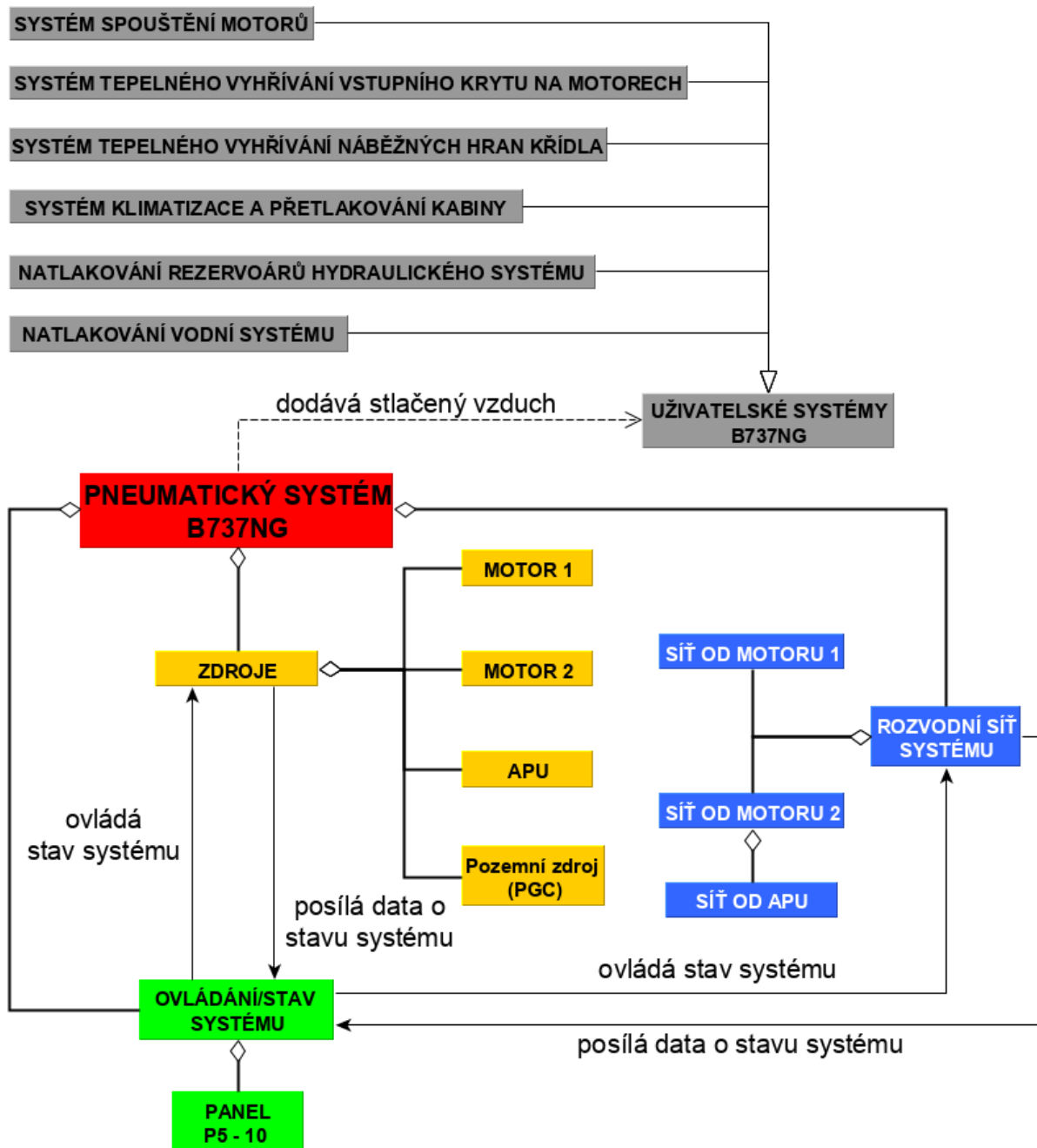
### 4.1 Popis pneumatického systému na B737NG pomocí UML

Pro následnou analýzu FTA v této části popisují funkci pneumatického systému pomocí diagramů jazyka UML. Tyto diagramy nám poslouží k jednoduššímu zobrazení jednotlivých skupin komponent systému s relacemi na příslušné subsystémy. V první řadě to bude diagram statický a následně dynamický. Zjednodušené zobrazení stavby systému a jeho funkce nám zároveň popisuje hloubku problematiky, které se v této práci věnuji.

#### 4.1.1 Statický diagram pneumatického systému

Statický diagram systému zobrazený na obrázku 10 zobrazuje základní skupiny, které tento systém obsahuje a následné relace se systémy, které jsou na pneumatickém systému závislé. Diagram je zobrazen v základních rovinách, tzn. Zdroje, Rozvodní síť a uživatelské subsystémy, které jsou na funkci pneumatického systému závislé.

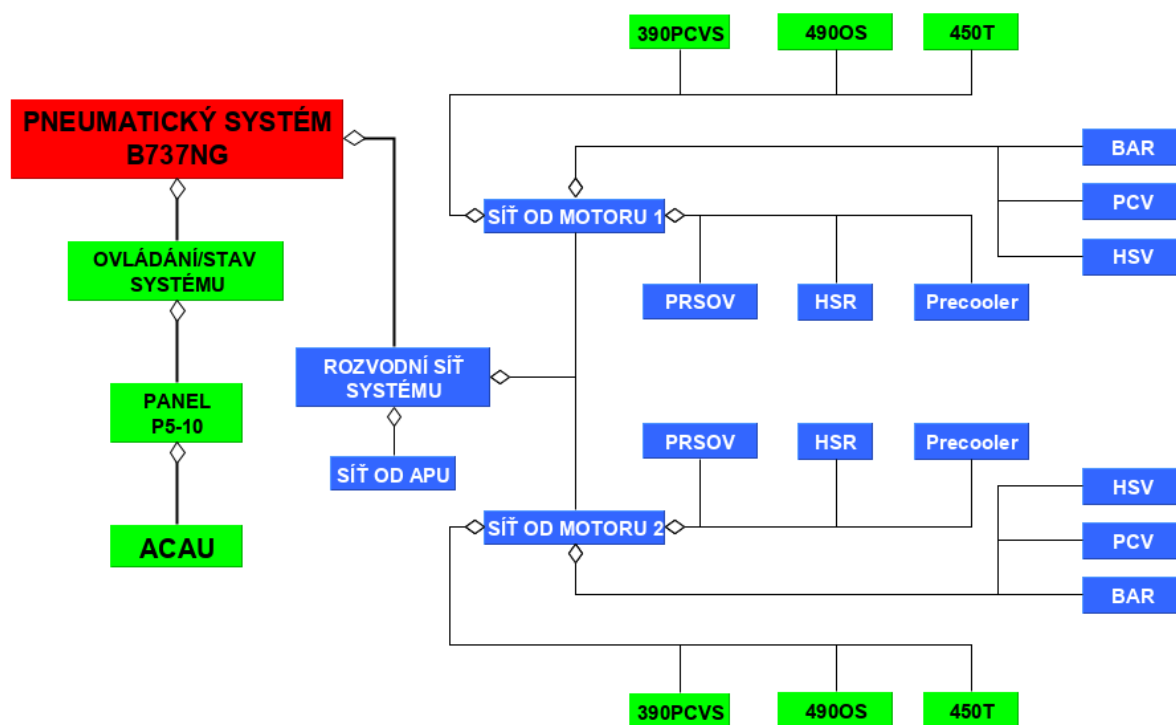
Žluté objekty zobrazují jednotlivé zdroje, které přivádí stlačený vzduch do systému. Modře je zobrazena rozvodní síť, která tento stlačený vzduch rozvádí po letadle. Ovládání systému je zobrazeno zeleně. Relacemi, které spojují objekt zobrazující ovládací panel „P5-10“ a objekty „Zdroje“ a „Rozvodní síť systému“, rozumíme schopnost ovládat či přepínat jednotlivé zdroje, nebo regulovat rozvod stlačeného vzduchu po letadle. Šedé objekty zobrazují veškeré uživatelské systémy, do kterých systém rozvádí stlačený vzduch, tedy závislost jednotlivých subsystémů na pneumatickém systému.



Obrázek 10 – Obecný statický diagram pneumatického systému B737 NG

Obrázek 11 zobrazuje detailnější pohled na část systému, které se dále věnuji. Přidané roviny skupiny „Ovládání/Stav Systému“ a „Rozvodní Sít“ tak zobrazují komponenty, ze kterých se tyto skupiny skládají. Modré objekty zapojené do objektu „Sít motoru 1 a 2“ zobrazují veškeré mechanické komponenty, tedy ventily, regulátory nebo výměníky, ze kterých je rozvodní síť systému složena. Vzhledem k tomu, že tyto mechanické části jsou umístěny na motoru, celý systém je tak rozdělen na identickou pravou a levou stranu.

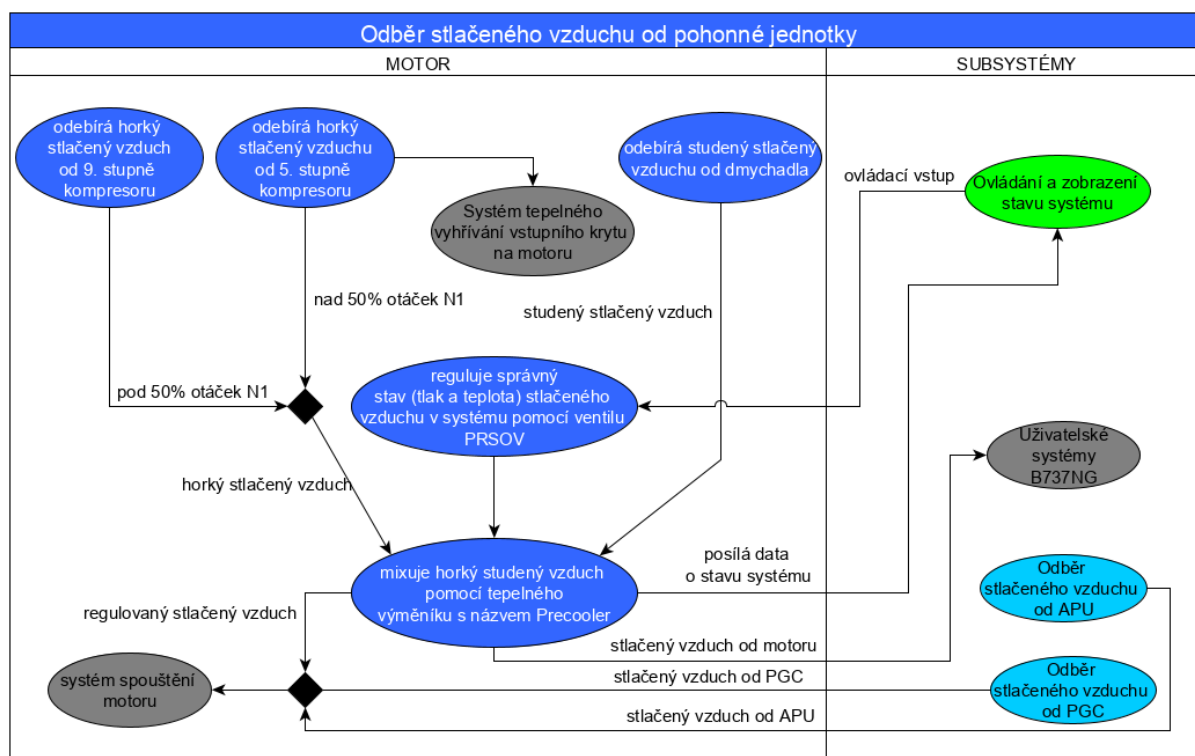
Objekty zelené skupiny popisují opět ovládání systému, kde přibyl elektrotechnický blok ACAU, čidla a senzory. Vzhledem k tomu, že celý systém je ovládán a regulován především pomocí mechanických prvků na základě změn tlaku a teploty je tak blok ACAU jediným elektrotechnickým blokem systému. Elektrické senzory a čidla, mají v systému především kontrolní funkci. Tato čidla a senzory jsou součástí pneumatické rozvodní sítě, odkud posílají do ACAU data o stavu systému.



Obrázek 11 – Detailní statický diagram pneumatického systému B737NG

#### 4.1.2 Dynamický diagram pneumatického systému

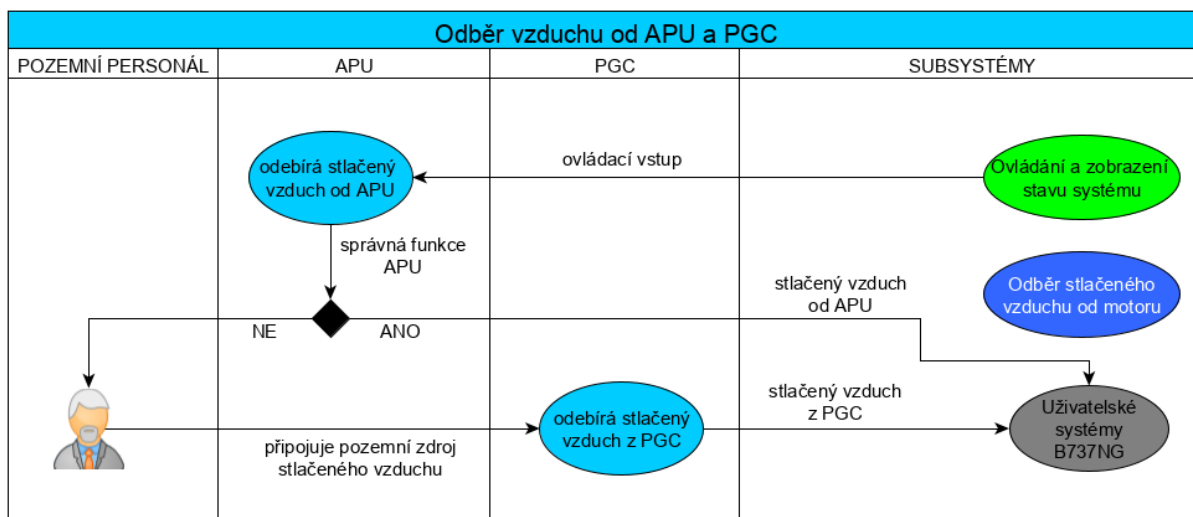
Z důvodu složitosti systému je třeba dynamický diagram rozdělit na několik částí. Obrázek 12 tak zobrazuje první část dynamického diagramu pneumatického systému, konkrétně odběr stlačeného vzduchu od pohonné jednotky. První sloupec s názvem „Motor“ nám tak zobrazuje dynamickou funkci systému na pohonné jednotce. Tmavě modré buňky zobrazují funkci komponent, které jsou součástí pohonné jednotky, a které mají za úkol dopravit a regulovat průtok stlačeného vzduchu do systému. V tomto sloupci také můžeme vidět první dva uživatelské systémy, pro které stlačený vzduch využíváme. Tyto prvky jsou zobrazeny šedou barvou. Vzhledem ke stejné funkci systému na motoru 1 a 2 zobrazují na tomto obrázku pouze funkci systému na jedné pohonné jednotce.



Obrázek 12 - Odběr stlačeného vzduchu od pohonné jednotky

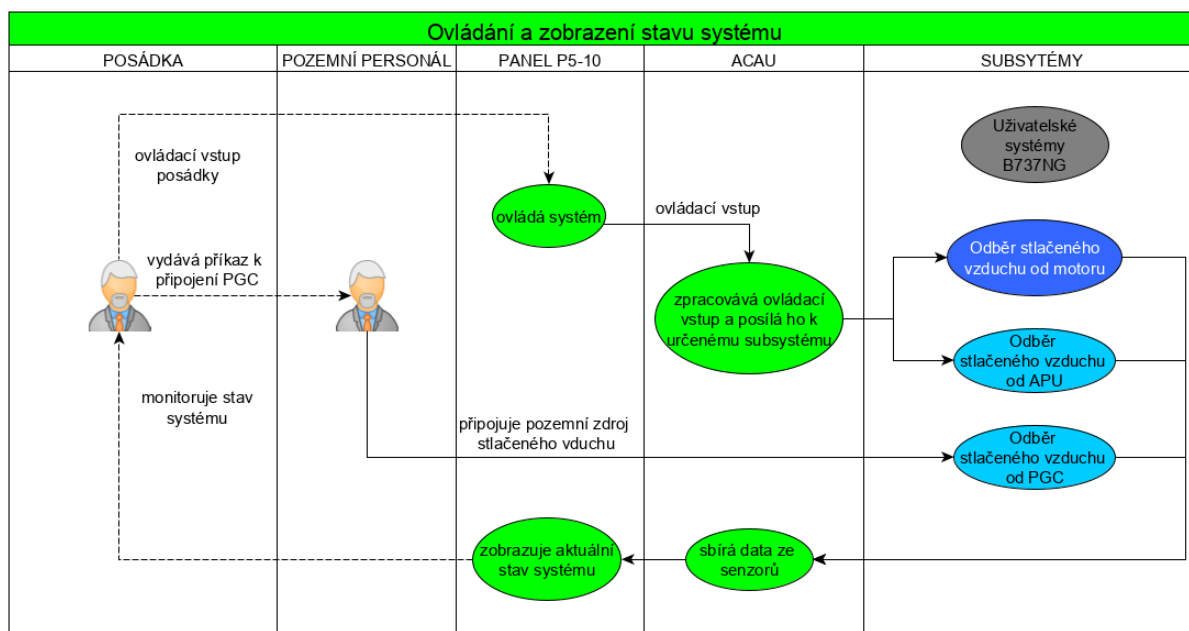
Ve sloupci „*subsystémy*“ jsou zobrazeny systémy, které vstupují do funkce odběru stlačeného vzduchu na pohonné jednotce. V první řadě, je to zeleně zobrazené ovládání a zobrazení stavu systému, světle modře zobrazené odběry stlačeného vzduchu od APU a PGC, a nakonec šedě zobrazené uživatelské systémy B737NG, které jsou na správné funkci odběrů od pohonné jednotky přímo závislé.

Obrázek 13 zobrazuje druhou část dynamického diagramu systému. Na tomto obrázku je zobrazena funkce odběru stlačeného vzduchu od APU a PGC. Tyto dva odběry slouží především ke spouštění pohonných jednotek letadla, nebo udržení komfortních podmínek na palubě, kdy je letadlo na stojánce. Využití odběru vzduchu od pozemního zdroje PGC se využívá především v situaci, kdy je APU mimo provoz. V takovém případě pak pozemní personál připojuje na žádost posádky letadla konektor k letadlu a následně zapíná pozemní zdroj stlačeného vzduchu.



Obrázek 13 - Odběr vzduchu od APU a PGC

Poslední část diagramu pneumatického systému je zobrazena na obrázku 14. Tato část zobrazuje ovládání a zobrazování stavu systému a zároveň přivedení stlačeného vzduchu ze systému k dalším uživatelským systémům na B737NG. Systém je ovládán posádkou na horním středovém panelu v kokpitu, konkrétně na panelu P5-10. Ovládání systému je založeno na dvoupolohových přepínačích, kterými posádka ovládá zapnutí odběru od pohonné jednotky 1 a 2, nebo od APU. V případě připojení PGC posádka pouze rozpozná tlak v rozvodní síti systému.



Obrázek 14 – Ovládání a zobrazení stavu systému

## 4.2 FTA analýza pneumatického systému na B737NG

Pro výpočet FTA spolehlivostní analýzy na tomto systému využívám data z reálného provozu od společnosti Smartwings. Konkrétně se jedná o roční nálet 28 kusů letadla B737NG ve verzích 700/800/900 a vzniklé závady na systému skupiny ATA36, které vedly k provoznímu omezení letounu, ve stejném časovém období. Použitá data zobrazují v následujících tabulkách. Roční nálet flotily zobrazuje tabulka 2.

*Tabulka 2 - Intenzita poruch komponent skupiny ATA 36 za použití letových hodin*

REGISTRACE	CYKLY	LETOVÉ HODINY	REGISTRACE	CYKLY	LETOVÉ HODINY
OK-SWT	1747	3265	OK-TVJ	1294	3294
OK-SWW	1760	3232	OK-TVL	1076	3142
OK-TSD	1241	3288	OK-TVM	1053	3168
OK-TSE	1330	3665	OK-TVO	1207	2983
OK-TSF	1266	3189	OK-TVP	1092	2632
OK-TSH	1311	3413	OK-TVT	1106	3149
OK-TSI	1331	4088	OK-TVU	1324	3854
OK-TSM	1356	4039	OK-TVV	1117	3118
OK-TSO	1269	3448	OK-TVW	1366	3360
OK-TSR	1305	3393	OK-TVX	1143	2899
OK-TSS	879	2097	OK-TVY	1215	3579
OK-TST	1142	2860	HA-LKG	1229	2818
OK-TSU	791	1958	OM-TSG	1495	4262
OK-TVF	1160	3324	SP-TVZ	1220	3602
			<b>CELKEM</b>	<b>34825</b>	<b>91119</b>

Nálet registrujeme podle letových hodin neboli času, který letadlo strávilo v provozu nebo podle tzv. cyklů, které představují celkový počet zatěžování komponenty ve všech fázích letu, tedy od spuštění pohonných jednotek až po jejich vypnutí. Pro výpočet spolehlivosti jednotlivých komponent se z hlediska spolehlivostního inženýrství využívají jak cykly, tak letové hodiny. Pro přesnou identifikaci nejméně spolehlivých komponent systému proto uvádím výpočty s využitím cyklů i letových hodin. Celkový počet cyklů a letových hodin je v tabulce zvýrazněn červenou barvou. Další provozní data, která potřebujeme k následné FTA spolehlivostní analýze je počet poruch jednotlivých komponent daného systému ve stejném období, jako je představený nálet. V tomto případě se jedná o počet závad, které vedly k neplánované výměně některého z komponent pneumatického systému. Tabulka 3 tak zobrazuje všechny tyto závady na pneumatickém systému, které vedly k odstavení letounu mimo provoz, dokud nebyla závada odstraněna.



Tabulka 3 – Roční závady ze skupiny ATA 36 (Pneumatický systém)

KOMPONENTA	POČET ZÁVAD	KOMPONENTA	POČET ZÁVAD
Precooler	1	BAR	7
HSR	8	HSV	11
490OS	3	PRSOV	16
450T	4	elektrické vedení	2
Vedení	6	Panel P5-10	3
390PCVS	8	ACAU	2
PCV	22	<b>CELKEM</b>	<b>93</b>

#### 4.2.1 Intenzita poruch komponent pneumatického systému

Výpočet intenzity poruch jednotlivých komponent uvádím pro identifikaci nejméně spolehlivých komponent systému, kterou se budu později zabývat. Existují dva způsoby tohoto výpočtu:

$$\frac{\text{počet závad}}{\text{počet cyklů}} = \lambda(c) \qquad \frac{\text{počet závad}}{\text{počet nalétaných hodin}} = \lambda(t)$$

Tabulka 4 – Intenzita poruch komponent skupiny ATA 36 za použití nalétaných cyklů

KOMPONENTA	INTENZITA PORUCH $\lambda(c)$	KOMPONENTA	INTENZITA PORUCH $\lambda(c)$
Precooler	2,87E-05	BAR	2,01E-04
HSR	2,30E-04	HSV	3,16E-04
490OS	8,61E-05	PRSOV	4,59E-04
450T	1,15E-04	elektrické vedení	5,74E-05
vedení	1,72E-04	Panel P5-10	8,61E-05
390PCVS	2,30E-04	ACAU	5,74E-05
PCV	6,32E-04		

Pro výpočet těchto hodnot intenzity poruch jednotlivých komponent používám vzorec, který je definován jako podíl počtu vzniklých závad na konkrétní komponentě, dělený celkovým počtem nalétaných cyklů nebo hodin. V tabulce 4 se tedy jedná o výsledky za použití nalétaných cyklů a v tabulce 5 za použití letových hodin. Tyto výsledky budu dále porovnávat s hodnotami, které definuje výrobce.

Tabulka 5 - Intenzita poruch komponent skupiny ATA 36 za použití letových hodin

KOMPONENTA	INTENZITA PORUCH $\lambda(t)$	KOMPONENTA	INTENZITA PORUCH $\lambda(t)$
Precooler	1,10E-05	BAR	7,68E-05
HSR	8,78E-05	HSV	1,21E-04
490OS	3,29E-05	PRSOV	1,76E-04
450T	4,39E-05	elektrické vedení	3,29E-05
vedení	6,58E-05	Panel P5-10	2,19E-05
390PCVS	8,78E-05	ACAU	3,29E-05
PCV	2,41E-04		

## **4.2.2 Strom poruchových stavů pneumatického systému**

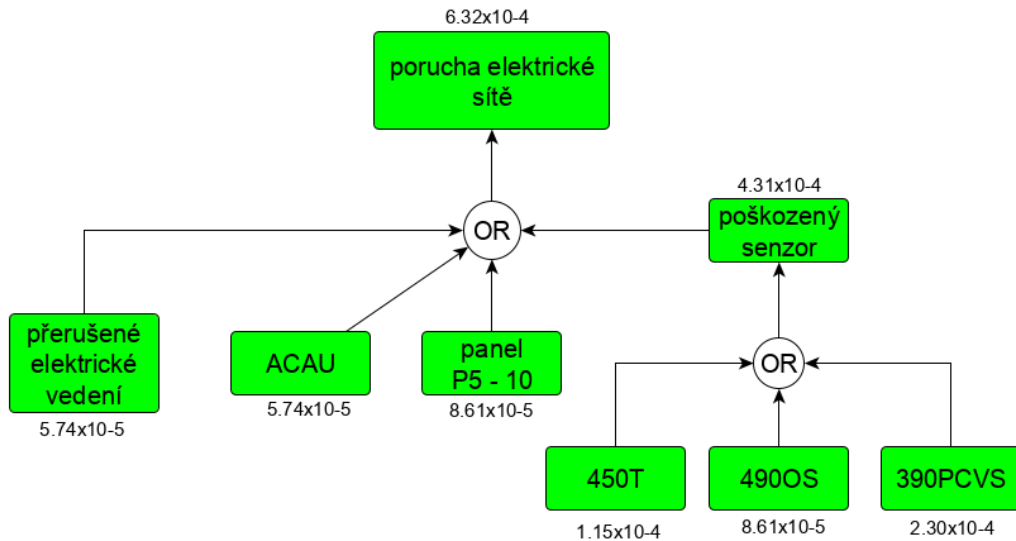
Na základě těchto hodnot můžeme nyní vytvořit strom poruchových stavů a následně spočítat celkovou spolehlivost pneumatického systému v provozu. Z popisu systému již víme, že z hlediska poruchových stavů v systému odběru od pohonné jednotky zde může dojít k poruchám na elektrické síti, která má za úkol ovládání a monitorování stavu systému, nebo k poruchám mechanickým, a to na komponentech, které slouží k regulaci a rozvodu stlačeného vzduchu po letadle.

Tato analýza se vztahuje na komponenty odběrů od pohonné jednotky, které jsou pro provoz letounu nejdůležitější. V této části tak nejsou zmíněny odběry od APU a PGC, neboť z hlediska jejich vysoké spolehlivosti v provozu se tyto části odběru stávají pro tuto práci nedůležité. Vzhledem k rozsáhlosti tohoto diagramu jsem se rozhodl pro zobrazení jen levé části systému tedy část pohonné jednotky 1. Celkový diagram poruchových stavů je k nahlédnutí v příloze 1.

### **4.2.2.1 Poruchové stavy systému**

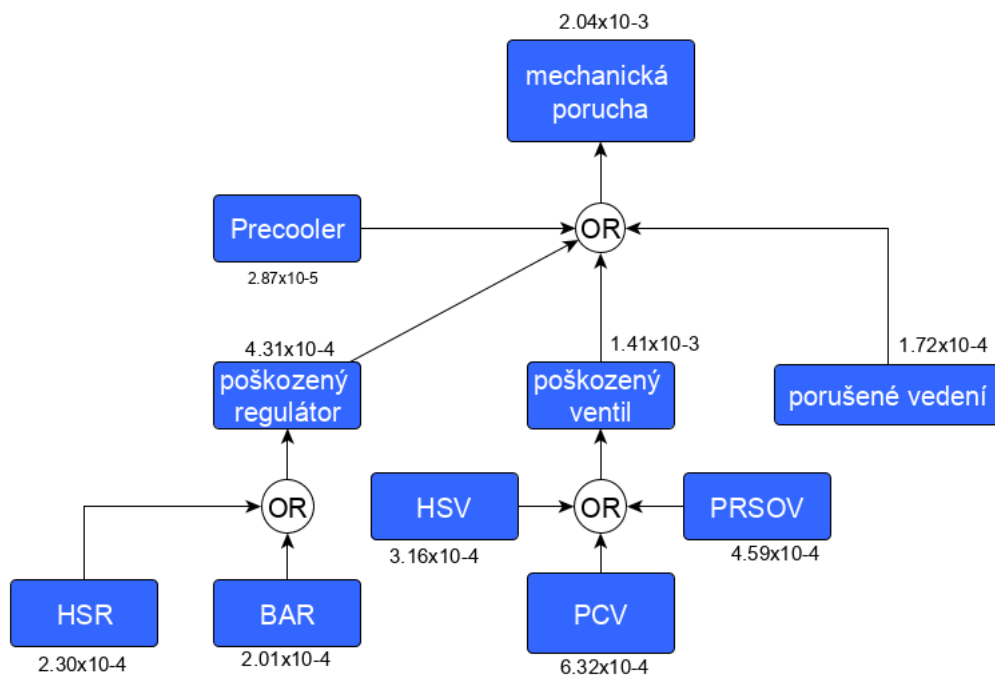
Z technického popisu pneumatického systému vyplývá, že mezi poruchové stavy systému můžeme zařadit elektrické poruchy nebo mechanické poruchy. Mezi poruchy elektrické sítě řadíme poruchy vzniklé na elektrickém vedení, porucha panelu P5-10, porucha na elektronickém bloku ACAU nebo porucha na jednom ze senzorů. Vzhledem k tomu, že správná funkce jednotlivých komponent má přímou návaznost na funkci celého systému, jsou jednotlivé stavy propojeny pomocí symbolu OR, podle kterého následně dopočítáme spolehlivost vyšších poruchových stavů. Na obrázku 15 je zobrazena první část poruchových stavů systému. Spolehlivost jednotlivých komponent a následně i jejich nadřazených skupin je v tomto stromu poruchových stavů doplněna intenzitou poruch koncových prvků, tedy komponent v závislosti na nalétaných cyklech.

Mechanické poruchy systému jsou veškeré poruchy na mechanických komponentech, které mají za úkol správnou regulaci průtoku stlačeného vzduchu v systému. Tyto poruchy mohou být způsobeným poškozeným ventilem, regulátorem nebo porušeným vedením. Vzhledem k celkové koncepci systému jsou i zde jednotlivé komponenty spojeny pomocí symbolu OR. Prakticky to znamená, že v systému chybí jakákoliv záloha při vypovězení správné funkce některého z komponent. Diagram mechanických poruchových stavů je zobrazen na obrázku 16.

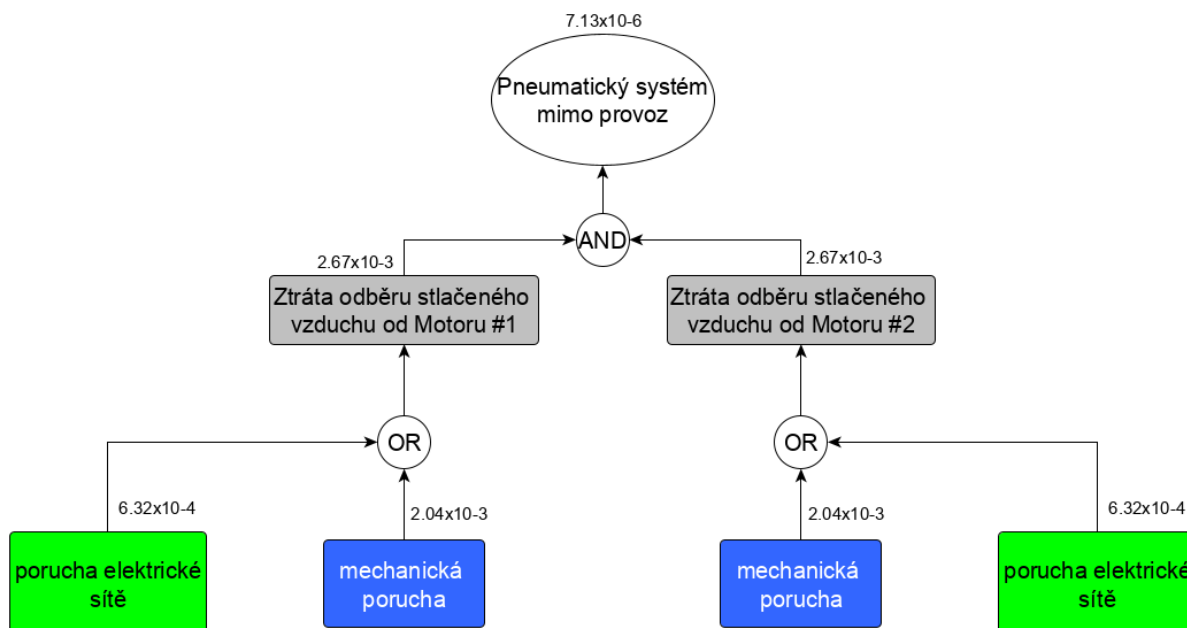


Obrázek 15 - Poruchové stavy elektrické sítě

Zde se již dostáváme na samotný vrchol stromu poruchových stavů. V této části se spojují mechanické poruchy a poruchy elektrické sítě. Vzhledem k tomu, že tyto dva typy poruch jsou na sobě opět zcela závislé, jsou i v této části spojeny symbolem OR. Tyto dvě funkce nám tak ovlivňují funkci odběru stlačeného vzduchu od pohonné jednotky. Systém je zálohován až v nejvyšší části stromu, a to odběrem od druhé pohonné jednotky. Z tohoto důvodu jsou tyto poruchové stavy spojeny symbolem AND. Vrchní část stromu poruchových stavů je zobrazena na obrázku 17.



Obrázek 16 - Poruchové stavy mechanických komponent



Obrázek 17 - Strom poruchových stavů

#### 4.2.3 Identifikace kritických komponent systému

Pro identifikaci nejméně spolehlivých prvků systému využívám výpočet vycházející z metody FTA. Tyto kritické komponenty hledáme mezi koncovými prvky systému, tedy mezi samotnými funkčními komponentami systému. V tomto konkrétním případě jsou to tedy komponenty elektrické sítě a mechanické komponenty. Tabulka 6 zobrazuje definovaný výpočet FTA analýzy. V posledním sloupci tabulky jsou výsledky převedeny na procenta. Ty vyjadřují, o kolik procent vůči původní hodnotě snižují spolehlivost celého systému. Mezi komponenty, které ze získaných provozních dat vykazují nejmenší spolehlivost patří PCV, HSV a PRSOV, které jsou v tabulce zvýrazněny červeně. Pro kontrolu tohoto výpočtu uvádím i tabulku 7, která je počítána pro stejný strom poruchových stavů, ale s hodnotami intenzity poruch, které jsou vypočítány za použití letových hodin. Tento strom poruchových stavů je k nahlédnutí v příloze 2. Porucha těchto tří velmi důležitých komponent má za následek nesprávné funkce odběru stlačeného vzduchu určité větve pohonné jednotky 1 nebo 2. Tyto poruchy mají v provozu za následek vysazení funkce odběru stlačeného vzduchu, nebo vniknutí neregulovaného stlačeného vzduchu do systému, který v mnoha případech následně poruší i další komponenty systému. V těchto poruchových stavech se pak většinou jedná o elektrická čidla nebo senzory, tedy 450T nebo 390PCVS. U mechanických komponent se jedná o HSR. Hodnoty těchto zmíněných komponent také vykazují zvýšené procento ovlivňující spolehlivost pneumatického systému.

Tabulka 6 - Výpočet kritických komponent za použití nalétaných cyklů

UDÁLOSTI	$\lambda(c)$	VÝPOČET													DELTA		
															absolutní	relativní	
<b>ELEKTRICKÉ PORUCHY</b>																	
elektrické vedení	5,74E-05	0	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,61E-03	<b>4,34%</b>	
ACAU	5,74E-05	5,74E-05	0	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,61E-03	<b>4,34%</b>	
Panel P5-10	8,61E-05	5,74E-05	5,74E-05	0	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,58E-03	<b>5,39%</b>	
<b>Senzory</b>																	
4900S	8,61E-05	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	0	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,58E-03	<b>5,39%</b>	
450T	1,11E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	0	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,56E-03	<b>6,32%</b>	
390PCVS	2,30E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	0	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,44E-03	<b>10,65%</b>	
<b>MECHANICKÉ PORUCHY</b>																	
<b>Regulátory</b>																	
HSR	2,30E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	0	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,44E-03	<b>10,65%</b>	
BAR	2,01E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	0	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,47E-03	<b>9,60%</b>	
<b>Ventily</b>																	
PCV	6,32E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	0	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,04E-03	<b>25,39%</b>	
HSV	3,16E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	0	4,59E-04	1,72E-04	2,87E-05	2,35E-03	<b>13,81%</b>	
PRSOV	4,59E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	0	1,72E-04	2,87E-05	2,21E-03	<b>19,07%</b>	
porušené vedení	1,72E-04	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	0	2,87E-05	2,49E-03	<b>8,55%</b>	
Precooler	2,87E-05	5,74E-05	5,74E-05	8,61E-05	8,61E-05	1,11E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,01E-04	6,32E-04	3,16E-04	4,59E-04	1,72E-04	0	2,64E-03	<b>3,28%</b>	

Tabulka 7 - Výpočet kritických komponent za použití letových hodin

UDÁLOSTI	$\lambda(t)$	VÝPOČET														DELTA	
																absolutní	relativní
<b>ELEKTRICKÉ PORUCHY</b>																	
elektrické vedení	2,19E-05	0	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,99E-04	<b>2,08%</b>	
ACAU	2,19E-05	2,19E-05	0	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,99E-04	<b>2,08%</b>	
Panel P5-10	3,29E-05	2,19E-05	2,19E-05	0	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,88E-04	<b>3,16%</b>	
<b>Senzory</b>																	
490OS	3,29E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	0	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,88E-04	<b>3,16%</b>	
450T	4,39E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	0	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,77E-04	<b>4,24%</b>	
390PCVS	8,78E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	0	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,33E-04	<b>8,54%</b>	
<b>MECHANICKÉ PORUCHY</b>																	
<b>Regulátory</b>																	
HSR	8,78E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	0	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,33E-04	<b>8,54%</b>	
BAR	7,68E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	0	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,44E-04	<b>7,46%</b>	
<b>Ventily</b>																	
PCV	2,41E-04	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	0	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	7,80E-04	<b>23,56%</b>	
HSV	1,21E-04	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	0	1,76E-04	6,58E-05	1,10E-05	9,00E-04	<b>11,79%</b>	
PRSOV	1,76E-04	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	0	6,58E-05	1,10E-05	8,45E-04	<b>17,19%</b>	
porušené vedení	6,58E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	0	1,10E-05	9,55E-04	<b>6,38%</b>	
Precooler	1,10E-05	2,19E-05	2,19E-05	3,29E-05	3,29E-05	4,39E-05	8,78E-05	8,78E-05	7,68E-05	2,41E-04	1,21E-04	1,76E-04	6,58E-05	0	1,01E-03	<b>1,01%</b>	

#### 4.2.3.1 Střední doba poruch pneumatického systému

Pro převedení těchto výsledků na hodnoty, které můžeme dále porovnávat s hodnotami které uvádí výrobce, uvádím výpočet tzv. *Mean time to failure* (MTTF), tedy střední dobu mezi poruchami. Tuto hodnotu vypočítáme podle vztahu:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda(t)} [FH]$$

Proměnná  $\lambda(t)$  v tomto vztahu vyjadřuje intenzitu poruch vztaženou k počtu nalétaných hodin. Tabulka 8 zobrazuje výsledky výpočtu MTTF. Tyto výsledky uvádím pouze pro intenzitu poruch v závislosti na letových hodinách. Z těchto výsledků můžeme vidět, že střední doba mezi poruchami jednotlivých komponent se výrazně liší. Červeně zvýrazněné hodnoty jsou hodnoty MTTF citlivých komponent PCV, HSV a PRSOV. Zatímco v ostatních případech se tato střední hodnota mezi poruchami pohybuje vždy přes 10 000 letových hodin *flight hours* (FH), u těchto kritických komponent je i o polovinu nižší. Pro následné zhodnocení a návrh inovativních řešení v údržbě k tomuto systému se proto dále zaměřuji právě na tyto tři komponenty.

Tabulka 8 - Střední doba poruch komponent pneumatického systému

KOMPONENTA	MTTF [FH]	KOMPONENTA	MTTF [FH]
Precooler	90909	BAR	13020
HSR	111389	HSV	8264
490OS	30395	PRSOV	5681
450T	22779	elektrické vedení	30395
vedení	12197	Panel P5-10	45662
390PCVS	11389	ACAU	30395
PCV	4149		

## 5 Návrh inovativního řešení v údržbě pneumatického systému

V této kapitole se zaměřuji na zhodnocení dosažených výsledků, a to z několika pohledů. V první řadě poukazuji na fakt snížené spolehlivosti pneumatického systému ATA 36 a to porovnáním výsledků spolehlivosti komponent z provozu, oproti deklarovaným hodnotám výrobce na základě dosažených výsledků. V další části této kapitoly popisují návrhy inovativních procesů údržby letadla B737NG, které mají za úkol eliminovat větší část náhlých poruch tohoto systému v provozu, vedoucích v důsledku k významným provozním omezením celého letadla. V poslední části se věnuji ekonomickému zhodnocení této problematiky z pohledu provozovatele B737NG.

### 5.1 Vyhodnocení snížené spolehlivosti komponent pneumatického systému

Pneumatický systém na B737NG je bez velkých změn převzatý z předchozí verze B737. Díky použití výkonnějších motorů CFM56 7B je u tohoto typu do pneumatického systému odebírán vzduch s větším tlakem a teplotou než u předchozí verze. Díky těmto zvýšeným hodnotám tak klesá i životnost komponent celého systému. Životnost těchto převážně mechanických komponent je předepsána podle „ON CONDITION“ kritéria. Zkráceně to znamená, že tyto díly není třeba měnit po předepsané době v provozu, ale stačí jejich průběžná kontrola stavu podle předepsaných norem. Vedle tohoto kritéria však výrobce definuje pro každou z komponent i MTTF, tedy střední dobu mezi poruchami.

Hodnoty jsem získal od výrobce těchto komponent, kterým je firma Honeywell. Zaměřil jsem se na nejpoužívanější verzi těchto komponent a porovnal jejich předepsanou MTTF s hodnotami z provozu. Tabulka 9 zobrazuje označení jednotlivých dílů společně s hodnotami definovanými firmou Honeywell. Tato data, jsem získal emailovou komunikací s oddělením technické podpory firmy Honeywell, příloha 3.

Tabulka 9 - MTTF udávané výrobcem Honeywell  
(FH – letové hodiny)

Název komponenty	Výrobní číslo	MTTF (FH)
PRSOV	3214552-5 /-6	12600
HSV	3214446-4	20000
PCV	3289562-6/-7	10650



Tyto identifikované komponenty v pozorovaném roce u společnosti Smartwings způsobily celkem 49 poruch tzn. skoro dvě poruchy na letadlo v jednom roce, které měly za následek provozní neschopnost letounu minimálně na několik hodin. Pokud porovnáme dosažené hodnoty MTTF z provozních dat u těchto kritických komponent zjistíme, že v porovnání s hodnotami od výrobce se pohybujeme ve všech případech na o polovinu nižších hodnotách.

Snížená spolehlivost těchto komponent je způsobena především vývojem celého systému u verze B737NG. Na tento problém firma Honeywell reagovala vývojem nové verze několika komponent. Nejlepším příkladem je ventil PRSOV *part number* (P/N) 3214552-5. Nová verze P/N 3214552-6 však v provozu vykazuje stejnou nebo dokonce nižší spolehlivost než předchozí verze. Důležité je zmínit, že výrobce tyto nové verze inovuje s cílem, zachování poměrově stejné nákupní ceny. V případě, že by výrobce pracoval pouze s myšlenkou zvýšení spolehlivosti, cena komponent by vzrostla minimálně na dvojnásobek. Díky tomuto faktu, se tak výrobce vrátil pouze k produkci verze -5.

V další části představuji řešení z pohledu údržby, která mají za následek snížení počtu neočekávaných závad pneumatického systému v provozu. Tato řešení mají primárně za úkol s předstihem identifikovat závady v systému, které mohou vést k jeho úplnému vysazení. Sekundární úkol je pak návrh na pravidelnou výměnu kritických komponent tohoto systému. Tato řešení tedy rozdělují na dvě části. První řešení popisuje využití dat z letových zapisovačů. Druhé řešení popisuje zavedení pravidelného *health checku*, nebo preventivní výměny komponent, které jsem identifikoval jako nejméně spolehlivé.

### **5.1.1 Sledování technických dat**

Využití technických dat z letových zapisovačů a jejich následné vyhodnocování, je z mého pohledu jedna z nejdůležitějších sekundárních činností, kterou by se měl technický úsek společnosti zabývat. Sledováním a vyhodnocováním těchto dat z jednotlivých systémů jsme schopni včas identifikovat počátky určitých poruch na letadle.

V případě pneumatického systému můžeme u B737NG sledovat teplotu a tlak v systému. Tyto hodnoty následně porovnááme s ideálními hodnotami z technické dokumentace, a to ve všech fázích letu. Díky odchylkám od ideálního průběhu, způsobeného nesprávnou regulací stlačeného vzduchu v systému, můžeme následně odhadnout o jakou komponentu se jedná a zaměřit se tak na ni v následné údržbě. Nesprávná regulace je způsobena nesprávnou funkcí některého z komponent systému. Na následujícím příkladě popisuji jednoduchý postup, při vyhodnocení těchto technických dat.

Příklad:

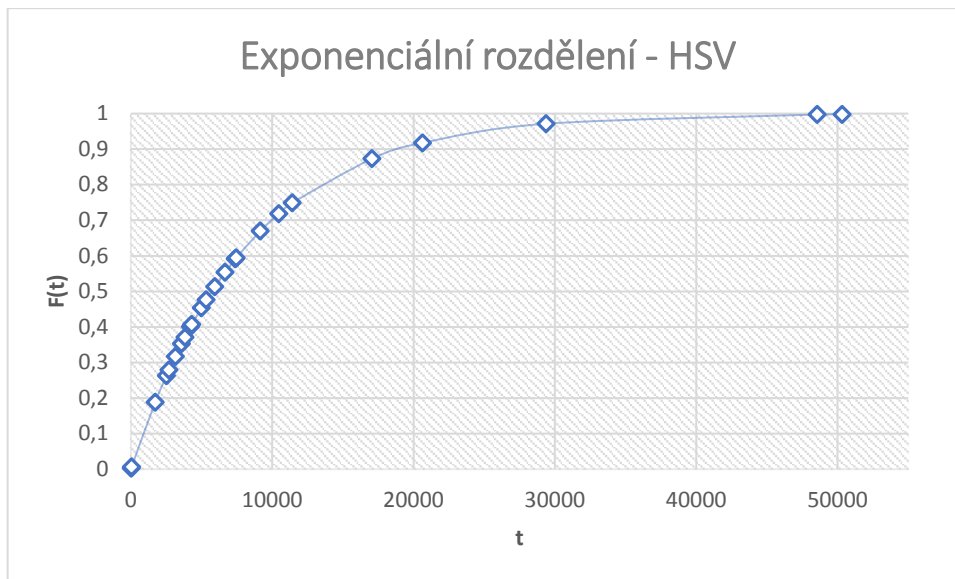
*Pokud ve fázi vzletu, z technických dat vyčteme příliš velký nárůst teploty v systému, která se v pozdější fázi stabilizuje, s velkou pravděpodobností se jedná o nesprávnou funkci ventilu HSV. Jak víme z technického popisu systému, v této fázi, kdy otáčky pohonných jednotek N1 jsou vysoce nad 50 %, systém přechází na odběr od pátého stupně. V takovémto případě se tedy může jednat právě o mechanické přidření pohyblivé klapky ventilu HSV. Ventil tedy v systému stále funguje, ale vykazuje známky poruchy, která může vyústit až k jeho úplnému zaseknutí v jakékoliv poloze. Oddělení inženýringu tak může na první volný prostož tohoto letadla připravit postupy pro údržbu, zaměřenou primárně na komponentu HSV. V případě správné identifikaci ventilu HSV tak mechanik může urychlit tuto prováděnou údržbu i o několik desítek minut.*

Hlavní výhodou tohoto sledování a vyhodnocování technických dat je především předcházení celkovým výpadkům funkce tohoto systému v provozu, která vedou k provozním omezením letadla. Díky takto jednoduchému vyhodnocení těchto dostupných dat, můžeme také dopředu připravit, naplánovat ale i urychlit následnou údržbu. Takto nastavenou údržbu nazýváme „*predictive maintenance*“ tzn údržba, která je schopna předpovídat vznik poruch.

### **5.1.2 Údržba zaměřena na komponenty PRSOV, PCV a HSV**

Z vypracované spolehlivostní analýzy pneumatického systému vychází, že skoro polovinu neplánovaných poruch pneumatického systému způsobí komponenty PRSOV, PCV a HSV. Pokud se zaměříme na hodnoty životnosti, které pro tyto komponenty udává výrobce zjistíme, že se v provozu dostáváme pouze na polovinu těchto hodnot. V této části se tak zaměřuji na vyhodnocení poruch způsobených těmito třemi komponentami.

Z důvodu přesnějších výsledků této části využívám provozní data za období 2 let. Konkrétně se jedná o sledování počtu letových hodin komponent PRSOV, PCV a HSV, které za toto období komponenty strávily v provozu až do své poruchy. Tato provozní data jsou k nahlédnutí v příloze 4. S využitím histogramu zobrazeném na obrázku 18 poruch komponenty HSV jsem určil exponenciální statistické rozdělení. K vyhodnocení těchto dat tedy využívám toto exponenciální rozdělení pravděpodobnosti, které má za cíl vykreslit funkční křivku, která zobrazuje intenzitu poruch komponent. Z této funkce lze vyčíst přesná doba ve které by komponenta měla být v údržbě přezkoumána pomocí *health checku*, nebo vyměněna. To vše, s cílem snížit počet neplánovaných poruch, které mají za následek provozní omezení celého letadla.

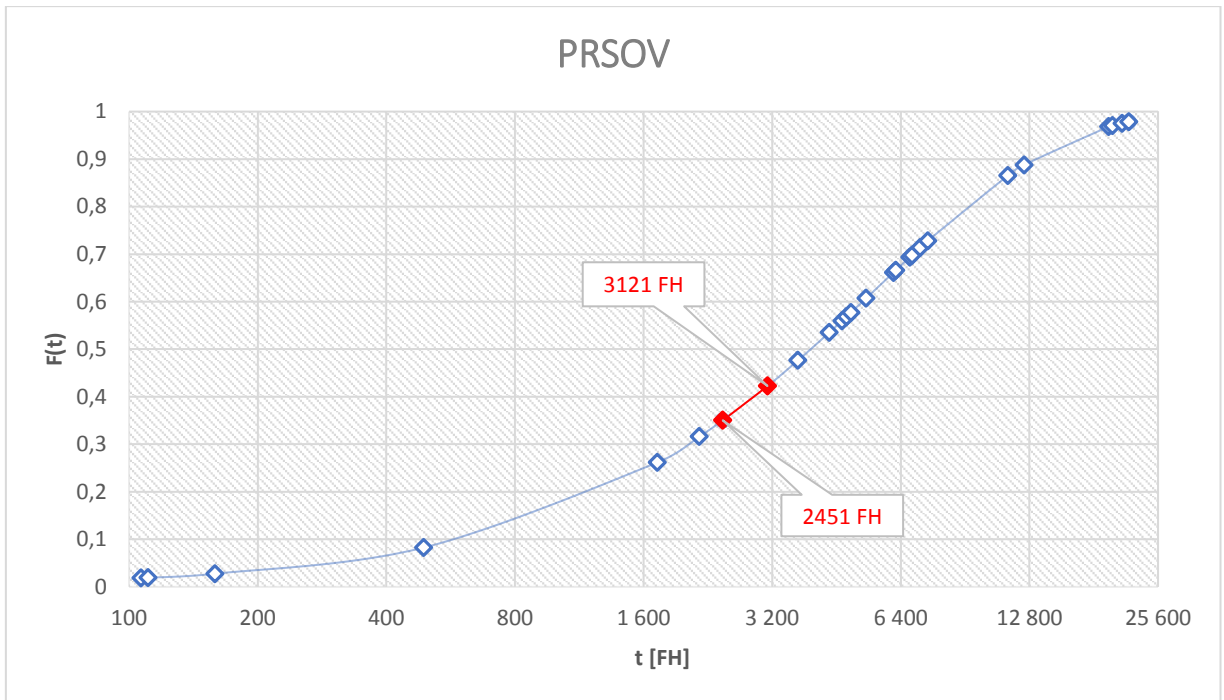


Obrázek 18 - Graf distribuční funkce komponenty HSV

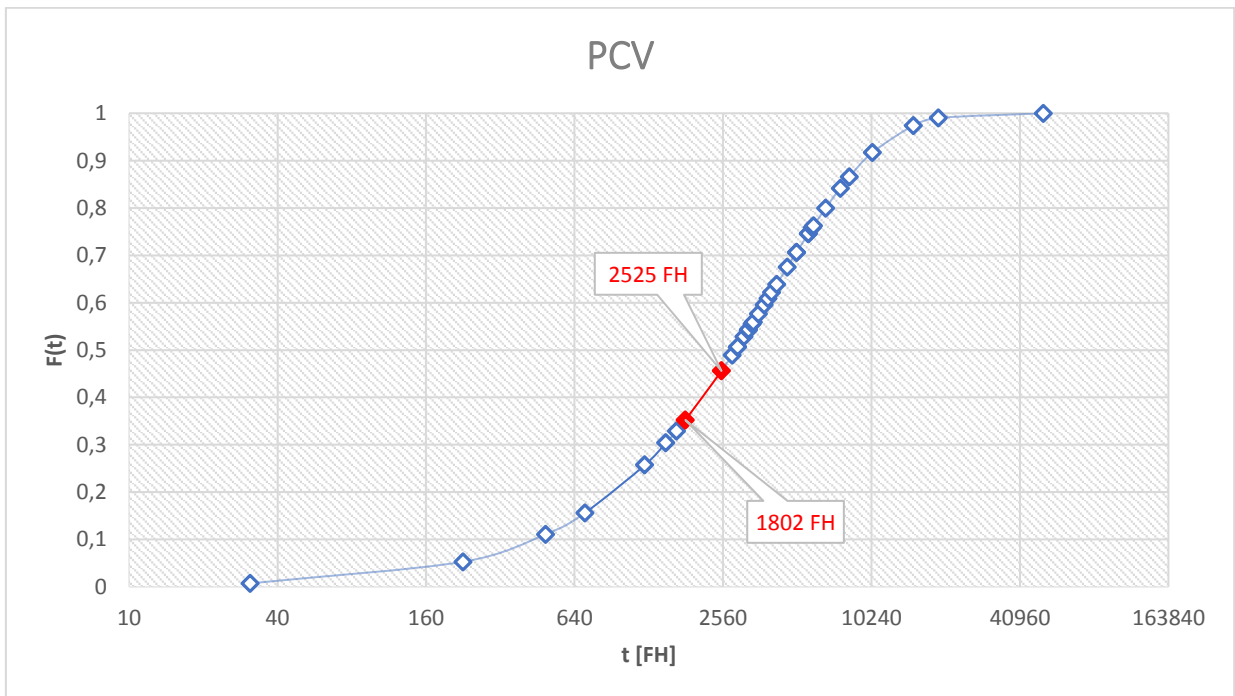
### 5.1.3 Doporučená doba zvýšené údržby

Hlavním cílem této části je na základě tohoto exponenciálního rozdělení nalézt optimální dobu pro všechny tři komponenty, ve které navrhuji tyto díly zkontrolovat, případně vyměnit, pro zvýšení provozní spolehlivosti systému. Následující obrázky 19, 20 a 21 zobrazují exponenciální rozdělení poruch v (logaritickém měřítku) kritických komponent pneumatického systému. Díky zobrazení distribuční funkce v logaritickém měřítku můžeme identifikovat body zlomu, ve kterých tyto komponenty vykazují časté poruchy. Červeně zobrazený interval mezi poruchami vyznačuje místo, kde se intenzita poruch komponenty rapidně zvyšuje.

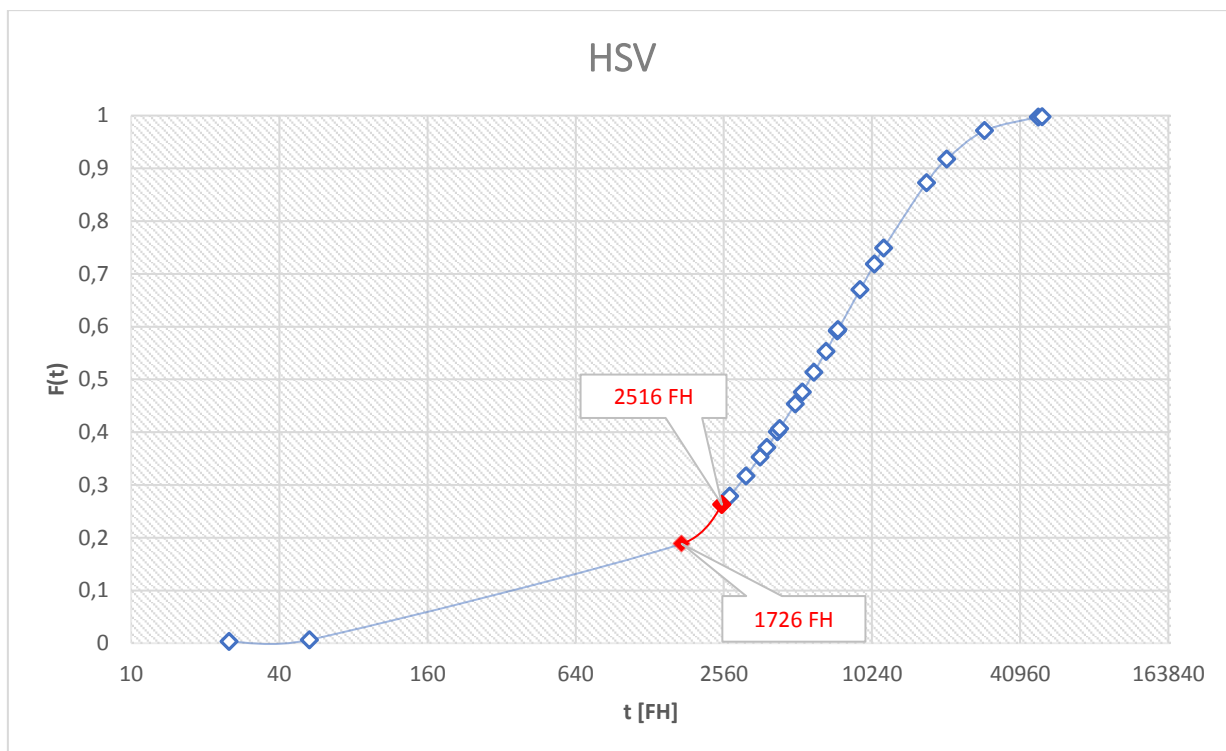
Pokud se zaměříme právě na tyto zvýrazněné intervaly zjistíme, že pokud připustíme poruchy do 2 500 letových hodin, které se pohybují okolo 20 %, můžeme tak významně snížit celkovou poruchovost systému z důvodu vypovězení funkce některého ze tří zmíněných komponent. Poruchy vzniklé do 2 500 letových hodin můžeme u nových komponent považovat za poruchy způsobené například skrytou výrobní vadou. Tyto poruchy mohou být také způsobeny používáním repasovaných komponent nebo komponent, které po svém vyřazení z důvodu nesprávné funkce v provozu prošly pouze inspekční kontrolou a následně byly navraceny provozovateli.



Obrázek 19 – Distribuční funkce exponenciální rozdělení poruch komponenty PRSOV v logaritickém měřítku



Obrázek 20 – Distribuční funkce exponenciální rozdělení poruch komponenty PCV v logaritickém měřítku



Obrázek 21 – Distribuční funkce exponenciální rozdělení poruch komponenty HSV v logaritmicím měřítku

Tyto tři komponenty v původním pozorovaném období způsobily 49 poruch pneumatického systému, které měly za následek neplánovanou výměnu, některé z těchto komponent. Z mého pohledu, je tedy dobré po dosažení 2 500 letových hodin jakéhokoliv z letadel B737NG vyměnit tyto tři komponenty, nebo minimálně provést *health check* systému. Pokud budeme vycházet z dosažených výsledků této části můžeme tak zamezit skoro 80 % případů, kdy systém nečekaně vypoví svou funkci v provozu.

## 5.2 Ekonomické zhodnocení snížené spolehlivosti pneumatického systému

Hlavním cílem této části je jednoduché ekonomické zhodnocení této problematiky pro provozovatele B737NG na základě dostupných informací. Největší náklady spojené s těmito závadami jsou náklady spojené s provozní neschopností letadla, tedy AOG. Tyto náklady porovnávám s odhadnutými náklady v případě snížení počtu AOG, způsobených poruchou některého ze tří komponent o zmíněných 80 %.

Ačkoliv je tato práce vypracována za použití provozních dat společnosti Smartwings, v této části je třeba zachovat obchodní tajemství společnosti, které souvisí s konkrétními provozními náklady. Odhadnuté částky jsou tak převzaty z veřejně dostupných informací ohledně této problematiky.

### **5.2.1 Odhad provozních nákladů AOG pro B737NG**

Provozní náklady na AOG jsou součástí obchodního tajemství každé letecké společnosti. V této části tak vycházím z dat uvedených v článku [16]. Letecká společnost *All Nippon Airways* zde zveřejňuje částky, které společnost utratila při uzemnění 17 letadel typu B787, a to za parkování a údržbu. V tomto případě se tak jedná celkem o 15 milionů amerických dolarů za 90 dnů. Z těchto hodnot nám vychází, že za jedno letadlo je to 882 352 \$ za 90 dnů, tedy 9 800 \$ za den. Podle článku [17] můžeme uvažovat, že náklady na B737NG představují zhruba 75 % nákladů typu B787 dostaneme, že odhadovaná denní částka za AOG B737NG je zhruba 7500 \$, tzn. 312,5 \$ za hodinu.

U této částky je důležité upozornit, že se jedná o odhad, který zahrnuje pouze náklady za skladování a údržbu letadla, jak bylo výše řečeno, vycházející z dostupných informací. Reálná průměrná částka je ve skutečnosti daleko vyšší, neboť může zahrnovat např. tzv. ušlý zisk společnosti, kompenzace cestujícím, parkování na zahraniční bázi atd.

### **5.2.2 Průměrná doba provozní neschopnosti B737NG**

Při výpočtu průměrné doby AOG způsobené těmito konkrétními poruchami, vycházím z konkrétních dat, kterými jsou doba od objednání konkrétního dílu až po jeho doručení. Vzhledem k tomu, že společnost Boeing doporučuje hlavní komponenty skupiny ATA 36 udržovat v údržbě na skladě, zaměřil jsem se na průměr počtu dnů v případě, kdy bylo potřeba urychleného dodání jednoho ze zmíněných komponent, z důvodu aktuálního AOG. Z přílohy 5 tak vychází, že průměrná doba čekání na objednané komponenty v případě AOG způsobeného závadou jednoho z kritických komponent pneumatického systému je 40 hodin.

### **5.2.3 Porovnání dosažených výsledků**

V této části představuji odhad ročních nákladů, které provozovatel letadla B737NG utratí z důvodu vypovězení funkce komponent PRSOV, PCV a HSV. Tuto částku porovnávám s náklady za předpokladu, že se poruchy komponent sníží o 80 %. V případě této optimalizace se však náklady navýší o pravidelnou údržbu po 2 500 hodinách. Vzhledem k tomu, že při této přednastavené údržbě nemusí být identifikována vadná komponenta, nezapočítávám do této rozvahy cenu jednotlivých komponent, tedy náklady na jejich výměnu. Celý odhad vztahuji pouze na náklady, které provozovatel zaplatí, za dobu kterou letadlo stráví na zemi z důvodu své provozní neschopnosti nebo z důvodu optimalizované údržby po 2 500 hodinách.

Tabulka 10 – Odhadované náklady za zvýšenou údržbu pneumatického systému

Počet letadel [ks]	Průměrná doba <i>health checku</i> na letadlo [hodiny]	Průměrná cena (stání a údržba) B737NG [cena za hodinu]	Náklady zvýšené údržby ( <i>health check</i> po 2 500 FH) [1 rok]
28	6	\$ 312,50	<b>\$ 52 500,00</b>

Tabulka 10 zobrazuje odhadované náklady za nastavenou údržbu pneumatického systému po 2 500 hodinách. Odhadované náklady počítám pro flotilu společnosti Smartwings, tedy 28 kusů letadel. Předpokládaná doba *health checku* se v provozu pohybuje okolo 3 hodin na jedné pohonné jednotce. Vzhledem k tomu, že údržba bude prováděna na obou pohonných jednotkách, počítám tak s dvojnásobnou dobou.

V následující tabulce 11 uvádím porovnání odhadovaných nákladů za optimalizovanou údržbu systému, oproti původnímu stavu. V případě, že se podaří snížit počet poruch komponent PRSOV, PCV a HSV podaří se výrazně snížit i dobu, kterou letadlo stráví na zemi z důvodu provozní neschopnosti, a tak i náklady s tím spojené.

Tabulka 11 – Odhadované náklady optimalizované údržby pneumatického systému

Původní stav					
Počet poruch PRSOV, PCV, HSV	Průměrná doba dodání komponenty [hodiny]	Průměrná cena (stání a údržba) B737NG za hodinu	x	Celkové náklady	Rozdíl
49	40	\$ 312,50	x	<b>\$ 612 500,00</b>	x
Předpokládaný stav					
Počet předpokládaných poruch PRSOV, PCV, HSV	Průměrná doba dodání komponenty [hodiny]	Průměrná cena (stání a údržba) B737NG za hodinu	Náklady zvýšené údržby ( <i>health check</i> po 2 500 FH) [1 rok]	Předpokládané celkové náklady	x
10	40	\$ 312,50	<b>\$ 52 500,00</b>	<b>\$ 177 500,00</b>	<b>\$ 435 000,00</b>

### 5.3 Vyhodnocení celkového řešení

Hlavním cílem této kapitoly bylo ukázat nová řešení z pohledu údržby k pneumatickému systému B737NG. Výhodou sledování technických dat letových zapisovačů a zavedení inovativních řešení v údržbě pneumatického systému je především včasná identifikace poruchových stavů tohoto systému. Vedle doporučeného sledování technických dat je to pak v první řadě nastavení zvýšené údržby komponent PRSOV, HSV a PCV po dosažení 2 500 letových hodin v provozu. Pravidelně nastaveným *health checkem* systému po této době strávené v provozu je tak možno předcházet celkovým výpadkům funkce celého systému,

které vedou k provozním omezením letadla. Z tabulky 11 je zřejmé, že provozovatel B737NG ušetří výrazné náklady spojené především s provozní neschopností letadla. Na základě těchto výsledků bych tento postup doporučil všem provozovatelům tohoto typu letadla.



## 6 Závěr

Účelem této práce je poukázat na častou poruchovost pneumatického systému v provozu na letadle Boeing 737 NG a následně poukázat na postupy, kterými je možné tyto poruchy eliminovat nebo alespoň výrazně redukovat. Poruchovost tohoto systému je způsobena především převzetím celého konceptu pneumatického systému z předchozí verze letadla typu Boeing 737. Díky většímu zatěžování tohoto systému výkonnějšími pohonnými jednotkami verze B737NG tak dochází k snižování deklarované životnosti především mechanických komponent systému. Cílem této práce bylo analyzovat spolehlivost celého systému a pro jeho nejméně spolehlivé komponenty vytvořit inovativní návrh přístupu údržby, který má za úkol včasné identifikovat jejich poruchové stavy. Hlavním cílem práce bylo navrhnout způsoby, snížit provozní náklady spojené s neplánovaným provozním omezením letadla, na základě této nově nastavené údržby.

Mezi fakta limitující přesnější výsledky této práce patří především nedostatek ekonomických provozních dat, na základě kterých by se dalo přesněji určit ekonomické zhodnocení této problematiky. Teoretická i praktická část je postavena na dostupných technických provozních datech společnosti Smartwings, se kterými se při ještě detailnějším pojetí této problematiky dá podrobněji pracovat. V ekonomickém zhodnocení této problematiky, pracuji s odhadovanými daty, na základě dostupných informací. Vzhledem k citlivosti konkrétních dat, které jsou předmětem obchodního tajemství každého leteckého dopravce je obtížné dopracovat se k přesným výsledkům spojeným s touto problematikou.

Na základě výsledků této práce věřím, že takto nově nastavená údržba u provozovatelů letadla B737NG by v budoucnu mohla ušetřit jak provozní náklady, tak čas potřebný k údržbě pneumatického systému. Pravidelná údržba systému spojená s důkladnějším vyhodnocováním technických dat z letových zapisovačů je dle mého názoru správný směr, kterým by se údržba letadel měla vydávat. Nové typy dopravních letadel jsou schopny předávat informace o stavu svých jednotlivých systémů, a to i v reálném čase. *Predictive maintenance*, tedy údržba schopná předpovídat poruchové stavy systémů letadla, může v budoucnu ušetřit jak mnoho času, které letadlo stráví v údržbě, tak i s tím spojené náklady na provoz. Z mého pohledu je do budoucna velice důležité, aby provozovatelé letadel investovali svůj čas i finance do tohoto nového přístupu k údržbě, a tím učinili celou leteckou dopravu bezpečnější a efektivnější.

## Seznam použité literatury

- [1] PRUŠA, Jiří. *Svět letecké dopravy*. 2007. Praha: Galileo CEE Service ČR, 2007. ISBN 978-80-239-9206-9.
- [2] ŽEŽULA, Jiří. Provoz a údržba letadel. *Flying Revue* [online]. 2019, **2019**(2), 1 [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.flying-revue.cz/provoz-a-udrzba-letadel>
- [3] EASA, *Nařízení komise (ES) č. 2042/2003 o zachování letové způsobilosti letadel a leteckých výrobků, letadlových částí a zařízení a schvalování organizací a personálu zapojených do těchto úkolů*, . In: . Praha: ÚCL, 2003, ročník 2003, 2042/2003.
- [4] O Společnosti Smartwings. *Smartwings.com* [online]. Praha: Smartwings, 2020 [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.smartwings.com/o-smartwings>
- [5] *Annual Reliability Report: OASES MRO systems, B737NG - Technical Reliability Report*. Praha, 2018.
- [6] NĚMEČEK, Václav. *Civilní letadla: dopravní letadla s turbovrtulovými a proudovými motory*. Praha: NADAS, 1981.
- [7] BOEING. *Boeing Maintenance Manual: B737NG 600/700/800/900*. 2018.
- [8] SOEMANTORO, Raska Rayhan. *Internship Report: Engine Bleed Air Problem Evaluation on Boeing 737-800 Aircraft*. Indonesia, 2018.
- [9] BOEING. *MMEL Master Minimum Equipment List B737NG 600/700/800/900*. 2010.
- [10] ARLOW, Jim a Ila NEUSTADT. *UML 2 a unifikovaný proces vývoje aplikací: objektově orientovaná analýza a návrh prakticky*. 2., aktualiz. a dopl. vyd. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1503-9.
- [11] BIROLINI, Alessandro. *Reliability Engineering: Theory and practice*. 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-05409-3. ISBN 978-3-662-05409-3.
- [12] VESELÝ, W.E. *Fault tree handbook*. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission, 1981.

- [13] Fault Tree Analysis. *Weidbull.com* [online]. [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.weibull.com/basics/fault-tree/index.htm>
- [14] STAMATIS, D. H. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee, Wisc: ASQC Quality Press, 1995.
- [15] Failure Mode and Effect Analysis ( FMEA ) and Failure Modes, Effects and Criticality Analysis ( FMECA ). *Weidbull: The weibull.com reliability engineering resource website is a service of HBM Prencsia*. [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.weibull.com/basics/fmea.html>
- [16] TOPHAM, James. ANA counts cost of grounded 787, not yet seeking damages. *Reuters* [online]. [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-boeing-dreamliner-ana-january/ana-counts-cost-of-grounded-787-not-yet-seeking-damages-idUSBRE90U06T20130131>
- [17] How much does it cost to ground a B737 max aircraft for an airline?. *AVIATION: Stack exchange* [online]. 2019 [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/64393/how-much-does-it-cost-to-ground-a-b737-max-aircraft-for-an-airline>