



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Technické aspekty flotily letadel s dlouhým stáním
Technical Aspects of Long Grounded Aircraft Fleet

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Letecká doprava

Vedoucí práce: Ing. Oldřich Štumbauer

doc. Ing. Andrej Lališ, Ph.D.

Valeriya Menshenina

Praha 2023



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Valeriya Menshenina

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Technické aspekty flotily letadel s dlouhým stáním**

Název tématu (anglicky): Technical Aspects of Long Grounded Aircraft Fleet

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je identifikovat vliv dlouhého stání na flotilu letadel z pohledu spolehlivosti jejich systémů a komponentů.
- Analyzujte provozní aspekty dlouhého stání letadlových flotil.
- Vyberte letadlový systém, který bude podroben analýze.
- Proveďte spolehlivostní analýzu vybraného letadlového systému.
- Identifikujte vliv dlouhého stání na vybraný letadlový systém z pohledu spolehlivosti a navrhnete provozní opatření k omezení tohoto vlivu.
- Navržené řešení vyhodnoťte a ověřte.



- 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: Aerospace Recommended Practice ARP4754A. Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. SAE International, 2017.
A. Birolini. Reliability Engineering. Theory and Practice. Springer, 2017.

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

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
(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: **7. srpna 2023**
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



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Valeriya Menshenina
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 1. prosince 2022



Abstrakt

Předmětem bakalářské práce *Technické aspekty flotily letadel s dlouhým stáním* je spolehlivostní analýza jednoho nebo několika letadlových systémů za účelem stanovení dopadů dlouhého stání na spolehlivost letadlových systémů a komponentů. Motivací pro tuto práci se stalo odstavení flotil letadel z důvodu celosvětové pandemie onemocnění covid-19. Cílem dané práce je identifikovat vliv dlouhého stání na flotilu letadel z pohledu spolehlivosti jejich systémů a komponentů. Na základě výsledků by měla být navržena opatření pro zmírnění vlivu dlouhého stání. První část bude věnována popisu provozních aspektů letadlových flotil s dlouhým stáním. Další části budou zaměřeny na třídění a vyhodnocení provozních dat pro identifikaci letadlového systému, který bude následně podroben analýze. Potom bude vybrána a provedena spolehlivostní analýza pro zjištění dopadů dlouhého stání z hlediska spolehlivosti. Jako výsledek bude stanoven vliv odstavení letadel na spolehlivost jejich systémů a komponentů.

Klíčová slova: Dlouhé stání, FTA, provozní opatření, spolehlivost, spolehlivostní analýza, údržba letadel.



Abstract

The subject of the bachelor thesis Technical Aspects of Long Grounded Aircraft Fleet is the reliability analysis of one or several aircraft systems in order to determine the effects of long standing on the reliability of aircraft systems and components. The motivation for this work was the shutdown of aircraft fleets due to the covid - 19 pandemic. Based on the result, measures should be proposed to mitigate the impact of long standstill. The first part will be devoted to the description of the operational aspects of long standing fleets. The next sections will focus on the classification and evaluation of operational data to identify the aircraft system, which will then be analysed. Then, a reliability analysis will be selected and performed to identify the impacts of long standing from a reliability perspective. As a result, the impact of aircraft shutdown on the reliability of its systems and components will be determined.

Keywords: Aircraft maintenance, FTA, long term standing, operational measures, reliability, reliability analysis.



Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli informace a své zkušenosti pro vyhotovení této práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Oldřichu Štumbauerovi za odborné vedení, konzultování a za rady, které mi poskytoval během studia. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Pavlovi Hovorkovi za pomoc, rady a zkušenosti, jež se mnou sdílel při tvorbě práce. V neposlední řadě s úctou a upřímností děkuji své rodině, zejména rodičům a babičce za morální a materiální podporu.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Technické aspekty flotily letadel s dlouhým stáním* vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Praze dne 7. srpna 2023

.....

Podpis



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM GRAFŮ	12
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	13
ÚVOD	15
LETECKÁ DOPRAVA A PANDEMIE ONEMOCNĚNÍ COVID-19	15
1. SPOLEHLIVOST LETADLOVÉ TECHNIKY	16
1.1. ZÁKLADNÍ POJMY SPOLEHLIVOSTI	16
1.2. DRUHY SPOLEHLIVOSTI	20
1.3. METODY HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI	21
1.3.1. <i>Analýza stromu poruchových stavů FTA</i>	21
1.3.2. <i>Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA</i>	24
2. ÚDRŽBA, UDRŽOVATELNOST.....	27
2.1. ÚDRŽBA LETECKÉ TECHNIKY	27
2.2. PROGRAMY ÚDRŽBY LETADEL.....	28
2.3. PŘEDPISY PRO ÚDRŽBU	30
3. DOPAD PANDEMIE ONEMOCNĚNÍ COVID-19 NA OSOBNÍ LETECKOU DOPRAVU	31
3.1. POSTUPY PARKOVÁNÍ A SKLADOVÁNÍ LETADEL.....	32
3.2. VOLBA PARKOVACÍHO MÍSTA	33
3.3. REAKCE LETECKÝCH DOPRAVCŮ NA KRIZI	34
3.4. DOPAD KRIZE ZPŮSOBENÉ PANDEMIÍ ONEMOCNĚNÍ COVID-19 NA SLOŽENÍ FLOTIL.....	35
4. IDENTIFIKACE PROBLÉMOVÉHO SYSTÉMU.....	38
4.1. HYDRAULICKÝ SYSTÉM.....	41
4.2. TECHNICKÝ POPIS	41
4.3. PORUCHA HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU	44
5. SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZA	44
5.1. INTENZITA PORUCH KOMPONENTŮ HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU	46
5.2. ANALÝZA STROMU PORUCHOVÝCH STAVŮ FTA HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU.....	48
6. IDENTIFIKACE VLIVU DLOUHÉHO STÁNÍ.....	53



6.1.	VÝPOČET STŘEDNÍ DOBY DO VZNIKU PORUCH HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU	53
6.2.	IDENTIFIKACE VLIVU DLOUHÉHO STÁNÍ NA HYDRAULICKÝ SYSTÉM Z POHLEDU SPOLEHLIVOSTI	54
6.3.	PROVOZNÍ OPATŘENÍ	56
DISKUZE		58
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		63
PŘÍLOHY		67



Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Prvky systému spojené operátorem OR [12]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2 Prvky systému spojené operátorem AND [13].....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3 Příklad výsledné tabulky FMEA analýzy [15].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4 Hydraulický systém letounu B737 NG [26].....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 5 Strom poruchových stavů hlavního hydraulického systému letounu B737 NG.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 6 Strom poruchových stavů FTA záložního hydraulického systému.....</i>	<i>52</i>



Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Příпустné pravděpodobnosti výskytu poruchových stavů [5]</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 2 Základní značky pro tvorbu FTA [11]</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 3 Počet závad na jednotlivých systémech.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 4 Intenzita poruch komponentů hydraulického systému letadla</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 5 Výpočet parametru MTTF.....</i>	<i>54</i>



Seznam grafů

<i>Graf 1 Počty cestujících v letech 2020-21-22 oproti roku 2019 [23]</i>	<i>34</i>
<i>Graf 2 Počet cestujících přepravených leteckou dopravou mezi lety 1945 a 2020 [23]</i>	<i>35</i>
<i>Graf 3 Pokles počtů letů narrow – body letadel od ledna do dubna 2020 [24]</i>	<i>36</i>
<i>Graf 4 Pokles počtů letů wide – body letadel od ledna do dubna 2020 [24]</i>	<i>37</i>
<i>Graf 5 Pokles počtů letů regionálních letadel od ledna do dubna 2020 [24]</i>	<i>38</i>



Seznam použitých zkratk

AMM	Aircraft Maintenance Manual	Příručka pro údržbu letadel
AOG	Aircraft On Ground	Technicky neschopné letadlo
APU	Auxiliary Power Unit	Pomocná motorová jednotka
ATA	Air Transport Association	Sdružení leteckých dopravců
CAMO	Continuing airworthiness management organization	Organizace pro řízení zachování letové způsobilosti
CMM	Component Maintenance Manual	Příručka pro údržbu letadlového celku
CRS	Certificate of Release to Service	Osvědčení o uvedení do provozu
EASA	European Union Aviation Safety Agency	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví
EDP	Engine - Driven Pump	Čerpadlo poháněné motorem
ETA	Event Tree Analysis	Analýza stromu událostí
FH	Flight Hour	Letová hodina
FIM	Fault Isolation Manual	Příručka pro odstarňování poruch
FIN	Functional Item Number	Funkční číslo položky
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis	Analýza způsobů a důsledků poruch
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis	Analýza způsobů a důsledků poruch a kritičnosti
FTA	Failure Tree Analysis	Analýzy stromu poruchových stavů
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní sdružení pro leteckou dopravu
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
MMEL	Master Minimum Equipment List	Seznam minimálního vybavení
MRO	Maintenance, Repair, Overhaul	Údržba, oprava, generální oprava
MTTF	Mean Time To Failure	Střední doba do poruchy
OEM	Original Equipment Manufacturer	Výrobce originálního vybavení
P/N	Part Number	Číslo komponenty
RPN	Risk Priority Number	Hodnocení rizika podle priority



SRM	Structure Repair Manual	Příručka pro opravy konstrukce
SSM	System Schematic Manual	Příručka schémat letadla
USD	United States Dollar	Americký dollar
WDM	Wiring Diagram Manuals	Příručky schémat zapojení



Úvod

Letecká doprava, která je celosvětově velmi důležitým odvětvím, zažila s příchodem onemocnění covid-19 největší krizi ve své stoleté historii. Pravidelnost letů, bezpečnost a ekonomická výkonnost letecké dopravy, které jsou do značné míry určovány spolehlivostí flotily letadel, byly ohroženy snižováním počtu letů, poklesem poptávky po letecké dopravě a odstavením leteckých flotil na dobu neurčitou. Otázka spolehlivosti byla však palčivá vždy, což je způsobeno několika faktory. Tím zásadním je neustálé zdokonalování letecké techniky, při kterém jsou moderní letadla stále častěji vybavena složitými systémy a jednotkami skládajícími se z velkého množství prvků, bloků a celků. Nedostatečná spolehlivost snižuje úroveň provozuschopnosti a následně i připravenost letadel k letu, což způsobuje snížení efektivity jejich využití a zvýšení provozních nákladů.

Letecká doprava a pandemie onemocnění covid-19

Pandemie onemocnění covid-19 byla způsobena šířením koronaviru SARS-CoV-2. Výskyt viru byl poprvé zaznamenán v čínském městě Wuhan v prosinci 2019. Dne 30. ledna 2020 vyhlásila Světová zdravotnická organizace epidemii za ohrožení veřejného zdraví mezinárodního významu a 11. března téhož roku za pandemii. K 14. listopadu 2021 bylo celosvětově hlášeno více než 253 milionů případů.

Pandemie koronavirové infekce měla ničivý dopad mj. na letecký průmysl po celém světě, protože již na konci března a v dubnu 2020 byla zastavena téměř veškerá letecká doprava. Bezmála všechny pravidelné mezinárodní lety byly pozastaveny a několik zemí zavedlo též zákaz vnitrostátní letecké dopravy ve snaze omezit šíření onemocnění covid-19. Řada zemí zorganizovala pro své občany pobývajících v zahraničí repatriační lety, ty však byly v porovnání s běžným objemem letecké dopravy velmi omezené. Příchod pandemie onemocnění covid-19 přiměl letecké společnosti k tomu, aby kladly ještě větší důraz na složení a optimalizaci svých flotil než doposud.

Téma bakalářské práce bylo zvoleno proto, že v důsledku pandemie onemocnění covid-19 došlo k plošnému odstavení velké části flotil dopravních letadel. Toto dlouhé stání mohlo mj. způsobit snížení spolehlivosti některých komponentů v systémech a následně i systémů dopravních letadel, což by posléze mohlo přinést omezení provozuschopnosti flotil při zpětném uvedení letadel do provozu. Zmíněné snížení spolehlivosti by se mohlo projevit zejména



neočekávanými poruchami technických systémů před zahájením provozu, což by následně mělo negativní vliv na bezpečnost letecké dopravy.

Cílem práce je identifikovat vliv dlouhodobého stání na flotilu letadel z pohledu spolehlivosti jejich systémů a komponentů. V první části bakalářské práce bude provedena analýza provozních aspektů dlouhodobého stání letadlových flotil. V následujících částech bude vybrán letadlový systém nebo letadlové systémy a provedena jejich spolehlivostní analýza. Na základě výsledků analýzy bude identifikován vliv dlouhého stání na vybraný letadlový systém z pohledu spolehlivosti a navržena provozní opatření k omezení tohoto vlivu.

Fundamentem bakalářské práce je však především **bezpečnost** a **spolehlivost** letadel. V následujících částech budou podrobně popsány jednotlivé vlastnosti spolehlivosti, včetně bezpečnosti.

1. Spolehlivost letadlové techniky

Spolehlivost letadlové techniky se definuje jako schopnost letadla a/nebo jeho součástí (konstrukce, zařízení, motorů atd.) plnit stanovené funkce při zachování výkonnosti v předepsaných mezích odpovídajících způsobům a podmínkám použití, údržby, oprav, skladování a přepravy. [1] Vědecké principy, metody a techniky zajišťování spolehlivosti letecké techniky jsou rozvíjeny teorií spolehlivosti, jejímiž základy jsou teorie pravděpodobnosti a matematická statistika, vědecké metody zkoumání funkce a zatížení výrobků, jejich pevnosti a také nauka o materiálech. Praktickým základem spolehlivosti jsou inženýrské metody navrhování, zkoušení, výroby a provozu letecké techniky.

1.1. Základní pojmy spolehlivosti

Spolehlivost (Reliability) je schopnost objektu zachovávat v čase v předepsaných mezích všechny parametry, které zajišťují plnění požadovaných funkcí za daných provozních podmínek. [2]

Teorie spolehlivosti zohledňuje následující zobecněné objekty:



- **Prvek** je nejjednodušší složka výrobku. [3]
- **System** je soubor společně fungujících prvků určených k nezávislému plnění určitých funkcí. Pojem prvku a systému lze transformovat v závislosti na daném úkolu. [3]
- **Výrobek** je výrobní jednotka vyrobená daným podnikem; výrobky se dělí na neopravitelné, které spotřebitel nemůže opravit a musí je nahradit, a opravitelné, které umožňují opravy při plnění svých funkcí. [3]

Spolehlivost je charakterizována následujícími základními stavy a událostmi:

- **Provozní schopnost** (Up State) je stav výrobku, při němž je schopen normálně plnit stanovené funkce. [3]
- **Poruchový stav** (Faulty State) je stav výrobku, při němž nesplňuje alespoň jeden z požadavků technické dokumentace. Rozlišují se závady, které nevedou k poruše, a závady, které vedou k poruše. [3]

Porucha je jedním z nejdůležitějších jevů, kterými se spolehlivost zabývá. Tento jev a jeho studium jsou pro spolehlivost zásadní a k analýze a hodnocení spolehlivosti se používá rozsáhlý systém kategorizace poruch z různých hledisek. [3]

- **Porucha** (Failure) je událost spočívající v úplné nebo částečné ztrátě schopnosti objektu vykonávat požadovanou funkci. Příčiny selhání se dělí na náhodné a systematické. [3]

Druhy poruchových stavů: [4]

- Bez vlivu na bezpečnost – Poruchové stavy, které nemají vliv na bezpečnost (tj. poruchové stavy, které nemají vliv na provozní způsobilost letadla a nezvyšují zatížení posádky).
- Nezávažné (Minor) – Poruchové stavy, které významně neohrožují bezpečnost letadla a zahrnují činnosti posádky, jež nevyžadují velké úsilí. Mezi nezávažné poruchy patří například:
 - mírné snížení bezpečnostních limitů nebo funkčnosti,
 - mírné zvýšení pracovní zátěže posádky (běžná změna letového plánu) nebo určité nepohodlí posádky.
- Závažné (Major) – Poruchové stavy snižující schopnost letounu nebo posádky zvládat nepříznivé provozní podmínky v takové míře, že by mohlo dojít například:
 - k významnému snížení rezerv bezpečnosti nebo funkčních schopností,
 - k významnému zvětšení pracovního zatížení posádky nebo k podmínkám



zhoršujícím výkonost posádky nebo vedoucím ke značnému nepohodlí osob na palubě;

- v závažných případech k velkému snížení rezerv bezpečnosti nebo funkčních schopností, popřípadě k takovému zvýšení pracovního zatížení a fyzické tísní, pro které nelze spoléhat na přesné a úplné plnění úkolů posádkou nebo které bude mít nepříznivé účinky na osoby na palubě.
- Katastrofické (Catastrophic) – Poruchové stavy bránící bezpečnému dokončení letu a přistání.

V souladu s požadavky předpisů musí být zajištěno, aby katastrofické poruchy byly krajně nepravděpodobné. Pravděpodobnost jejich výskytu by se měla rovnat nule nebo být zanedbatelně malá, aby závažné poruchy byly nepravděpodobné. To znamená, že by četnost jejich vzniku měla být velmi malá, zatímco nezávažné poruchy smí být pravděpodobné, tedy smí se občas objevovat. [4] [5] Přípustné pravděpodobnosti výskytu poruchových stavů jsou popsány v tabulce 1.

Druh poruchového stavu	Pravděpodobnost výskytu	Přípustné pravděpodobnostní nastoupení poruchy za 1 letovou hodinu	Popis
Nezávažné (Minor)	Můžou být pravděpodobné (probable)	$> 10^{-5}$	Předpokládá se, že k tomuto jevu může dojít jednou nebo vícekrát během technického života letadla.
Závažné (Major)	Musí být vzácné (remote) nebo nepravděpodobné (improbable)	$10^{-5} - 10^{-9}$	Požaduje se, aby se tento jev pravděpodobně nevyskytoval po celou dobu technické životnosti letadla. U všech vyrobených a provozovaných letadel daného typu se však závada může vyskytnout několikrát.
Katastrofické (Catastrophic)	Musí být krajně nepravděpodobné. (extremely improbable)	$< 10^{-9}$	Je požadováno, aby tento jev pravděpodobně nenastal během technického života všech vyrobených a provozovaných letadel daného typu.

Tabulka 1 Přípustné pravděpodobnosti výskytu poruchových stavů [5]



Spolehlivost je charakterizována vlastnostmi, které se projevují při používání a vypovídají o tom, jak dobře výrobek splňuje očekávání výrobců a spotřebitelů.

Podívejme se na tyto vlastnosti výrobků z hlediska spolehlivosti.

- **Bezpečnost** (Safety) je vlastnost objektu spočívající ve snížení rizika při plnění požadované funkce na přijatelnou úroveň. Jedná se o rizika ohrožení lidského zdraví a života, životního prostředí nebo poškození majetku. [6]
- **Bezporuchovost** (Reliability) je vlastnost, která spočívá ve schopnosti nepřetržitého provozu po určitou dobu nebo dobu běhu. [3]
- **Životnost** (Durability) je schopnost výrobku zůstat funkční po dlouhou dobu až do mezního stavu při zavedeném systému údržby a oprav. U nenahraditelných výrobků se pojmy životnost a bezporuchovost prakticky shodují. [3]
- **Pohotovost** (Availability) je naplněna za předpokladu, že jsou zajištěny všechny požadované prostředky a objekt může vykonávat požadovanou funkci v daných podmínkách a daném časovém okamžiku. [6]
- **Udržovatelnost** (Maintainability) vyjadřuje schopnost zařízení v daných podmínkách používání setrvat ve stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v souladu s předepsaným časovým plánem v předepsaném rozsahu. [2]. Udržovatelnost je vlastnost objektu vyjádřená pravděpodobností, že preventivní údržba nebo oprava položky bude provedena ve stanoveném časovém intervalu při daných postupech a zdrojích (úroveň kvalifikace personálu, náhradní díly, zkušební zařízení atd.). [4]
- **Zajištěnost údržby** (Maintenance Support) je určitá schopnost organizace, která poskytuje údržbářské služby, zajistit podle požadavků údržbu objektu za daných podmínek a potřebnými prostředky. [2]
- **Diagnostikovatelnost** spočívá ve schopnosti zařízení využít diagnostických přístrojů (vestavěných i samostatných) a metod pro sledování, zjištění a lokalizaci poruchových stavů a degradačních změn provozních parametrů. [2]

U mnoha výrobků budou určujícími vlastnostmi bezporuchovost a životnost, charakterizovaná schopností výrobku být v daném čase provozuschopný a zároveň udržovatelnost a opravitelnost. Úroveň provozuschopnosti je kvantitativně vyjádřena pravděpodobností bezporuchové práce na jeden let, střední dobou poruch, intenzitou poruch, střední dobou opravy a střední dobou mezi poruchami. Životnost se hodnotí podle různých hodnot zdrojů z hlediska počtu letů nebo celkové doby provozu výrobku, podle provozních cyklů a doby



životního cyklu výrobku. Skutečná úroveň spolehlivosti (bezporuchovost nebo odolnost proti poruchám) závisí především na dokonalosti konstrukčních metod, stabilitě technologických postupů, designu výrobku a vlastnostech materiálů, které jsou dány obecnou úrovní vývoje vědy a techniky a výrobními možnostmi. [1]

1.2. Druhy spolehlivosti

Termín spolehlivost se často používá s různými atributy, čímž vznikají i nové pojmy, které nejsou v současných terminologických normách definovány. Z toho důvodu bude v dané práci vysvětlen význam tří pojmů důležitých pro inženýrskou praxi: [8]

- Inherentní spolehlivost je takzvaná vestavěná spolehlivost, která je do objektu zabudována při jeho návrhu a výrobě. Nezohledňuje však účinky, jimž je objekt vystaven v důsledku provozních podmínek, podmínek prostředí, v důsledku postupů údržby a lidského faktoru.
- Provozní spolehlivost zohledňuje vlivy provozních a jiných podmínek.
- Odhadovaná nebo předpokládaná spolehlivost je taková vlastnost objektu, jež je výsledkem analýz, výpočtů a různorodých prognóz spolehlivosti. Výsledek je založen na použitých metodách posuzování, použitém modelu výpočtu spolehlivosti systému a schopnostech a dovednostech analytika provádějícího posuzování.

Spolehlivost hraje důležitou roli při stanovení požadavků na údržbu výrobků a výrobních zařízení. Nezbytným předpokladem pro celkovou obnovu výrobního zařízení a pro optimalizaci preventivní údržby je znalost spolehlivosti. Ukazatele spolehlivosti jsou měřítkem výkonnosti a efektivity údržby. [2]

Východiskem pro řešení otázky spolehlivosti je vyjádření kritéria snížení spolehlivosti při provádění požadovaných funkcí, tj. při vzniku poruchy. Má-li být spolehlivost kvantifikována, musí být zvoleny kvantitativní míry, tedy ukazatele pro každou specifikovanou dílčí vlastnost, a zařízení musí být rozdělena na neopravitelná (neopravená) a opravitelná (opravená) [2].



1.3. Metody hodnocení spolehlivosti

V této kapitole se budu zabývat obecným popisem metod analýzy spolehlivosti. Prediktivní analýza spolehlivosti a bezpečnosti slouží k prověřování a předpovídání spolehlivosti, dostupnosti, udržovatelnosti, bezporuchovosti a bezpečnosti systému. Analýza spolehlivosti a bezpečnosti se provádí především ve fázi definování koncepce a požadavků a ve fázi návrhu a vývoje, a to především za účelem posouzení, zda byly splněny stanovené požadavky. Analýza spolehlivosti a bezpečnosti systému je proces získávání, zkoumání a uspořádání informací, které jsou specifické a relevantní pro daný systém a jsou nezbytné pro rozhodování o něm a jeho stanovených cílech. Podle této charakteristiky je hlavním účelem systémové analýzy získat informace o systému. Analýza se musí řídit jasně definovanými pravidly a postupy, aby byl proces analýzy opakovatelný a vedl vždy ke stejným výsledkům (dvě nezávisle provedené analýzy téhož systému nemohou vést ke vzájemně protichůdným výsledkům). [9]

Pro určitý případ je třeba zvolit vhodnou analýzu, která umožňuje modelovat a vyhodnocovat problémy spolehlivosti v široké oblasti, provádět přímé, systematické, kvalitativní a kvantitativní analýzy a také předpovídat číselné hodnoty ukazatelů spolehlivosti. Žádná metoda není dostatečně vyčerpávající, aby zpracovala všechny modely konkrétního systému. V současné praxi se k provádění analýz spolehlivosti a bezpečnosti používají mimo jiné tyto metody: analýza stromu poruchových stavů FTA (Failure Tree Analysis), analýza způsobů a důsledků poruch FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMECA (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis), analýza stromu událostí ETA (Event Tree Analysis), Markovovy metody a další.

1.3.1. Analýza stromu poruchových stavů FTA


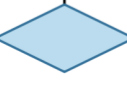


Technika analýzy stromu poruchových stavů FTA byla vyvinuta a poprvé použita společností Bell Telephone Laboratories, a to pro vývoj letectví ve Spojených státech amerických. Později byl koncept dané metody převzat společností Boeing, která ho využívá dodnes a díky níž byl zdokonalen. Metoda stromu poruchových stavů se začala poměrně rychle používat především v takových inženýrských oborech, v nichž předmětem analýzy byly systémy se složitou strukturou. [10]

Metoda analýzy stromu poruchových stavů patří mezi analytické techniky hodnocení spolehlivosti. Svým charakterem je deduktivní metodou, což znamená, že analýza začíná vrcholovou událostí, která je předmětem analýzy, a poté přechází k jednotlivým prvkům nižší úrovně, jež buď přímo způsobily vrcholovou událost, nebo se podílely na jejím vzniku. [10] [11]

Strom poruch

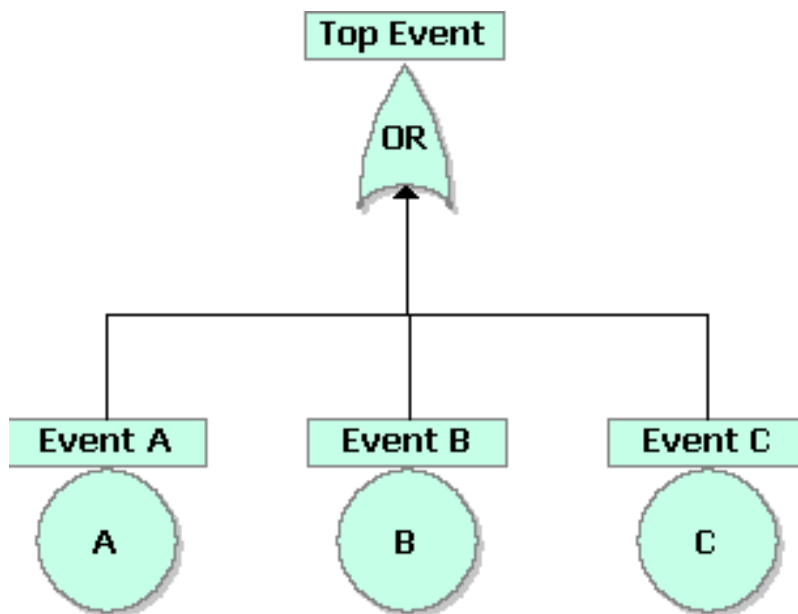
Strom poruch je grafickým znázorněním a výsledkem analýzy stromu poruchových jevů. Strom poruch vypadá jako logický diagram, který zobrazuje logické přechody od vrcholového jevu k potenciálním příčinám vzniku centrální události. Pokud byl strom sestaven správně, ukazuje pak všechny možné kombinace poruch prvků, a můžeme tedy předvídat poruchové stavy, které mohou mít za následek selhání celého systému. [10] [11]

Účelem analýzy příčin vrcholové události je identifikovat všechny události, které by mohly být přímo nuntými nebo postačujícími podmínkami pro vznik této vrcholové události. Výsledek této analýzy je znázorněn pomocí grafických značek, kde logický vztah mezi událostí a jejími bezprostředními příčinami je vyjádřen prostřednictvím tzv. hradel nebo operátorů. Seznam značek nejčastěji používaných při tvorbě stromu poruch je uveden v tabulce 1.

Značka	Název	Popis
	Vrcholová událost	Blok, do něhož vstupují jiné prvky, ale z něho nevystupují žádné
	Mezilehlá událost	Blok, do něhož vstupují jiné prvky a taky z něho nevystupují
	Nerozvíjená událost	Blok, jenž reprezentuje část systému, která doposud nebyla rozvíjena.
	Základní událost	Blok, jenž reprezentuje událost nejnižší úrovně, která vyvolává prvotní selhání. Většinou je k dispozici pravděpodobnost selhání
	Hradlo OR	K selhání výstupního prvku stačí selhání jednoho ze vstupních prvků
	Hradlo AND	K selhání výstupního prvku musí dojít k selhání všech prvků systému na vstupu

Tabulka 2 Základní značky pro tvorbu FTA [11]

Všechny komponenty systému jsou mezi sebou nejčastěji spojeny logickými operatory OR nebo AND. Každý prvek má přiřazenou pravděpodobnost, která vyjadřuje jeho spolehlivost.



Obrázek 1 Prvky systému spojené operátorem OR [12]

V případě, že jsou mezi sebou prvky A, B, C spojeny operátorem OR (viz obrázek 1), pravděpodobnost selhání vrcholového prvku se spočítá jako součet nespolehlivostí vstupních prvků, tedy:

$$A + B + C = \text{Vrcholový prvek}$$

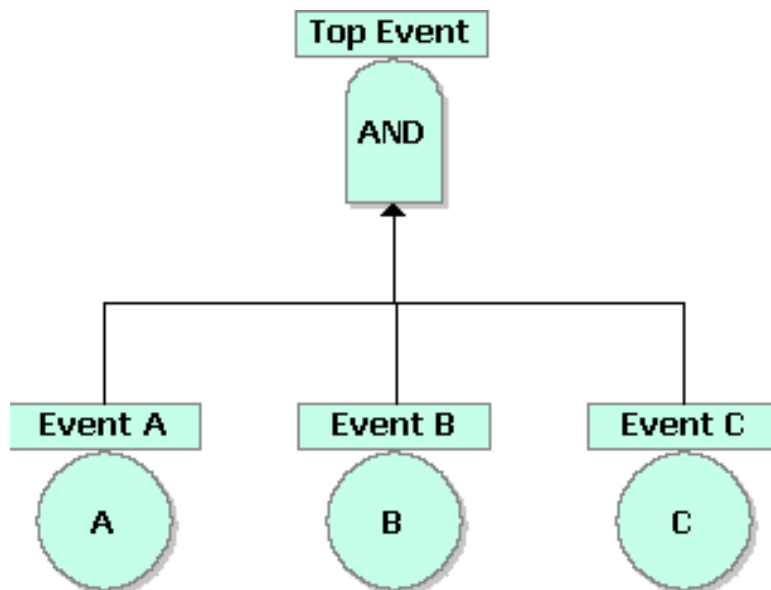
Nespolehlivost vrcholového prvku v daném případě bude vyšší, jelikož k jeho selhání stačí selhání jednoho ze vstupních prvků. [11]

Operátor AND je obvykle použit na ty části systému, v nichž musí selhat všechny vstupní prvky, aby došlo k selhání prvku na výstupu.

Pokud jsou prvky na vstupu spojeny operátorem AND (viz obrázek 2), nespolehlivost vrcholového prvku bude spočítána jako součin nespolehlivostí vstupních prvků A, B, C, tedy:

$$A \times B \times C = \text{Vrcholový prvek}$$

Nespolehlivost výstupního prvku bude v tomto případě nižší z toho důvodu, že nejdříve musí dojít k selhání všech prvků systému na vstupu, aby selhal prvek na výstupu. [11]



Obrázek 2 Prvky systému spojené operátorem AND [13]

Finálním krokem analýzy je výpočet parametrů nespolehlivosti pomocí řešení logických rovnic, které byly sestaveny díky stromu poruch, a zjištění nespolehlivosti systémů a podsystémů. Tento výpočet představuje přepočítávání celkové nespolehlivosti systému ve stromu poruch. Provádí se tak, že se každé koncové součásti systému postupně přiřadí nulová hodnota a poté se přepočítá celková nespolehlivost celého stromu. Podle nejvyšší vypočtené nespolehlivosti z těchto výsledků určíme komponenty, které potom mají největší vliv na celkovou spolehlivost systému.

1.3.2. Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA

Analýza způsobů a důsledků poruch nazývaná FMEA byla vyvinuta kvůli problémům se zajištěním spolehlivosti, a to zejména u nových a nebývale složitých technických systémů, jejichž selhání mohlo mít katastrofické následky. Daný nástroj je preventivní metodou hodnocení spolehlivosti sloužící ke včasné identifikaci způsobů poruch, jejich příčin a důsledků na spolehlivost jednotlivých prvků systému a na bezpečnost a kvalitu systému jako celku.

Podle charakteru analýzy se jedná o induktivní metodu, která je na rozdíl od analýzy stromu poruchových stavů provedena od nejnižší definované úrovně, tedy od jednotlivých prvků systému a jejich charakteristik. FMEA klasifikuje typy a důsledky poruch podle jejich



závažnosti, aby bylo možné určit příčiny. Jedná se o strukturovanou, systematickou a kvalitativní analýzu, která se používá k identifikaci potenciálních způsobů poruch a poskytuje informace vedoucí ke snížení rizika potenciálních způsobů poruch. Ke znázornění výsledků analýzy je obvykle používána tabulka zahrnující zpravidla tyto sloupce:

- název komponentu,
- funkce komponentu,
- způsob selhání,
- příčiny selhání,
- dopad selhání na celkovou funkci systému,
- opatření ke zmírnění tohoto následku.

Tvorba FMEA analýzy [14]

1) Shromažďování údajů

V prvním kroku provádění analýzy způsobů a důsledků poruch musí být získána potřebná data, informace a podklady k provedení analýzy a vybrána rozlišovací úroveň, tedy nejnižší úroveň systému, která je předmětem analýzy. Informace musí být kvalitní a v dostačujícím množství, aby byla spolehlivostní analýza provedena co nejpřesněji.

2) Stanovení poruchových stavů, jejich příčin a důsledků

Poté, co byly identifikovány funkce jednotlivých komponentů systému, musí být pro každý prvek stanoveny i poruchové stavy. Dalším krokem je identifikace příčin poruchových stavů. Ke každému poruchovému stavu je možné přiřadit alespoň jednu příčinu.

Po přiřazení všech poruchových stavů ke všem prvkům a všech příčin ke všem poruchovým stavům následuje krok identifikace vlivu neboli efektu poruchového stavu. Existují celkem tři úrovně efektů poruchového stavu, tedy lokální efekt, efekt další úrovně a finální systémový efekt.

3) Hodnocení rizika poruchových stavů

Jedná se o tzv. RPNs (Risk Priority Numbers). Tato čísla jsou vždy tři pro každý poruchový stav jednotlivých prvků. RPN je vyjádřeno jako součin hodnot všech tří složek, a to závažnosti efektu poruchy (Severity), četnosti výskytu poruchy (Occurence) a možnosti detekce poruchy



(Detection). RPNs se počítají podle uvedeného vzorce. Hodnoty se pohybují od 1 do 10, kde zjednodušeně řečeno 1 vyjadřuje hodnotu *nejlepší*, 10 vyjadřuje hodnotu *nejhorší*.

$$\text{RPN} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection}$$

Výsledky parametru RPN jsou ve finále použity pro identifikaci rizik selhání, tedy pro stanovení priority pro následné řešení opatření k zabránění efektů poruch.

4) Stanovení opatření

Na základě výsledných hodnot RPN je možné stanovit postup, který by předcházel výskytu poruch nebo minimalizoval následky výskytu poruchy. Nelze se však soustředit na výsledky parametru RPN jako na jediný rozhodující prvek.

Item/Function Predmet analýzy	Potential failure mode Možná chyba	Potential effect(s) of failure Možné následky chyby	Číslo příčiny /chyby	Legislativny predpis	Potential cause(s) of failure Možná příčina chyby	Súčasný stav					Recommend d action(s) Doporučené nápravné opatrenia
						Current design controls Plánovanie kontrolného opatrenia	Occurrence Pravdepodo bnosť výskytu možnej chyby	Severity Význam chyby	Detection Pravdepod obnosť odhalenia chyby	Risk priority number Miera rizika RPN	
Sedadlová konštrukcia	Zlomenie kovovej časti konštrukcie	Lom	1	/	Vysoké zataženie	Kontrolný prepočet maximálnej záťaže	3	7	10	210	Vykonať skúšky spoľahlivosti
			2	/	Špatný materiál - hrúbka	Testovanie materiálu a profilu konštrukcie	2	7	9	126	Vykonať skúšky spoľahlivosti a kontrolu vstupných polovýrobov
			3	/	Zlé zvary v konštrukcii	Kontrola zvarov	1	4	8	32	Preskúšanie zváračov
		Prasklina	4	/	Únava materiálu	Prepočet dlhodobého zataženia materiálu	1	4	8	32	Vykonať skúšky dlhodobého zatažovania
	Prethnutie plastových výstuží	Trhlina vo výstuži	5	/	Nedostatoč né zvary	Kontrola zvarovacieh o zariadenia	2	6	9	108	Nastavenie zariadenia na plastové zvary
	Porušenie spojenia konštrukcie sedadla a drevenej konštrukcie kresla.	Nestabilita sedacej časti	6	/	Nesprávna montáž spojovacích častí	Revízia návodu na montáž pre zákazníka a upozorneni e v ňom	2	8	9	144	Prepracovanie návodu na montáž pre koncového zákazníka
		Porušenie spoju	7	/	Zlomenie spojovacích o šróbu	Prepočet nostnosti hrubších spojovacích šróbov v balení	7	8	9	504	Dodávanie hrubších spojovacích šróbov

Obrázek 3 Příklad výsledné tabulky FMEA analýzy [15]



2. Údržba, udržovatelnost

Údržba je kombinace všech technických, administrativních a manažerských opatření během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci. [7]

Údržba definuje soubor činností prováděných na produktu za účelem udržení nebo obnovení provozuschopného stavu. Údržba se tedy skládá z preventivní údržby, která se provádí za účelem omezení poruch způsobených opotřebením, a z údržby po poruše, jež se provádí při výskytu poruchy a jejímž cílem je uvést výrobek do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Preventivní údržba by měla být rovněž zaměřena na odhalování a odstraňování skrytých poruch a závad (např. nezjištěných poruch redundantních součástí). Nápravná údržba, známá také jako oprava, zahrnuje detekci, lokalizaci, opravu a kontrolu. [4]

Udržovatelnost je definována jako schopnost objektu za daných provozních podmínek zůstat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, pokud je údržba prováděna za stanovených podmínek a jsou použity stanovené postupy a prostředky. Udržovatelnost musí být zabudována do komplexních zařízení a systémů během návrhu a vývoje prostřednictvím implementace koncepce údržby. Udržovatelnost dosažená v praxi však do značné míry závisí na zdrojích dostupných pro údržbu a na správné instalaci zařízení nebo systému, tj. na logistické podpoře a dostupnosti. [4]

2.1. Údržba letecké techniky

Havárie může mít za následek oběti na životech a mnohamilionové finanční ztráty pro leteckou společnost. Z tohoto důvodu je v letecké dopravě vyvíjen velký tlak na to, aby se pravděpodobnost výskytu těchto rizik snížila na nejnižší možnou míru. To platí pro všechny oblasti přímo či nepřímo související s provozem letadel. Jednou z nejdůležitějších oblastí letecké dopravy je řádná údržba letadel, která vede ke snížení rizik spojených se stavem letadlového parku. Jedním z prioritních cílů je zvýšit bezpečnost letecké dopravy.

Údržba civilních letadel je soubor činností potřebných k udržení letové způsobilosti letadla a součástí letadla po celou dobu jeho životnosti. Zahrnuje prohlídky letadla, výměnu jeho dílů, součástí a jednotek, odstraňování závad, jakož i provádění úprav letadla nebo jeho oprav.



Cílem údržby je zajistit, aby letadlo bylo vždy v dobrém technickém stavu a připraveno k letu. Správná a řádná údržba letadla jako celku je jedním ze základních faktorů bezpečnosti letu.

Každé letadlo má jakýsi pas – osvědčení letové způsobilosti (Certificate of Airworthiness), základní dokument, který osvědčuje letadlo schopné provozu. Tento certifikát je příslušným státním úřadem vydán a prodlužován ve chvíli, kdy provozovatel předloží mimo jiné doklady o zajištění předepsané údržby letadla. Zajistit toto osvědčení je úkolem organizace k údržbě letové způsobilosti. CAMO vypracovává program údržby, který schvalují letecké úřady.

Hlavním úkolem organizace CAMO je udržovat letovou způsobilost letadel, ovšem tato činnost zahrnuje i řízení příslušných kontrol a vedení související dokumentace v souladu s předpisy EASA.

Organizace CAMO musí plnit následující povinnosti: [16]

- zabezpečit základní letovou způsobilost provozovaných letadel;
- provádět průběžné prohlídky všech letadel a jejich letadlových celků v souladu s požadavky příslušných leteckých úřadů;
- těsně spolupracovat se všemi servisními organizacemi;
- odpovídat za zajištění kvality a všech dokumentů týkajících se letové způsobilosti.

Organizaci údržby může zajišťovat oddělení letecké společnosti nebo nezávislá organizace údržby, tzv. organizace MRO (Maintenance Repair Overhaul). Toto oddělení provádí potřebné práce přímo na letounu a poté vydá osvědčení o uvolnění do provozu (CRS – Certificate of Release to Service). Letadlo nelze provozovat bez platného CRS. [16]

2.2. Programy údržby letadel

Celkový postup údržby se značně liší v závislosti na složitosti letadla a prostředí, pro které bylo navrženo a ve kterém je provozováno. Pro správně zvolený program je rozhodující předpokládané denní nebo roční využití letadla, vyjádřené jako poměr letových hodin a cyklů. Jednotlivé předepsané práce a kontroly jsou sdruženy do větších skupin (tzv. checků), které zohledňují i praktická hlediska (např. při příležitosti rozebrání či odkrytování určité části letadla



provedení i činností, které by sice mohly být provedeny později, ovšem za cenu opětovného rozebrání dané části letounu). Výsledkem je kompletní program údržby letadla.

- **Traťová údržba** (Line Maintenance) – Tento typ lehké údržby zahrnuje zejména předepsané vizuální prohlídky, které se mají provádět denně anebo maximálně týdně. Daný proces vyžaduje minimum speciálního vybavení a může být proveden i na venkovní stojánce. Trvá desítky minut až maximálně několik hodin a může jej provádět jeden kvalifikovaný mechanik nebo tým více mechaniků v závislosti na velikosti letadla. Traťová údržba zahrnuje také kontroly během turnaroundu. [17]
- **Střední údržba** (často označovaná A – check, případně B – check) – Střední údržba zahrnuje již podrobnější prohlídky, a to po dosažení předepsaného počtu letových hodin. Práce vyžaduje zpravidla vyšší počet kvalifikovaných techniků, provádí se v hangáru a trvá několik hodin až jednotek dnů. Rozlišujeme zpravidla více stupňů dané údržby, označovaných např. 1A/2A/3A, a to z toho důvodu, že různé letadlové celky mají různé termíny prohlídek, které korespondují s různými násobky doby mezi A-checky. [17]
- **Těžká údržba** (typicky C – check) – Tento typ údržby může mít několik úrovní. Daný program údržby se provádí typicky v intervalu 18–24 měsíců a sdružuje servisní úkony, u kterých by byla, případně v nejbližším čase bude, vyčerpána maximální povolená doba mezi výměnami anebo kontrolou daných letadlových celků. Těžká údržba již vyžaduje demontáž velkých a významných částí letadla, a proto je nutné, aby ji prováděla kvalifikovaná údržbařská organizace disponující speciálními prostředky v náležitě vybaveném hangáru. C-check trvá většinou od týdne do několika týdnů v závislosti na typu letadla, a to zejména kvůli velkému rozsahu práce. [17]
- **Generální oprava** – Tato oprava je nejvyšším stupněm těžké údržby a obvykle se označuje jako D – check. Při daném programu údržby je letadlo téměř kompletně rozebráno a všechny části jsou zkontrolovány, případně vyměněny. Je také ideální příležitostí k modernizaci letadlových celků a prvků, které byly pro daný typ vyvinuty poté, co bylo letadlo vyrobeno. Generální oprava se obvykle provádí každých 4 až 6 let. D – check je hodně náročný jak z časového hlediska, tak i z hlediska finančních nákladů. Je prováděn speciální údržbovou organizací, případně přímo výrobcem letadla. [17]



2.3. Předpisy pro údržbu

Dokumenty používané při údržbě letadel jsou součástí pokynů pro zachování letové způsobilosti. Následující dokumenty se používají k udržování letové způsobilosti letadel. Každý výrobce vydává vlastní dokumenty s vlastními názvy. [18] [19]

Aircraft Maintenance Manual (AMM – Příručka pro údržbu letadel) – Tato příručka obsahuje informace potřebné k servisu, opravám, výměně, seřízení, prohlídce a kontrole vybavení a systémů letadla, které se obvykle provádějí na rampě nebo v hangáru pro údržbu.

Fault Isolation Manual (FIM – Příručka pro odstraňování poruch) – Tato příručka poskytuje informace potřebné pro odstraňování poruch.

Structure Repair Manual (SRM – Příručka pro opravy konstrukce) – SRM obsahuje informace o přípustných mezích poškození, identifikaci materiálu pro konstrukci podléhající opravě v provozu, informace o typických opravách, které se obecně vztahují na konstrukční součásti letounu, u nichž je největší pravděpodobnost poškození.

System Schematic Manual (SSM – Příručka schémat letadla) – Tato příručka uvádí schémata elektrických instalací s dostatečnými údaji pro identifikaci poruch letadla.

Wiring Diagram Manuals (WDM – Příručky schémat zapojení) – Tato příručka uvádí stav položek vybavení, částečného vybavení a související elektroinstalace. Uvádí P/N vztahující se k danému FIN a typ kabelu pro dané číslo kabelu.

Component Maintenance Manual (CMM – Příručka pro údržbu letadlového celku) – Příručka obsahuje údaje o údržbě letadlového celku v dílně. Neobsahuje údaje o údržbě komponentu při jeho zástavbě do letadla.

Master Minimum Equipment List (MMEL – Seznam minimálního vybavení) – Jedná se o hlavní seznam položek letadla, které mohou být za určitých podmínek nefunkční, aniž by to mělo vliv na bezpečnost letu.

MMEL je stanoven výrobcem letadla a schválen národním leteckým úřadem. Cílem tohoto dokumentu je podrobně popsat, jaké vybavení a zařízení může být nefunkční, aniž by byla ohrožena bezpečnost provozu.



3. Dopad pandemie onemocnění covid-19 na osobní leteckou dopravu

Každá společnost se v průběhu své existence potýká s různými typy rizik, která komplikují její fungování. Jak ukázal rok 2020, epidemiologické riziko může být jedním z nejnebezpečnějších rizik, se kterým se doposud nepočítalo. Opatření zavedená v boji proti šíření onemocnění covid-19 poškodila společnostmi napříč odvětvími a letectví patřilo k těm nejvíce zasaženým. Pandemie zasáhla výrazně i letecké společnosti. Karanténa a zákaz mezinárodní osobní dopravy je připravily o hlavní zdroj příjmů, donutily je zmrazit provoz a, v lepším případě, žít z rezerv, které si během let nashromáždily, aby se vyhnuly bankrotu.

Pandemie onemocnění covid-19 způsobila otřesy v nabídce cestovního ruchu a osobní letecké dopravy i poptávce po nich a ovlivnila tak globální ekonomiku. Pandemie postihla mnoho společností. Země po celém světě přijaly v zájmu omezení možného šíření viru opatření jako je izolace, uzavření hranic, karanténa a omezení cestování. Pojmy *karanténa*, *samoizolace* a *sociální distance* se dostaly do každodenního slovníku lidí žijících v různých zemích a regionech.

Výrazné snížení poptávky po službách cestovního ruchu a zavedení přísných hygienických omezení mělo negativní dopad na výkonnost leteckých společností. Ještě předtím, než bylo onemocnění covid-19 prohlášeno za mezinárodní mimořádnou situaci, byla ve městě Wuhan, původním epicentru viru, a později i v dalších oblastech Číny vyhlášena karanténa [21]. V důsledku toho byly hranice země uzavřeny pro civilní letectví. Další zemí, která přijala podobná opatření v souvislosti s rychlým šířením viru, byla Itálie. Postupem času byla karanténa vyhlášena téměř po celém světě, kvůli čemuž musela většina světové populace změnit svůj sociální a ekonomický styl života a průmysl civilního letectví utrpěl značné ztráty.

Krise způsobená pandemií onemocnění covid-19 postihla všechny letecké společnosti na světě bez výjimky. Letečtí dopravci se proto museli uchýlit k drastickým opatřením jako je snižování počtu letadel ve flotile, odstavení letadel, propouštění, omezování letů, optimalizace letů a jiné, aby krizi způsobenou koronavirem přečkali a nebankrotovali.



3.1. Postupy parkování a skladování letadel

Postupy údržby závisí na době, po kterou je letadlo odstaveno. Výrobci původního vybavení používají při označování stavu zaparkovaného letadla různou terminologií, a přestože technické důsledky jsou podobné, ne-li totožné, terminologie není nutně harmonizována v celém odvětví. Provozovatel se může setkat s termíny jako je parkování, imobilizace, prodloužené parkování, aktivované skladování, krátkodobé skladování, prodloužené a dlouhodobé skladování, hluboké skladování atd. Ačkoli různí výrobci OEM (Original Equipment Manufacturer) mohou užívat různé termíny označující typ odstavení letadla, kdy letadlo nevykonává let, obecně můžeme rozlišovat následující: [22]

- **Normální parkování (Normal Parking)**

Letadlo je na zemi mezi lety nebo údržbou po dobu, která obvykle trvá od několika hodin, přes noc až po několik dní. Letadlo je ve stavu okamžité připravenosti k letu, který by mohl vyžadovat některé servisní úkony (např. tankování paliva), a není nutná žádná specifická činnost údržby, která by byla spojena s jeho stavem zaparkovaného letadla. [22]

- **Aktivní (krátkodobé) parkování (Active (Short-Term) Parking)**

Letadlo je na zemi, mimo provoz a neprochází žádnou plánovanou údržbou. Předpokládá se, že doba parkování přesáhne několik dní a protáhne se až na několik týdnů. Na začátku doby parkování jsou instalovány bezpečnostní kolíky, kryty a zátky letadel a jsou prováděny minimální počáteční konzervační práce. Letadlo prochází úkony pravidelné údržby, včetně chodu pomocné motorové jednotky (APU) a motorů. Návrat letadla do letuschopného stavu sice není okamžitý, ale může být proveden v krátkém termínu. [22]

- **Dlouhodobé parkování (Prolonged (Long-Term) Parking)**

Letadlo je na zemi, mimo provoz a neprochází žádnou plánovanou údržbou. Předpokládá se, že doba parkování přesáhne několik týdnů a protáhne se až na několik měsíců. Jsou instalovány bezpečnostní kolíky, kryty a zátky letadla a počáteční konzervační práce nemusí být nutně minimální (např. mohou zahrnovat rozsáhlé mazání podvozku). Letadlo prochází pravidelnými úkony údržby, přičemž pouze několik úkonů je prováděno v týdenní nebo méně časté periodicitě. Některé součásti letadla (např. baterie motorů a APU) mohou být mezi prováděním úkonů periodické údržby z letadla vyjmuty, jinak je ovšem konfigurace letadla



zachována bez chybějících součástí. Návrat letadla do letuschopného stavu v krátkém termínu není možný. [22]

- **Skladování (Storage)**

Letadlo je odstaveno a vyřazeno z provozu na středně dlouhou až dlouhou dobu (obecně se, s ohledem na potřeby provozovatele, předpokládá doba delší než 3–6 měsíců) a v mnoha případech je umístěno na místě s omezenými prostředky a/nebo obtížným včasným přístupem pro kvalifikovaný technický personál. Mnoho systémů letadel je v havarijním stavu, který neumožňuje jejich okamžité zprovoznění, nebo byly hlavní části demontovány a do letadla byl instalován balast. Vrácení letadla do provozu by vyžadovalo dostatečně včasné oznámení. [22]

Podrobnější informace o tom, jak správně udržovat a chránit letadlo, poskytuje výrobce, a proto by měly letecké společnosti zajistit včasnou a účinnou komunikaci s konkrétním výrobcem originálního vybavení svých letadel, pokud jde o aktualizace týkající se postupů parkování a skladování letadel.

3.2. Volba parkovacího místa

Kvůli propadu osobní dopravy byla většina letadel odstavena. S takovou situací se svět setkal poprvé. Dopravci, kteří v posledních letech před pandemií rozšiřovali své flotily, v době pandemie hledali, kde nevyužitá letadla zaparkovat. Podle článku *Here's What You Do With Two-Thirds of the World's Jets When They Can't Fly* [32] televizní sítě Bloomberg, která se zabývala výzkumem v tomto odvětví, bylo na celém světě zaparkováno více než 16 000 dopravních letadel, protože v důsledku pandemie onemocnění covid-19 došlo k omezení cestování a nebývalé finanční zátěži leteckých společností. Nalezení vhodného prostoru a podmínek pro 62 % z celkového světového počtu letadel a udržení těchto letadel v letuschopném stavu se náhle staly prioritami pro rok 2020.

Při výběru parkovacího místa hrála roli kritéria jako cena pronájmu parkovacího místa, jeho vzdálenost od domácího letiště, klimatické podmínky a další.

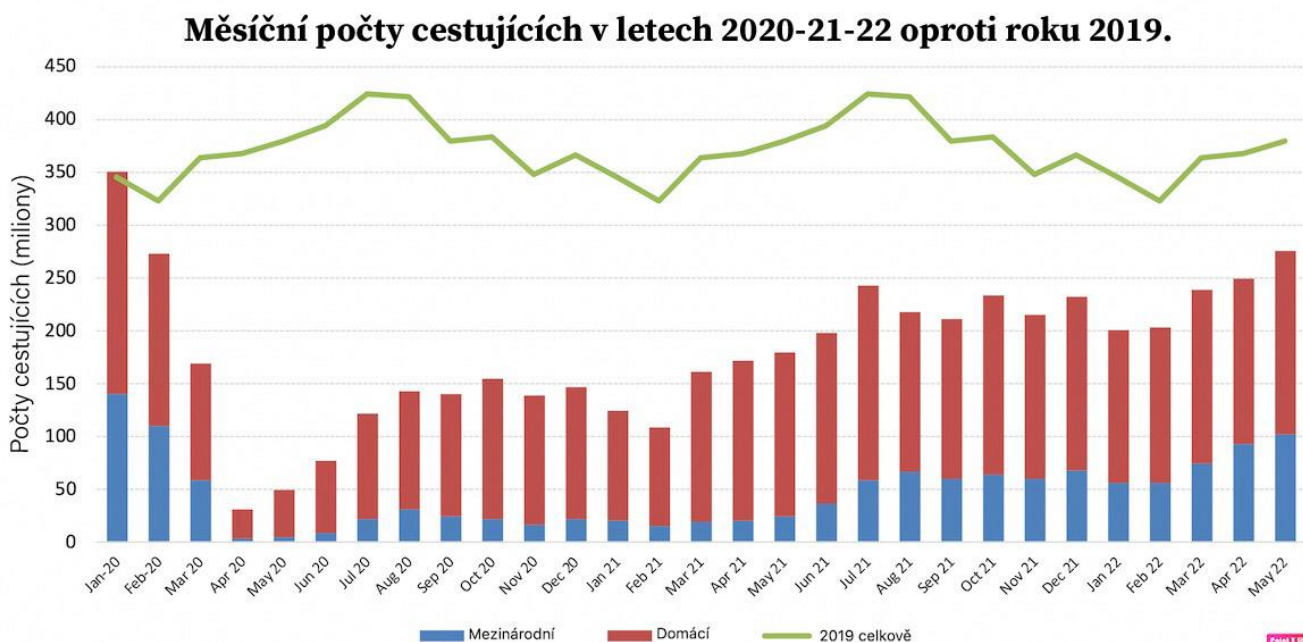
Nejlepší povětrnostní podmínky pro skladování trupu letadla a jeho částí skýtá suché pouštní klima, které zabraňuje korozi částí a poškození vnitřních dílů. Takovými ideálními



povětrnostními podmínkami se však může pochlubit jen malá část světa, takže mnozí dopravci a letecké společnosti byli nuceni nechávat svá odstavená letadla přímo na ranvejích svých domovských nebo uzlových letišť.

3.3. Reakce leteckých dopravců na krizi

Největší pokles letecké dopravy byl zaznamenán na konci března roku 2020. Do té doby byl dopad omezení a zákazů souvisejících s pandemií spíše lokální. V dubnu poklesla osobní letecká doprava o 92 % ve srovnání se stejným obdobím roku 2019 (viz graf 1). Mezinárodní letecká doprava byla pandemií zasažena o něco více (v dubnu roku 2020 poklesla o 98 %). V porovnání se stejným obdobím roku 2019 klesla vnitrostátní doprava o 87 %. Letní vlna pandemie přinesla vyšší počty cestujících, přesto však letní sezóna roku 2020 nedosáhla hodnot předchozích let. Názna zlepšení v osobní letecké dopravě přerušil příchod podzimní pandemické vlny v mnoha zemích světa. [23]

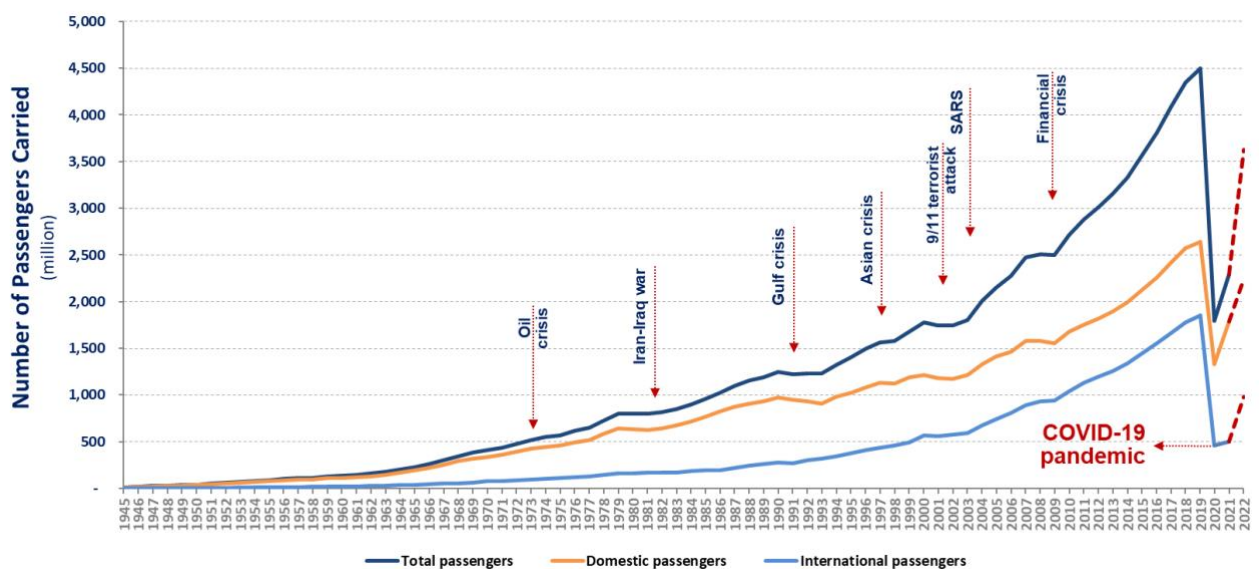


Graf 1 Počty cestujících v letech 2020-21-22 oproti roku 2019 [23]

Ročními výsledky byl potvrzen prudký pokles osobní letecké dopravy v roce 2020. Počet přepravených cestujících v roce 2020 se oproti předchozímu roku snížil o 60 % (viz graf 2). Celkově bylo v roce 2020 přepraveno přibližně 1,8 miliardy cestujících, což zhruba odpovídá



snížení počtu cestujících o 2,703 milionu. Vnitrostátní leteckou dopravou bylo v roce 2020 přepraveno zhruba 1,3 miliardy cestujících, což odpovídá poklesu přibližně o 50 % ve srovnání s rokem 2019. Mezinárodní letecká doprava v roce 2020 přepravila méně než 500 milionů cestujících, což představuje pokles cca o 74 % cestujících v porovnání s předchozím rokem. [23]



Graf 2 Počet cestujících přepravených leteckou dopravou mezi lety 1945 a 2020 [23]

V souvislosti s nižší poptávkou po osobní letecké dopravě došlo k výraznému snížení počtu letů a také ke snížení nabízené kapacity. Celkové množství nabízených sedaček na všech letech do všech destinací se oproti roku 2019 snížilo o polovinu. Nepříznivý rok pro letectví je podtržen i prudkým poklesem hrubých provozních výnosů leteckých dopravců. Pokles v roce 2020 dosáhl přibližně hodnoty 372 miliard USD. [23]

3.4. Dopad krize způsobené pandemií onemocnění covid-19 na složení flotil

V návaznosti na pokles poptávky po osobní letecké dopravě a snížení celkového množství letů musely letecké společnosti nevyhnutelně přistoupit ke změnám ve svých flotilách. Převážná většina flotil byla zredukována. Omezení provozu letecké dopravy v souvislosti s pandemií

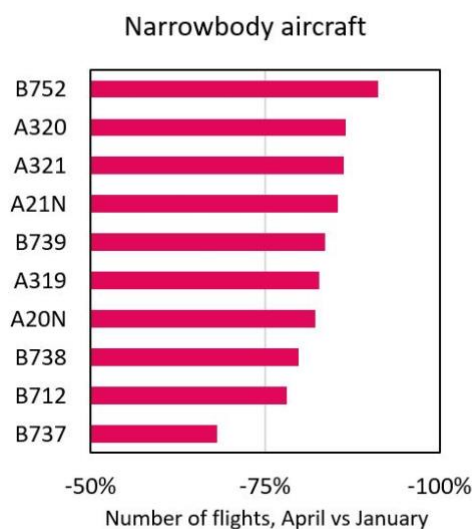


způsobilo urychlení procesu plánovaného vyřazování některých typů letadel a také potvrdilo, že jsou některé typy letadel přebytečné a neprosperující.

Analytici, investoři a média pozorně sledovali systematické a postupné zastavování provozu většiny světových leteckých společností a odstavení drtivé většiny dopravních letadel v reakci na pandemii onemocnění covid-19. Zdálo se, že prudké zrychlení šíření koronavirové infekce, které začalo v dubnu 2020, dosáhlo svého vrcholu v polovině května téhož roku.

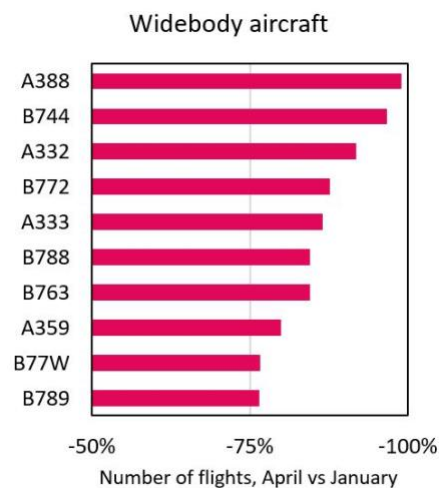
Analýza údajů ze sledovacího portálu Flightradar24 ukazuje, že od ledna do dubna roku 2020 došlo k výrazné změně v používání různých typů letadel po celém světě. Celkový počet letadel na obloze se snížil o 80 % a pokles byl různý v závislosti na typu letadla, dosahující až téměř 100 %. [24]

Navzdory tomu, že v období ledna i dubna 2020 byl největší počet letů zaznamenán u narrow – body letadel z rodin Airbus A320 a Boeing 737, jejich počet v tomto období klesl v průměru o 82 procent. V lednu dosáhly téměř 600 tisíc letů, zatímco v dubnu klesly na pouhých 100 tisíc letů. Letoun Boeing 757-200, který patří také do skupiny narrow – body letadel, zaznamenal největší relativní pokles z 20 000 letů na pouhých 1 800 letů. Pokles počtů letů (v procentech) různých typů letadel ze skupiny narrow – body letadel v období od ledna do dubna 2020 je znázorněn na grafu 3. [24]



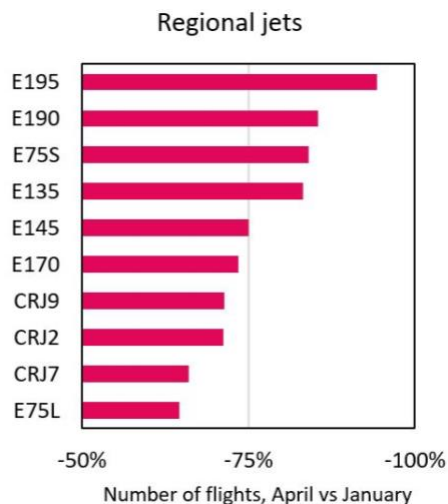
Graf 3 Pokles počtů letů narrow – body letadel od ledna do dubna 2020 [24]

Letadla skupiny wide-body byla postižena ještě více než menší letadla, celkový pokles letů v dubnu 2020 činil až 85 %. Největší dopad měl Airbus A380, jehož počet letů klesl z 10 600 v lednu na pouhých 100 v dubnu. To představuje propad o 99 %. Boeing 787 a Airbus A350 zaznamenaly menší průměrný pokles o 78 %, zatímco novější a větší verze těchto letadel zaznamenaly pokles o přibližně 60 %. Pokles počtů letů (v procentech) různých typů letadel ze skupiny wide – body letadel v období od ledna do dubna 2020 je představen na grafu 4. [24]



Graf 4 Pokles počtů letů wide – body letadel od ledna do dubna 2020 [24]

U regionálních letadel došlo k nejmenšímu poklesu využití ve srovnání s ostatními kategoriemi letadel. Snížení bylo pouze o 75 %. Pokles počtů letů (v procentech) různých typů regionálních letadel v období od ledna do dubna 2020 je znázorněn na grafu 5. [24]



Graf 5 Pokles počtů letů regionálních letadel od ledna do dubna 2020 [24]

4. Identifikace problémového systému

Právě téma vlivu odstavení letadel je fundamentem celé bakalářské práce. Abychom správně určili vliv odstavení letadel na spolehlivost letadlových systémů, letadel jako celku, bylo nutné provést spolehlivostní analýzu. V dalších částech bude popsán postup analýzy systémů letadla a jejich komponentů. Pro spolehlivostní analýzu byla poskytnuta data o selháních na letadlech Boeing 737 NG z provozu od společnosti Smartwings, konkrétně šlo o data z let 2019, tedy o data o poruchách z doby před pandemií koronaviru, kdy byla letecká doprava velmi úspěšná, a data z 2020, kdy byla letecká doprava téměř zcela pozastavena. Po celém roce trpěla zkoumaná letadla dlouhodobým odstavením kvůli pandemii, pro niž byla letecká doprava po celém světě téměř zastavena. Cílem analýzy spolehlivosti je zjištění role odstavení v závadách, které se objevily během údržeb a prohlídek. Data byla nejdříve tříděna podle jednotlivých systémů na letadle a následně podle jednotlivých komponentů v systémech za účelem vyhodnocení množství selhání a jejich kritičnosti. Pak byla sestavena statistika, který ze systémů nejčastěji a nejvíce vykazoval problém, a byly porovnány výsledky z obou let. Statistické výsledky jsou zohledněné v tabulce 3.



Kapitola ATA	Popis	Počet poruch		Procentuální rozdíl
		Rok 2019	Rok 2020	
ATA 21	Air Conditioning	109	124	13,76 %
ATA 22	Autoflight	60	53	-11,76 %
ATA 23	Communications	255	188	-26,27 %
ATA 24	Electrical Power	205	190	-7,32%
ATA 25	Equipment & Furnishnigs	853	4 546	432,94 %
ATA 26	Fire Protection	124	188	51,61 %
ATA 27	Flight Controls	125	161	28,80 %
ATA 28	Fuel	57	71	24,56 %
ATA 29	Hydraulic Power	27	45	60 %
ATA 30	Ice & Rain Protection	47	40	-14,89 %
ATA 31	Indicating & Recording	110	136	23,64 %
ATA 32	Landing Gear	1 947	1 552	-20,29 %
ATA 33	Lighting	162	429	164,81 %
ATA 34	Navigation	259	257	-0,77 %
ATA 35	Oxygen	452	486	7,52 %
ATA 36	Pneumatic	122	171	40,16 %
ATA 38	Water & Waste	41	70	70,73 %
ATA 44	Cabin Systems	22	20	-9,09 %
ATA 46	Information Systems	3	3	0 %
ATA 48	Nitrogen Generation Systém	-	-	-
ATA 49	APU	66	57	-13,64 %
ATA 71	Power Plant	29	29	0 %
ATA 73	Engine Fuel & Control	58	40	-31,33 %
ATA 74	Ignition	7	7	0 %

Tabulka 3 Počet závad na jednotlivých systémech

Systémy, u nichž se počty poruch v roce 2019 a v roce 2020 značně lišily, byly zvýrazněny. Pokud se počet zápisů v roce 2020 zvýšil oproti roku 2019 alespoň o 30 %, byly systémy označeny žlutě. Systémy, u kterých se počet závad v roce 2020 zřejmě snížil alespoň o 30 %, byly označeny zeleně.

Nelze však k analýze vybírat systém pouze podle nejčastějších výměn, samozřejmě je třeba dané kapitoly třídit i s ohledem na omezení, která plynou z nefunkčnosti konkrétního systému. Například podle tabulky se nejvýraznější změny týkaly kapitoly ATA 25 a po podrobnějším pohledu na systém byly zjištěny komponenty, které byly nejčastěji podrobeny výměnám. Byly to LIFE VEST (záchranná vesta) – 3 347 zápisů v roce 2020 oproti 104 zápisům v roce 2019, FIRST AID KIT (sada pro první pomoc) – 305 zápisů v roce 2020 oproti 145 zápisům v roce 2019, EMERGENCY MEDICAL KIT (pohotovostní lékárnička) – 199 zápisů v roce 2020, v roce



2019 bylo zápisů celkem 131. Tak výrazný rozdíl počtu zápisů byl způsoben pouze expirací některých z prvků systému, což vůbec nemělo vliv na spolehlivost letadlové flotily. Nicméně je to důležité zjištění, se kterým je nutno v praxi počítat při uvedení letadla zpět do provozu a které může vzhledem k rozsahu a velkému množství expirujících komponentů mít větší dopad na plánování.

Druhým systémem z hlediska nejvyšší četnosti poruch je systém osvětlení neboli ATA 33. Celkový počet zápisů v roce 2020 byl 429, v roce 2019 bylo ovšem závad pouze 162. Počet výměn se v době dlouhého stání navýšil skoro o 165 %. Systém byl dále tříděn podle komponentů a bylo zjištěno, že nejvíce zápisů vykazoval komponent POWER SUPPLY – BATTERY PACK (napájecí zdroj – baterie) – 289 zápisů v roce 2020 oproti 14 zápisům v roce 2019. U tohoto komponentu se většinou jednalo o vybité baterie, které se během dlouhého stání nenabíjely z toho důvodu, že je nebylo potřeba nabíjet. To znamená, že by byl problém s bateriemi vyřešen jejich nabíjením. Druhým komponentem dle poruchovosti byl WINDOW LIGHTS ASSY (sestava osvětlení okének) – 44 zápisů v roce 2020 oproti 24 zápisům v roce 2019. Osvětlení okének však nemá vliv na provozuschopnost letadla, tedy nemůže způsobit AOG (Aircraft On Ground). Dalším komponentem, jenž během roku 2020 vykazoval zvýšené množství poruch, je POWER SUPPLY-EMERGENCY (zdroj nouzového napájení) – 10 zápisů v roce 2020 oproti 6 zápisům v roce předchozím. Daný komponent ale neměl významný vliv na spolehlivost letadla, protože bylo zjištěno poměrně málo poruch. Závěrem je tedy fakt, že rok odstavení neměl žádný významný vliv na systém osvětlení z pohledu spolehlivosti a provozuschopnosti flotily letadel.

Třetím systémem s nejvyšší četností poruch je systém vodní a odpadní ze skupiny ATA 38. Celkový počet poruch v roce 2019 dosáhl hodnoty 41, zatímco v roce 2020 se počet zápisů zvýšil na 70. Bylo zjištěno, že nejvíce poruch vykazovaly komponenty LAVATORY FAUCET (toaletní kohoutek) – 11 zápisů v roce 2020 oproti 2 zápisům v roce 2019 a TOILET ASSEMBLY (toalety) – 28 zápisů v roce 2020, což je o 9 zápisů více než v roce 2019, kdy bylo celkem 19 zápisů. U daného systému jsou však všechny komponenty zálohovány, a tak větší problémy by mohly způsobit pouze ovládací kabely, které měly ve statistice jen zanedbatelně malý počet zápisů.

Poté byl pro analýzu vybrán hydraulický systém ze skupiny ATA 29. Celkem bylo zaznamenáno 27 poruch v roce 2019, v roce 2020 se počet poruch zvýšil na hodnotu 45. Systém byl dále tříděn podle komponentů, a tak byly zjištěny komponenty, které byly nejčastěji podrobeny výměnám. Nejvíce poruch vykazoval komponent ENGINE – DRIVEN PUMP (EDP)



(čerpadlo poháněné motorem) – 12 zápisů v roce 2020 oproti 5 zápisům v roce 2019. Druhým komponentem dle poruchovosti byl komponent FILTER – HYDRAULIC, EDP (hydraulický filtr) – 5 zápisů v roce 2020 oproti žádnému zápisu v roce 2019. Dalším komponentem, jenž vykazoval během roku 2020 zvýšené množství poruch, byl komponent QUANTITY TRANSMITTER – HYDRAULIC SYSTEM (převaděč množství – hydraulický systém) – 6 zápisů v roce 2020 oproti 2 zápisům v roce 2019. Na rozdíl od ostatních komponentů je daný komponent však zálohovaný.

U moderních letadel má hydraulický systém velký význam, jelikož je určen k ovládní mechanismů a systémů zodpovědných za bezpečnost letu. Životnost, odolnost a spolehlivost hydraulického systému je zajištěna kvalitní konstrukcí jednotek, zálohováním, správnou údržbou, automatizací řízení i správným ovládním systému posádkou. Hydraulické systémy znásobují počáteční sílu pomocí hydraulického zařízení. Například síla potřebná k pohybu řídicích ploch letadla je velmi vysoká a pilot nemá pro jejich rozpohybování dostatek sil. Z toho důvodu je letadlo vybaveno hydraulickým systémem rozvádějícím hydraulickou kapalinu do různých řídicích zesilovačů a hydromotorů, které pohybují řídicími plochami podle potřeby pilota. [25] V případě Boeing 737 se však jedná o mechanické spojení, které je zesíleno prvky hydraulického systému.

4.1. Hydraulický systém

V následujících kapitolách bude popsán vybraný letadlový systém, tedy hydraulický systém, a to z technického hlediska. Další části budou obsahovat základní technický popis systému a způsoby jeho údržby. Pro detailnější pochopení fungování hydraulického systému byly použity publikace [26] a [25].

4.2. Technický popis

Hydraulický systém Boeingu 737 je určen k zatahování a vytahování podvozku, zatáčení kol přední podvozkové nohy, brzdění hlavních podvozkových noh, vysouvání a zatahování klapek, ovládní otáčení, ovládní kormidel, stabilizátorů a dalších mechanizačních částí letadla. Primární řídicí systém letounu B737 NG je plně mechanický s hydraulickými zesilovači, což



znamená, že mezi řídicí pákou a řídicími plochami je vždy mechanické spojení. B737 MAX má kombinovaný systém – některé řídicí plochy jsou ovládány mechanicky, některé elektronicky.

Hydraulický systém letadla se skládá ze dvou částí: [33]

- výroba a distribuce – určena k získávání energie, vytváření provozního tlaku, jeho distribuci k výkonným prvkům a skladování zásob kapaliny a regulaci tlaku v systému;
- výkonné prvky – skládá se z komponentů, z nichž každý je určen k provozu určitého mechanismu.

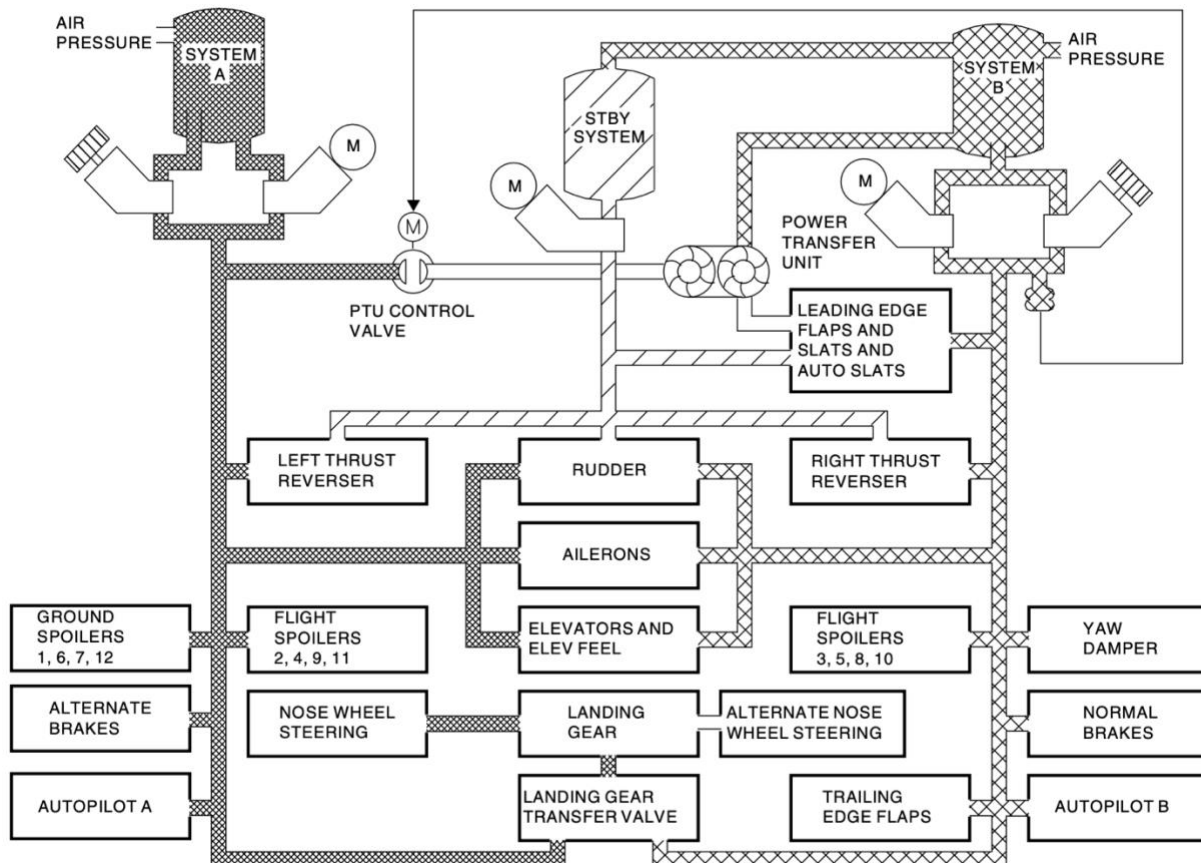
Každé letadlo B737 NG je vybaveno třemi hydraulickými systémy: dvěma hlavními (A, B) a také stand-by neboli pohotovostním systémem (C). Pohotovostní systém se používá, dojde-li ke ztrátě tlaku v systému A a/nebo B. Mnoho výkonných prvků odebírá energii z více hydraulických systémů současně (viz obrázek 4). Pokud jeden systém selže, může být spotřebitel bez problémů zásobován jiným systémem. [26]

Každý hydraulický systém má nádrž na kapalinu umístěnou v prostoru hlavního kola. Nádrže systému A a B jsou pod tlakem s vypouštěným vzduchem. Nádrž rezervního systému je připojena k nádrži systému B pro účely tlakového zkoušení a údržby. Tlak ve všech nádržích zajišťuje průtok kapaliny do všech hydraulických čerpadel. [33]

Systém A se skládá z jednoho čerpadla poháněného motorem (EDP – engine driven pump), jednoho čerpadla poháněného elektromotorem na střídavý proud pro řízení letu, spoilerů, podvozků, pojíždění předového kola, záložního brzdového systému, levého směrového řízení, autopilota A, křidélek a směrového kormidla. [33]

Systém B se skládá z jednoho čerpadla poháněného motorem a jednoho čerpadla poháněného střídavým motorem pro řízení letu, standardního brzdového systému, klapek, mechanizace náběžné hrany, pravého směrového řízení, výškového kormidla, vnějších letových spoilerů, autopilota B a tlumiče klopení.[33]

Systém C neboli záložní systém se skládá z jednoho čerpadla poháněného elektromotorem poskytujícího třetí zdroj energie pro ovládání kormidel a záložního zdroje energie pro mechanismy reverzace tahu a pro uvolnění klapek křídla a klapek náběžné hrany v redundantním režimu. [33]



Obrázek 4 Hydraulický systém letounu B737 NG [26]

Hydraulický systém A nebo B může napájet všechna zařízení pro řízení letu tak, aby nebyla ohrožena ovladatelnost letadla za letu.

Hydraulické čerpadlo čerpá kapalinu z hydraulické nádrže. Z nádrže vycházejí dvě potrubí: výtlačné a zpětné. Výtlačné potrubí vede od nádrže k výkonným prvkům, zpětným potrubím se kapalina vrací do rezervoáru. Rezervoár je vzduchotěsný a zahrnuje malou trubku se vzduchem dodávaným od kompresoru motoru. Vzduch je přiváděn pod tlakem, aby se vytvářel prvotní tlak v nádrži, čímž je hydraulický systém zajištěn proti vniknutí vzduchových bublin do potrubí. Hydraulická kapalina vtéká do pumpy, kde získává potřebný tlak, a vytéká do výtlačného potrubí. Ve výtlačném potrubí, stejně jako ve zpětném, se nachází zpětný ventil, který umožňuje tok kapaliny pouze v jednom směru. [33]

Filtrační komponenty jsou též instalovány jak ve výtlačném potrubí, tak v potrubí zpětném, aby byly systém i komponenty chráněny proti odpadkům hydraulické kapaliny. Filtry obsahují indikátor diferenčního tlaku, který se vyndává, je-li filtr znečištěný a je třeba jej vyměnit.



Každý hydraulický systém má kromě hlavních čerpadel také redundantní zdroje napájení. Ty jsou reprezentovány turbočerpadly nebo elektricky poháněnými čerpacími stanicemi. Úkolem turbočerpadel je vytvářet tlak kapaliny během letu letadla při výpadku některého motoru a při stání letadla na zemi s vypnutými motory vytvářet tlak pro provoz výkonných prvků hydraulického systému. Systém turbočerpadla je hydraulické čerpadlo poháněné vzduchovou turbínou. Stlačený vzduch pro jednotku je odebírán z jednoho z motorů letadla. Elektricky poháněné čerpací jednotky jsou nouzovým zdrojem tlaku během letu a zásobují výkonné prvky na zemi, když je letadlo v pohybu. [33]

4.3. Porucha hydraulického systému

Jak již bylo zmíněno, hydraulický systém má tři dílčí systémy. Pokud tlak v hydraulickém čerpadle A poklesne, okamžitě se rozsvítí indikátory nízkého tlaku v hydraulickém systému A a také se automaticky vypne autopilot A. Letadlo však zůstane plně ovladatelné, a to díky tomu, že jsou systémy A a B zálohovány a jsou schopny napájet všechna zařízení pro řízení letu tak, aby nebyla ohrožena ovladatelnost letadla za letu. [26]

Při současném poklesu tlaku v hydraulických čerpadlech A i B se okamžitě rozsvítí indikátory nízkého tlaku v hydraulických systémech A a B. Letadlo se stává obtížně ovladatelným a na ovládací prvky je pro zajištění ovládání letadla během letu potřeba vynaložit větší sílu. Měla by být rovněž přijata opatření k přechodu na plné ruční řízení letadla a k přepnutí ovládání směrového kormidla na záložní hydraulický systém. To bude usnadňovat řízení klonění a klopení. Pilot si ale při tomto stavu bude muset vybrat nejbližší letiště pro nouzové přistání. [26]

5. Spolehlivostní analýza

Pro účely spolehlivostní analýzy hydraulického systému skupiny ATA 29 bylo provedeno podrobnější třídění dat, a to podle jednotlivých komponentů systému. Pro analýzu vybraného letadlového systému v následujících částech bude využita metoda stromu poruchových stavů FTA. V první řadě ale bude spočítán parametr intenzity poruch pro určení nejméně spolehlivých komponentů systému. Následně bude na komponenty vybrané podle výsledků výpočtu aplikována spolehlivostní analýza strom poruchových stavů, která stanoví všechny



poruchové stavy komponentů a identifikuje možné následky na spolehlivost celého systému. Výsledný strom FTA hlavního hydraulického systému je představen v příloze 1. Výsledný strom FTA záložního hydraulického systému k nahlédnutí v příloze 2.

Pro provedení spolehlivostní analýzy hydraulického systému na letadle ze skupiny ATA 29 byla použita reálná data z provozu, a to z roku 2019 a roku 2020. Cílem provedení dané spolehlivostní analýzy je identifikace vlivu dlouhého stání na komponenty vybraného systému z pohledu jejich spolehlivosti. Právě proto jsou použita data z roku 2019, kdy letecká doprava dosahovala standardního objemu, a z následujícího roku 2020, kdy byla v důsledku omezení spojených s pandemií onemocnění covid-19 velmi omezena.

Analýze byla podrobena data o selháních v reálném provozu celkem z 27 letadel typu Boeing 737 NG ve verzích 700/800/900. V prvním kroku je proveden výpočet parametru intenzity poruch, aby byly zjištěny komponenty, u kterých se v roce 2020 výrazně snížila spolehlivost při porovnání s hodnotami z předchozího roku 2019. Pro výpočty se používá roční nálet flotily letadel zvlášť z roku 2019 a z roku 2020. Letové hodiny byly určeny podle času, který letadlo strávilo za letu, tedy od okamžiku, kdy opustilo povrch země, do doby prvního dotyku se zemí při následném přistání. Nálet byl registrován podle letových hodin.

Pro výpočet spolehlivosti komponentů hydraulického systému se využívají celkové počty letových hodin. V roce 2019 bylo nalétáno celkem téměř 100 000 letových hodin, zatímco v následujícím roce 2020 bylo flotilou nalétáno přibližně o dvě třetiny méně, a to zhruba 33 000 letových hodin. Absolutní většina byla nalétána již po uvedení flotily do opětovného provozu po dlouhém stání. Počet letových hodin je důležitou částí výpočtu spolehlivosti komponentů systému, ale není jedinou ani postačující.

Další data, která je nutno pro určení nejméně spolehlivých komponentů a pro následné provádění spolehlivostní analýzy zohlednit, jsou počty poruch, jež byly zaznamenány ve stejných obdobích, v jakých jsou představeny roční nálety, tedy v letech 2019 a 2020. Seznam komponentů hydraulického systému, které selhávaly během obou let, se skládá z 16 položek, mezi které patří jak jednotlivá čerpadla, například elektrické čerpadlo poháněné motorem, rezervoáry hydraulické kapaliny, tak i menší, nicméně důležité komponenty systému jako jsou ventily a filtry. V roce 2019 se vyskytlo celkem 27 poruch, v následujícím roce 2020 bylo na hydraulickém systému letadla evidováno již 45 závad (viz tabulka 3). Komponenty, které by měly jak v roce 2019, tak i v roce 2020 stejný počet zápisů, nebyly žádné. Vyskytly se však komponenty, jež měly během roku ve statistice pouze jeden záznam nebo dokonce



žádný. U některých komponentů je ze statistiky patrný velký nárůst počtu poruch v roce 2020 oproti předchozímu roku 2019. Nejvýznamnějšího rozdílu v počtech poruch dosáhl komponent *čerpadlo poháněné motorem* (komponent ENGINE – DRIVEN PUMP (EDP)).

5.1. Intenzita poruch komponentů hydraulického systému

Intenzita poruch je lokální charakteristikou spolehlivosti. Vyjadřuje pravděpodobnost toho, že prvek, který se neporouchal do daného okamžiku, se porouchá v době od daného okamžiku do následujícího. Obecně platí, že intenzitou poruch je úplně popsáno rozdělení doby do poruchy a naopak. Vypočet intenzity poruch jednotlivých komponentů systému byl proveden pro identifikaci nejméně spolehlivých komponentů systému za účelem následující spolehlivostní analýzy. Existuje několik způsobů výpočtu intenzity poruch. V dané práci je použit způsob, který využívá v jedné rovnici počet poruch jednotlivých komponentů a celkový počet nalétaných hodin, a to následujícím způsobem:

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

Podle tohoto vzorce je intenzita poruch $\lambda(t)$ přímo úměrná počtu závad jednotlivých komponentů systému a nepřímo úměrná celkovému počtu nalétaných hodin.

Parametr intenzita poruch byl vypočten pro každý komponent hydraulického systému ze skupiny ATA 29. Tabulka 4 představuje výsledky výpočtu parametru intenzita poruch pro komponenty systému podle již uvedeného vzorce.



Component ATA Description	Intenzita poruch $\lambda(t)$	
	2019	2020
EMDP – ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP	9,06E-05	1,84E-04
DRAIN VALVE ASSY, RESERVOIR	0,00E+00	6,13E-05
ENGINE – DRIVEN PUMP (EDP)	5,04E-05	3,68E-04
HYDRAULIC FUSE – LEADING EDGE	1,01E-05	0,00E+00
FILTER-HYDRAULIC, EDP	0,00E+00	1,53E-04
FITTING – QUICK DISCONNECT	0,00E+00	3,06E-05
HOSE ASSY – PRESSURE	0,00E+00	3,06E-05
MODULAR PACKAGE ASSY – HYDRAULIC PRESSURE SYSTEM	2,01E-05	6,13E-05
MLG RETRACT FUSES	2,01E-05	0,00E+00
POWER TRANSFER UNIT (PTU)	2,01E-05	1,53E-04
POWER TRANSFER UNIT (PTU) CONTROL VALVE	0,00E+00	3,06E-05
PTU FILTER	0,00E+00	3,06E-05
QUANTITY TRANSMITTER-HYD SYSTEM	2,01E-05	1,84E-04
RESERVOIR FILL SELECTOR VALVE	0,00E+00	3,06E-05
RESERVOIR MANUAL FILL PUMP	4,03E-05	3,06E-05
SHUTOFF VALVE, EDP	0,00E+00	3,06E-05

Tabulka 4 Intenzita poruch komponentů hydraulického systému letadla

Z tabulky je patrné, že výrazné zvýšení intenzity poruch v roce 2020 se oproti předchozímu roku 2019 týkalo zejména komponentů: ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP (EMDP), ENGINE-DRIVEN PUMP (EDP), FILTER – HYDRAULIC, EDP, POWER TRANSFER UNIT (PTU), QUANTITY TRANSMITTER-HYD SYSTEM.



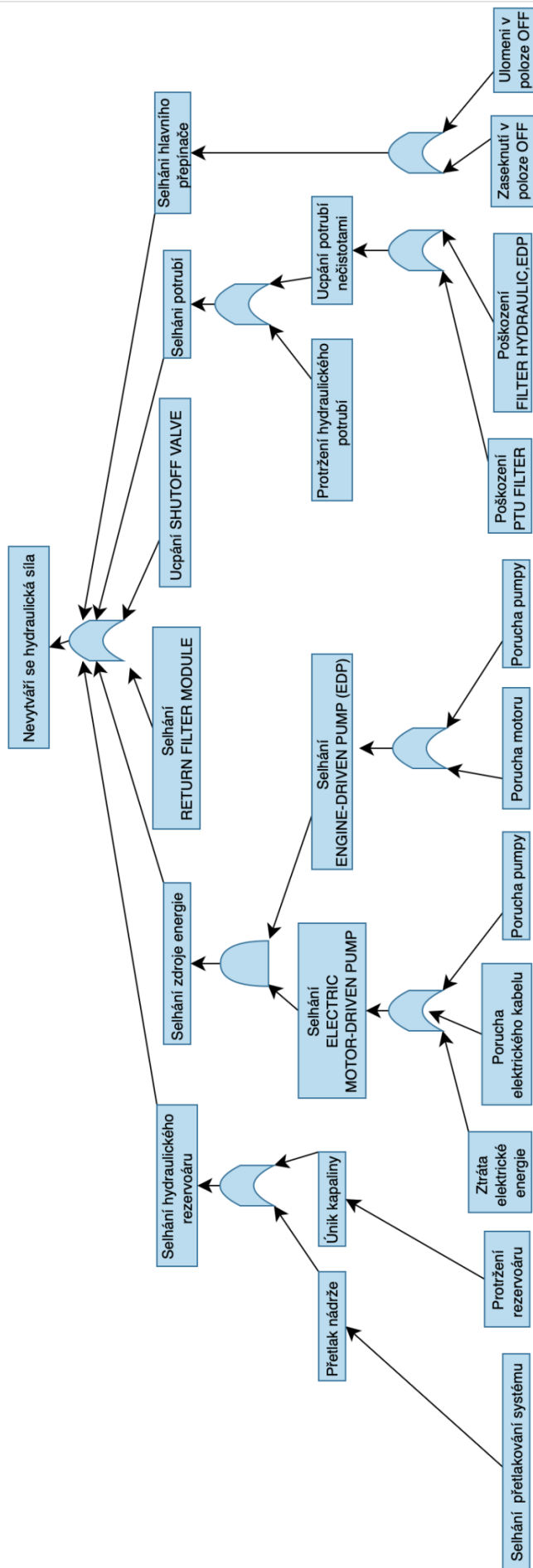
5.2. Analýza stromu poruchových stavů FTA hydraulického systému

K analýze hydraulického systému byla vybrána metoda stromu poruchových stavů, neboť tato analýza zobrazuje všechny možné kombinace poruch prvků, které buď přímo vedly k vrcholové události nebo se podílely na jejím vzniku. Tato metoda tedy umožňuje lépe identifikovat komponenty, které mohly způsobit stav AOG.

Výsledný strom FTA je znázorněn na obrázku 5, který vychází z informací dostupných v příručce výrobce a z volně dohledatelných podrobností o fungování a zapojení komponentů z hlediska hlavního hydraulického systému, tedy systémů A a B. Při vytváření stromu FTA bylo nutné nejprve identifikovat hlavní událost pro palivový systém. K poruše může dojít různými způsoby, ale v tomto případě je vrcholovou událostí *Nevytváří se hydraulická síla*. Pokud dojde k přerušení vytváření hydraulické síly u hydraulického systému, jedná se rovněž o poruchu hlavní funkce hydraulického systému.

Události, které mohou způsobit selhání celého systému, jsou následující: *Selhání hydraulického rezervoáru, Selhání zdroje hydraulické energie, Selhání RETURN FILTER MODULE, Selhání potrubí, Ucpání SHUTOFF VALVE, Selhání hlavního přepínače.*

K poruše hydraulického rezervoáru mohou vést dvě hlavní události: *Únik kapaliny a Přetlak nádrže*. Rezervoáry hrají důležitou roli v hydraulickém systému. Jsou součástí systému natlakování hydraulických nádrží, který přivádí tlakový filtrovaný vzduch z pneumatického systému letadla, zajišťuje pozitivní přívod hydraulické kapaliny do čerpadel a také pomáhá zabránit tvorbě pěny v nádržích. Pokud jsou rezervoáry porušeny, dojde k selhání celého hydraulického systému, jelikož hydraulická kapalina nebude správně dodána k výkonným prvkům. Operátor OR je přidělen, protože pro vrcholovou událost stačí, aby selhala jedna z uvedených komponentů. *Únik kapaliny* může být dále způsoben základní událostí, a to *Protržení hydraulického rezervoáru*.



Obrázek 5 Strom poruchových stavů hlavního hydraulického systému letounu B737 NG



Událost *Selhání zdroje energie* způsobují přechodné události *Selhání ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP* a *Selhání ENGINE-DRIVEN PUMP*. Dané dvě události musí nastat současně, aby se nevytvářela hydraulická síla, a tím pádem selhal celý hydraulický systém. Událost *Selhání ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP* je zapříčiněna základními událostmi *Ztráta elektrické energie*, *Porucha elektrického kabelu* a *Porucha pumpy*. Událost *Selhání ENGINE-DRIVEN PUMP* je způsobena událostmi *Porucha motoru* a *Porucha pumpy*.

Hydraulické potrubí rozvádí hydraulickou kapalinu k výkonným prvkům, proto je důležité uvažovat o poruše této části hydraulického systému. Chyba může nastat jak na výtlačném potrubí, tak na zpětném. Události *Selhání potrubí* předchází mezilehlé události *Protržení hydraulického potrubí* a *Ucpání potrubí nečistotami*. Těmto dvěma událostem je přiřazen operátor OR, protože pouze selhání jedné z těchto událostí stačí k tomu, aby došlo k události *Selhání potrubí*. Příčinami *Ucpání potrubí nečistotami* jsou základní události *Poškození PTU FITER* a *Poškození FILTER – HYDRAULIC, EDP*.

Kromě toho může být vrcholová událost způsobena *Selháním hlavního přepínače*, kterým se obvykle zapíná a vypíná dodání hydraulické kapaliny. Hlavními událostmi, které mohou způsobit tuto poruchu, jsou *Zaseknutí v poloze OFF* a *Ulomení v poloze OFF*. Dané dvě události jsou spojeny operátorem OR.

Jak již bylo zmíněno, kromě hlavního hydraulického systému má Boeing 737 NG i záložní hydraulický systém neboli C systém, který má odlišnou strukturu než primární. Proto je nutné vytvořit FTA strom i pro pohotovostní hydraulický systém. Tento systém má jednodušší strukturu a pro zajištění jeho chodu je potřeba menší počet komponentů. Na obrázku 6 je znázorněn výsledný FTA strom záložního hydraulického systému.

Vrcholovou událostí je opět událost *Nevytváří se hydraulická síla*. Předchůdci nejzávažnější události jsou *Selhání záložního hydraulického rezervoáru*, *Selhání ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP*, *Selhání FLIGHT CONTROL PANEL* a také *Selhání potrubí*.

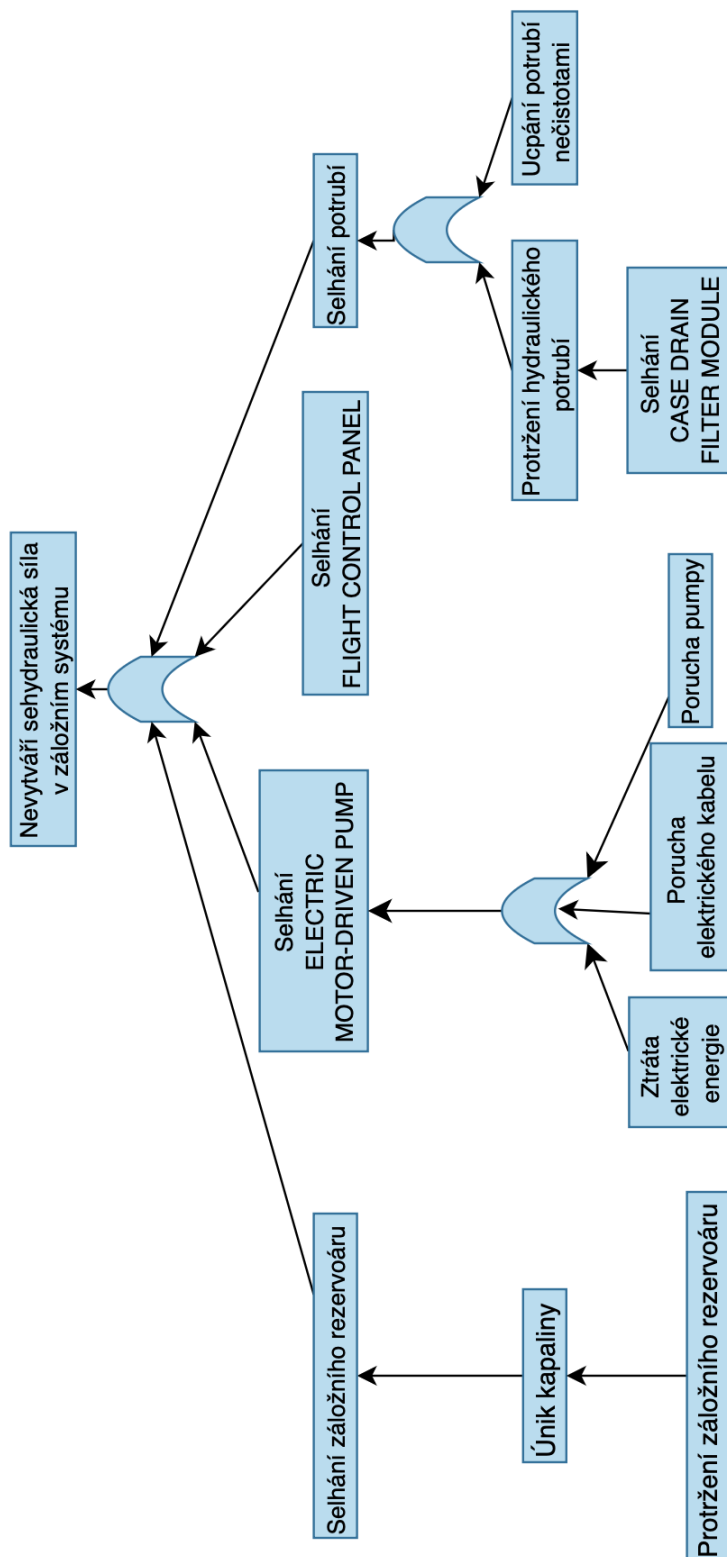
Události *Selhání záložního rezervoáru* předchází událost *Únik kapaliny*, která je způsobena základní událostí *Protržení záložního rezervoáru*.

K události *Selhání ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP* mohou vést základní události *Ztráta elektrické energie*, *Porucha elektrického kabelu* a také *Porucha pumpy*. Tyto události jsou



spojeny operátorem OR, protože stačí selhání jedné z daných událostí, aby nastala vrcholová událost.

Příčinami události *Selhání potrubí* mohou být mezilehlé události *Protržení hydraulického potrubí* a *Ucpání potrubí nečistotami*. Těmto dvěma událostem je přiřazen operátor OR, protože pouze selhání jedné z těchto událostí stačí k tomu, aby došlo k události *Selhání potrubí*. K události *Ucpání potrubí nečistotami* může vést základní událost *Selhání CASE DRAIN FILTER MODULE*.



Obrázek 6 Strom poruchových stavů FTA záložního hydraulického systému



6. Identifikace vlivu dlouhého stání

V této kapitole se budu věnovat popisu dosažených výsledků a stanovení vlivu dlouhého stání na flotilu letadel z pohledu spolehlivosti komponentů systému.

Aby bylo přesněji zjištěno, které komponenty vybraného systému jsou nejméně spolehlivé, byla zvolena spolehlivostní analýza FTA. Kritické komponenty jsem hledala mezi koncovými a mezilehlými prvky. V tomto konkrétním případě se jedná o komponenty, které byly příčinami nevytváření hydraulické síly. Po porovnání výsledků z tabulky 4, v níž jsou uvedeny všechny komponenty, které se porouchaly během roku 2019 a následujícího roku 2020, a výsledků FTA analýzy je zřejmé, že hlavními komponenty, které se během dlouhého stání flotily podílely na selhání celého hydraulického systému, byly komponenty ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP, ENGINE-DRIVEN PUMP, FILTER – HYDRAULIC, EDP.

6.1. Výpočet střední doby do vzniku poruch hydraulického systému

Parametr MTTF, česky střední doba do vzniku poruchy, vyjadřuje hodnotu průměrné doby do poruchy technického výrobku. Tato metrika se používá ke sledování dostupnosti i spolehlivosti produktu. Čím vyšší je doba do poruchy, tím je systém spolehlivější. Parametr střední doby do poruchy je přímo úměrný celkovému času v provozu a nepřímo úměrný celkovému počtu poruch: [27] [28]

$$\text{MTTF} = \frac{\text{Celkový čas v provozu}}{\text{Celkový počet poruch}} = \frac{1}{\lambda(t)} \text{ [FH]}$$

Proměnná $\lambda(t)$ vyjadřuje již vypočtenou intenzitu poruch podle celkového počtu nalétaných hodin flotilou letadel. MTTF je vyjádřena v FH, tedy letových hodinách. [27] [28]



Component ATA Description	MTTF	
	2019	2020
EMDP-ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP	11 031,56	5 438,83
ENGINE-DRIVEN PUMP (EDP)	19 856,80	2 719,42
FILTER-HYDRAULIC, EDP	0,00	6 526,60

Tabulka 5 Výpočet parametru MTTF

Z tabulky je patrné, že po roce odstavení se hodnoty parametru střední doba do poruchy výrazně snížily zejména u dvou komponentů, a to minimálně o polovinu. Znamená to, že například čerpadlo poháněné elektrickým motorem (komponent ELECTRIC MOTOR-DRIVEN PUMP) muselo být opraveno dvakrát častěji po roce odstavení, tedy v roce 2020. Nejméně spolehlivý je komponent čerpadlo poháněné motorem (komponent ENGINE-DRIVEN PUMP).

Co se týče komponentu FILTER – HYDRAULIC, EDP, došlo naopak ke zvýšení parametru MTTF, a to z toho důvodu, že tento komponent v roce 2019 nezaznamenal žádné selhání, ale v roce 2020 až 5. Důvodem poruch tohoto komponentu bylo převážně selhání pump. Ty způsobí zanesení systému během své poruchy, a proto je následně narušena funkce filtru, což vyžaduje kompletní vyčištění celého systému.

6.2. Identifikace vlivu dlouhého stání na hydraulický systém z pohledu spolehlivosti

V této kapitole se budu věnovat stanovení vlivu dlouhého stání na flotilu letadel z pohledu spolehlivosti komponentů systému.

Podle výsledků výpočtu intenzity poruch a dále podle získaných provozních dat lze předpokládat, že prudký nárůst množství poruch hydraulického systému ATA 29 byl způsoben právě tím, že letadla byla skoro po celý rok odstavena.

Důvody výměn komponentů, hlavně tedy pump, byly zejména vnější únik, nedostatečný tlak a kontaminace třískami, která vzniká obroušením kovu o kov. Dané problémy by rozhodně mohly být vyvolány dlouhým stáním, zejména pak úniky, protože se jedná o jednotky navržené pro



téměř nepřetržitý provoz a delší přestávka a ztráta provozního tlaku po delší dobu může vést k narušení těsnění.

Kromě toho byla letadla flotily B737 NG během celého roku odstavena na letišti LKPR v Praze, což znamená, že byla vystavena občasnému nepříznivému počasí jako je déšť, sníh, vítr. Tím trpěly primárně komponenty systémů a snižovala se jejich spolehlivost. Snižovaná spolehlivost komponentů systému pak měla vliv na celkovou spolehlivost letadla jako celku.

Dalším faktorem, který rozhodně přispívá k vyššímu číslu výměn, je skutečnost, že když letadlo nelétá a je odstaveno po delší dobu, mají technici tendenci více se o letadlo starat, tedy si i více všimnout různých netěsností a závad. A protože je na to více času, dochází k většímu počtu výměn a zápisů do statistiky.

Z toho plyne, že rok stání měl i další vliv především z ekonomického hlediska. V tomto případě nebyla ovlivněna flotila letadel, ale jejich provozovatel, tedy letecký dopravce neboli letecká společnost. Aircraft On Ground (AOG), česky technicky neschopné letadlo, může být pro leteckou společnost velmi nákladné, protože ovlivňuje její příjmy a reputaci. Náklady na odstavení letadla na zemi závisí na typu problému a na tom, jak rychle je třeba jej vyřešit. Konkrétní informace o nákladech jsou obvykle obchodním tajemstvím každé společnosti. Jejich výši lze tedy pouze odhadovat. Mezi náklady spojené s AOG patří především náklady na údržbu, náklady na náhradní díly a dále například provozní náklady, náklady na leasing a případně odškodnění pro cestující. Tyto náklady jsou samozřejmě nepatrné ve srovnání s náklady na odstavení letadla. V tomto případě jde o nutnost dalších investic, kdy se dopravce rozhodl vrátit letadlo do provozu, ale nemůže tak učinit z důvodu AOG.

Pro představu bych však ráda uvedla, že v roce 2013 zveřejnila letecká společnost All Nipon Airways soukromé informace o nákladech na odstavení 17 svých Boeingů 787 Dreamliner kvůli nediodagnostikovatelným poruchám baterií. Za 90 dnů odstavení a údržbu zaplatila společnost 15 milionů amerických dolarů amerických. Z daných hodnot vychází, že společnost musela platit zhruba 9 804 amerických dolarů za každé letadlo za den. [29]

Na základě článku *How much does it cost to ground a B737 max aircraft for an airline?* [30] se lze domnívat, že náklady na údržbu letadla Boeing 737 NG odpovídají zhruba 75 % nákladů na údržbu letadla Boeing 787. To znamená, že den parkování letadla se stejným problémem s bateriemi mohl stát společnost zhruba 7 350 amerických dolarů.



Je důležité brát v potaz i devaluaci při inflaci, což vlastně znamená růst cen. Tím pádem lze předpokládat, že dnes by tyto náklady byly ještě vyšší.

6.3. Provozní opatření

V této kapitole budu zaměřena na popis možného provozního opatření k zamezení vlivu dlouhého stání na spolehlivost letadlového parku.

Jelikož pandemie Covid-19 zaskočila celý letecký průmysl a nikdo nevěděl, jak dlouho bude trvat, než se letadla vrátí do provozu, bylo na leteckých společnostech, aby svá letadla řádně připravily na dlouhodobé parkování. Každý systém letadla má svá specifika, která je třeba při údržbě letadla během dlouhodobého parkování zohlednit.

Podle pokynů od IATA pro řízení letové způsobilosti letadel pro provoz během pandemie a po ní [8] a také musí být zaprvé všechna okna zalepena tak, aby sluneční světlo nepoškozovalo interiér. Za druhé musí být podvozky a motory pečlivě zabaleny, aby se zabránilo korozi a hnízdění ptáků. Za třetí, otvory vystavené písku, špíně, vodě atd. musí být utěsněny a vzduchotěsně uzavřeny.

Kromě toho, že měla by být letadla náležitým způsobem připravena k dlouhodobému odstavení, údržba a kontroly měly by pokračovat. Letecké společnosti by měli zajistit, aby byla letadla průběžně udržována a kontrolována, a to opět s ohledem na specifika jednotlivých systémů. Například pneumatiky se musely jednou až dvakrát během čtrnácti dní otáčet, aby nedocházelo k jejich deformaci a vyboulení vlivem hmotnosti letadla, které na těchto místech spočívá.

Co se týče hydraulického systému, tak ten systém hraje velkou roli, hlavně proto, že jeho dobrý provozní stav je nutný pro provedení některých úkonů údržby, které jsou vyžadovány během doby parkování letadla. Pravidelná údržba hydraulického systému u zaparkovaného letadla by měla zahrnovat:

- kontrolu těsnosti hydraulického systému
- čištění a mazání ovládací páky hydraulických aktuátorů vystavených okolnímu prostředí



Jedním z dalších možných opatření, jak se vyhnout negativním dopadům dlouhodobého odstavení letadel nebo je omezit, je častější simulace běžného provozu za normálních podmínek. Letadla jsou konstruována a optimalizována pro létání, a proto takový krok může zabránit mnoha problémům, které by mohly nastat při návratu letadel do provozu po delší době odstavení.

Častější lety by však vyžadovaly více paliva, což by zvýšilo náklady leteckých společností na palivo. Kromě toho by se zvýšily náklady na údržbu a odbavení letadel na letištích. Zároveň by bylo zapotřebí více letového personálu, což by ovlivnilo náklady na pracovní sílu a mzdy. Z toho pak vyplývá, že tato možnost bohužel nese svá omezení z finančního hlediska.

Jako další opatření ke zvýšení provozní spolehlivosti letadel během dlouhého stání je vhodné zaměřit se na zvýšení počtu náhradních dílů uložených ve skladech pro případy AOG. Zvýšení počtu náhradních dílů ve skladech výrazně urychlí a usnadní návrat letadel do provozu po dlouhém odstavení, neboť čekací doba na náhradní díly se tak přiblíží nule. Společnosti budou moci rychleji a efektivněji reagovat na neplánované situace, což povede k celkovému zvýšení spolehlivosti letecké flotily.

Je však nutné pečlivě plánovat a kontrolovat úroveň zásob, aby bylo zajištěno, že náhradní díly budou správně identifikovány, skladovány a udržovány. Dále je důležité spolupracovat s výrobcí a dodavateli, aby byl k dispozici dostatek náhradních dílů a aby se minimalizovalo riziko chybějících součástí. Avšak při zvýšení skladových zásob by výrobci pravděpodobně byli velmi zatíženi a nemuseli by stíhat vyrábět potřebné součásti včas, kvůli velkému množství dílů a časovým omezením. Zde samozřejmě hraje roli i finanční stránka, protože zvýšení skladových zásob by vyžadovalo další investice.

Společnost nakonec přijala opatření v rámci povinných opatření dle příručky. Na závěr by se dalo říct, že opatření, která byla přijata společností pro letadla, byla to nejlepší, co bylo možné udělat v rámci dostupných možností. Opatření, která byla zmíněna výše, by sice situaci zlepšila a pravděpodobně by omezila vliv dlouhodobého parkování, ale z ekonomického hlediska se nevyplatí.



Diskuze

Vliv covid-19 v letectví je relativně novým, ale dostatečně populárním a široce diskutabilním tématem. Doposud však bylo provedeno jen málo studií o dopadu bezpečnostních opatření v odvětví letectví na spolehlivost letadel a komponentů letadel. Tato bakalářská práce nicméně poskytuje nové informace týkající se specifických problémů, zejména v souvislosti s hydraulickým systémem, které vznikly v důsledku dlouhého odstavení. I přesto, že pandemie byla oficiálně vyhlášena přibližně před třemi a půl lety, stále existuje nedostatek znalostí a nejistota ohledně budoucího vývoje a dopadu krize na letecký průmysl. Identifikace vlivu pandemie covid-19 na spolehlivost systémů letadel a jejich komponentů je proto stále aktuální a důležitou otázkou.

V této bakalářské práci byl zkoumán vliv dlouhodobého odstavení vyvolaného šířením koronavirové infekce na hydraulický systém letounu B737 NG a jeho dopad na spolehlivost součástí systému. Nejprve byly analyzovány všechny systémy letadla za pomoci výpočtu procentuálního rozdílu počtu poruch, které se objevily během dvou let, konkrétně v roce 2019, kdy byla letecká doprava opravdu úspěšná, a v roce 2020, kdy byla letadla zaparkována téměř po celý rok. Výsledné údaje byly nejprve rozděleny podle jednotlivých systémů a poté podle systémových komponentů letadla. Tímto způsobem byly nalezeny všechny systémy, které byly nejčastěji podrobeny neplánovaným kontrolám a údržbám. Výsledky statistických výpočtů jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

Není však možné vybrat systém, který bude analyzován, pouze na základě statistických údajů. Je nutné zohlednit také omezení, která vycházejí z nefunkčnosti konkrétního systému. Největší procentuální rozdíl byl zaznamenán u systému ATA 25, tedy systému vybavení (432,94 %). Mezi součástmi, které byly nejčastěji vyměňovány, patřily: záchranná vesta (3 347 záznamů v roce 2020, 104 záznamy v roce 2019); sada pro první pomoc (305 záznamů v roce 2020, 145 záznamů v roce 2019); pohotovostní lékárnička (199 záznamů v roce 2020, 131 záznamů v roce 2019). Velký rozdíl počtu závad v tomto systému byl způsoben tím, že u některých prvků systému již uplynula doba jejich expirace.

Druhým systémem podle nejčetnějších výměn byl systém osvětlení ze skupiny ATA číslo 33 (164,81 %). Komponenty, které byly nejčastěji podrobeny výměnám, byly: napájecí zdroj – baterie (289 zápisů v roce 2020, 14 zápisů v roce 2019); sestava osvětlení okének (44 zápisů v roce 2020, 24 zápisů v roce 2019); zdroj nouzového napájení (10 zápisů v roce 2020, 6 zápisů v roce 2019). Z toho plyne, že největší vliv na statistiku měly baterie. Takto výrazný



rozdíl v počtu záznamů byl způsoben vybitými bateriemi, které nebylo potřeba nabíjet během parkování. Nicméně tento problém s bateriemi by mohl být vyřešen jejich pravidelným nabíjením.

Třetím systémem s největší četností poruch byl systém vodní a odpadní, známý též jako ATA 38 (70,73 %). Nejvíce poruch v tomto systému byly zaznamenány u komponent: toaletní kohoutek (11 zápisů v roce 2020, 2 zápisy v roce 2019) a toalety (28 zápisů v roce 2020, 19 zápisů v roce 2019). Je důležité poznamenat, že u systému vodního a odpadního jsou všechny komponenty zálohovány, a tak větší problémy by mohly způsobit pouze ovládací kabely, které v statistice měly jen zanedbatelný počet zápisů.

S ohledem na výsledky uvedené výše byl pro analýzu vybrán hydraulický systém ze skupiny ATA 29 (60 %). Nejvíce poruch vykazovaly komponenty: čerpadlo poháněné motorem (12 zápisů v roce 2020, 5 zápisů v roce 2019); hydraulický filtr (5 zápisů v roce 2020, žádný zápis v roce 2019); převaděč množství – hydraulický systém (6 zápisů v roce 2020, 2 zápisy v roce 2019), jenž je na rozdíl od ostatních dvou prvků zálohován. Nicméně z nefunkčnosti daného systému pak plynou i jiné omezení, jako je například stav AOG.

Na základě výsledků výpočtů intenzity poruch a analýz provozních údajů bylo zjištěno, že dlouhodobé stání mělo negativní vliv na spolehlivost komponentů hydraulického systému letounu ATA29. Prudký nárůst počtu poruch během roku 2020, kdy byla letadlová flotila odstavena téměř na celý rok, naznačuje, že odstavení způsobilo řadu provozních komplikací a finančních potíží leteckému přepravci.

Klíčová zjištění ukazují, že se nejčastější poruchy komponentů hydraulického systému týkaly zejména čerpadel. Dlouhé stání způsobilo častější úniky, nedostatečný tlak a kontaminaci třískami u hydraulických komponentů. Kromě toho vedlo dlouhé parkování k narušení těsnění a snížení spolehlivosti systému. Tato zjištění nám naznačují, že hydraulické komponenty, navržené pro téměř nepřetržitý provoz, jsou náchylnější k problémům po delším stání. Navíc, odstavení letadel na letišti v Praze pod expozicí nepříznivému počasí, jako je déšť, sníh a vítr, přispělo k opotřebením a tím i ke snížení spolehlivosti komponentů systému. Dalším důvodem zvýšení počtu výměn komponentů během dlouhého stání je dostatečný čas a kapacita techniků mimo běžný letový režim. Lze se tak zaměřit na podrobnější kontroly a preventivní výměny.

Tato práce potvrzuje, že dlouhodobé odstavení mělo negativní dopad na spolehlivost letounu B737 NG, což je v souladu s výsledky některých dalších studií, které zkoumaly dopad



dlouhodobého stání na spolehlivost jiných typů letadel. Například, [31]. Zjištění popsaná v této bakalářské práci jsou však založena na konkrétních údajích z flotily letadel B737 NG a mohou se lišit od studií provedených na jiných typech letadel nebo s ohledem na jiné klimatické podmínky parkování. Ideální povětrnostní podmínky pro skladování letadlových trupů a částí, které zabrání korozi a poškození vnitřních dílů, nabízí suché pouštní klima. Bohužel, tyto ideální podmínky jsou k dispozici pouze v omezených oblastech světa, což vedlo k tomu, že mnoho letadel byla zaparkována přímo na ranvejích svých domovských nebo uzlových letišť.

Jedním z omezení této práce je, že byly použity pouze údaje z flotily letadel typu B737 NG od pouze jedné letecké společnosti. Kromě toho omezením může být skutečnost, že tato práce procházela třemi systémy, kdy pro následnou analýzu byl vybrán systém hydraulický, a to z důvodu jeho důležitosti pro letovou způsobilost letadla. Ostatní systémy byly mimo rozsah této práce, a proto jejich reakce není podrobněji rozebrána.

Silnou stránkou dané práce je identifikace konkrétních problémů hydraulického systému způsobené dlouhodobým odstavením. Byly úspěšně získány relevantní a důležité informace, které mohou být užitečné pro letecké společnosti, které čelí problémům v souvislosti s dlouhodobým odstavením, při plánování údržby svých letadel. K omezení tohoto vlivu by měli letečtí přepravce dodržovat předepsané pokyny pro dlouhodobé parkování. Kromě toho bylo navrženo několik dalších opatření. Jedním z možných opatření, které může pomoci zabránit negativním dopadům dlouhodobého odstavení letadel nebo minimalizovat je, je častější provádění technických letů. Tímto způsobem je možné simulovat běžný provoz za normálních podmínek. Díky tomuto kroku lze předejít mnoha problémům, které by mohly nastat při návratu letadel do provozu po dlouhém období odstavení, neboť letadla jsou navržena a optimalizována především pro létání. K dalším možným opatřením, která mohou přispět ke zvýšení provozní spolehlivosti letadel během dlouhodobého odstavení, patří rozšíření zásob náhradních dílů ve skladech pro rychlé řešení situací AOG. V každém případě musí letecký přepravce zvážit výhody a nevýhody uvedených řešení.

Další výzkumy na toto téma by mohly zkoumat i vliv dlouhodobého odstavení na jiné typy letadel, nejen B737 NG, a porovnat dopady dlouhodobého odstavení na různé systémy těchto letadel, aby se zjistilo, zda některé prvky jsou schopny odolat dlouhodobému parkování. Bylo by také užitečné provést dlouhodobé sledování a analýzy spolehlivosti součástí různých systémů letadel, která byla na delší dobu odstavena a poté opět uvedena do provozu. To by umožnilo lépe pochopit důsledky dlouhodobého odstavení na spolehlivost komponentů systémů.



Závěr

Cílem dané bakalářské práce je identifikovat vliv dlouhého stání na flotilu letadel z pohledu spolehlivosti jejich systémů a komponentů. Dlouhé stání bylo způsobeno šířením onemocnění covid-19, samoizolací a karanténou, kvůli čemuž byla letecká doprava celosvětově téměř zastavena a letadla byla odstavena.

Při psaní dané práce byly nejdříve zjištěny systémy letadel, které vykazovaly nejnižší spolehlivost při porovnání s ostatními, a to během dvou let. Na základě výsledků statistické analýzy provozních údajů bylo zjištěno, že dlouhodobé stání mělo negativní vliv na spolehlivost řady letadlových systémů jako jsou ATA 25 – vybavení, ATA 33 – osvětlení, ATA 38 – vodní a odpadní systém, ATA 29 – hydraulický systém a jiné. Zajímavé je, že byl odhalen i systém, u něhož se počet závad v roce 2020 zřejmě snížil. Jedná se o ATA 73 – palivový systém a ovládaní pohonné jednotky.

Nejvýraznější změny byly odhaleny u systému vybavení ATA 25, jednalo se však pouze o expiraci některých z prvků systému, což vůbec nemělo vliv na spolehlivost letadlové flotily. Dalším systémem z hlediska nejvyšší četnosti poruch je systém osvětlení neboli ATA 33. U tohoto komponentu se většinou jednalo o vybité baterie, které se během odstavení nenabíjely z toho důvodu, že nebylo potřeba nabíjet, proto by k vyřešení tohoto problému stačilo baterie nabít. Jinak se jednalo o komponenty, které neměly vliv na provozuschopnost letadla. Třetím systémem s nejvyšší četností poruch byl vodní a odpadní systém ze skupiny ATA 38. U daného systému jsou všechny komponenty zálohovány, a větší komplikace mohou způsobit pouze ovládací kabely, již měly ve statistice opravdu malý počet zápisů.

K provedení analýzy byl potom vybrán letadlový hydraulický systém z ATA kapitoly číslo 29. K identifikaci vlivu dlouhého stání na vybraný letadlový systém pak byl hydraulický systém analyzován pomocí metody zvané strom poruchových stavů, aby byly zjištěny kritické poruchové stavy a jejich možné následky na letadlo jako celek. Mimo jiné byly provedeny výpočty parametrů charakterizujících spolehlivost komponentů. Tím způsobem byly odhaleny nejméně spolehlivé komponenty systému. Jednalo se zejména o čerpadla.

FTA analýza a další statistické výpočty odhalily důsledky dlouhého stání na hydraulický systém letadlové flotily společnosti Smartwings. Důvody výměn komponentů, hlavně tedy pump, byly zejména vnější únik, nedostatečný tlak a kontaminace třískami. Kromě toho trpěly komponenty systémů nepříznivým počasím, kterému byla letadla vystavena během odstavení na letišti.



Zvýšení počtů poruch komponentů systému po roce odstavení vedlo k řadě negativních dopadů na provozuschopnosti letadlové flotily. Jedním z takových dopadů byl nárůst doby, kterou letadla trávila v servisu. S rostoucím počtem poruch se snížila průměrná doba do poruchy. Dalším negativním důsledkem plynoucím z častěji prováděné údržby a kontroly je zvýšení nákladů letecké společnosti na údržbu letadla. Příčin výše zmíněných jevů bylo několik a byly popsány v předchozí kapitole.

K omezení negativního vlivu dlouhodobého odstavení letadel byla navržena sada opatření. Jedním z takových opatření je zvýšení frekvence simulací běžného provozu za standardních podmínek, resp. technických letů. Tímto krokem by bylo možné předejít mnoha potenciálním problémům, které by mohly vzniknout při návratu letadel do provozu po dlouhém období parkování, neboť letadla jsou primárně konstruována a optimalizována pro létání. Dalším opatřením, které napomáhá zvýšit provozní spolehlivost letadel během dlouhodobého odstavení, je rozšíření zásob náhradních dílů ve skladech, což umožňuje rychlé řešení situací AOG. Nicméně obě opatření nesou své nevýhody, zejména z ekonomického hlediska. Zvýšení frekvence letů by vyžadovalo zvýšení nákladů na palivo, údržbu a odbavení letadel na letišti, a také by bylo nutné zaměstnat více letového personálu, což by ovlivnilo náklady na pracovní sílu a mzdy.

Z toho vyplývá, že opatření, která byla společností přijata, představují optimální kroky, které byly možné provést s ohledem na dostupné možnosti. Přestože by tato opatření pravděpodobně zlepšila situaci a omezila dopady dlouhodobého parkování, ekonomicky se jeví jako nevýhodná.

Tato práce přináší důkladný pohled na problematiku vlivu dlouhého stání na letadla z hlediska jejich systémů a komponentů. Současně hodnotí dopad pandemie na spolehlivost letadlových komponentů a může sloužit jako zdroj pro další analýzy tohoto dopadu v budoucích letech.



Seznam použité literatury

- [1] SVISCHEV, Georgiy. Aviatsiya, Bolshaya Rossiyskaya Entsyklopediya, 1994. ISBN: 5-85270-086-X.
- [2] MYKISKA, Antonín; LEGÁT, V.; VINTR, Zdeněk. Provozní spolehlivost výrobních zařízení. Praha: ČSPÚ – Česká společnost pro údržbu.
- [3] HOLUB, Rudolf; VINTR Zdeněk. Spolehlivost letadlové techniky. Brno: VUT, Fakulta Strojního inženýrství.
- [4] Advisory Circulars (ACs). Federal Aviation Administration. [Online] Dostupné z: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_23_1309-1E.pdf
- [4] BIROLINI, Alessandro. Reliability Engineering [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017 [cit. 2022-07-04]. ISBN 978-3-662-54208-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-54209-5
- [5] 35. SETKÁNÍ ODBORNÉ SKUPINY PRO SPOLEHLIVOST. Analýzy spolehlivosti a bezpečnosti v praxi. Brno, červen 2009. [online]. Dostupné z: https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/192_35Sbornik_Analyzy_spolehlivosti.pdf
- [6] MYKISKA, Antonín. Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02868-2.
- [7] ČSN EN 13306: 2011 Údržba - Terminologie údržby. 2011. Praha: Český normalizační institut, 2011. 52 s.
- [8] HOLUB, Rudolf; VINTR, Zdeněk. Základy spolehlivosti technických systémů. Brno: Vojenská akademie v Brně.
- [9] Fault Tree Handbook. [online]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1007/ML100780465.pdf>
- [10] Fault Tree Analysis. Weibull.com [online]. Dostupné z: <https://www.weibull.com/basics/fault-tree/index.htm>



- [11] 60. SEMINÁŘ ODBORNÉ SKUPINY PRO SPOLEHLIVOST. PREDIKTIVNÍ ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ. [online]. Dostupné z: https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/192_60CSJ_OSS_SBORNIK_2015_final.pdf
- [12] Simple Examples: Fault Tree & RBD Representations. Relationship of an OR Gate & RBD. Weibull.com [online] Dostupné z : <https://www.weibull.com/basics/fault-tree/orgate.htm>
- [13] Simple Examples: Fault Tree & RBD Representations. Relationship of an AND Gate & RBD. Weibull.com [online] Dostupné z : <https://www.weibull.com/basics/fault-tree/andgate.htm>
- [14] KOCUREK, Jaromír. FMEA. [online] Dostupné z: <https://www.vlastnicesta.cz/metody/fmea/>
- [15] FMEA – Vyhodnocení rizik. [online] Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/fmea/>
- [16] What Is CAMO Certified? Excellence Aviation Services. Dostupné z: <https://excellence-aviation.com/camo-certified/>
- [17] ŽEŽULA, Jiří. Provoz a údržba letadel. *Flying Revue* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.flying-revue.cz/provoz-a-udrzba-letadel>
- [18] AviationHunt Team. Overview of Aircraft Maintenance. Dostupné z: <https://www.aviationhunt.com/aircraft-maintenance/>
- [19] MEL, MMEL, NEF: What are you required to have? [online] Dostupné z: <https://aviationmanuals.com/resources/mel-mmef-nef-what-are-you-required-to-have/>
- [20] International Civil Aviation Organization. Guidance on economic and financial measures to reduce the impact of the coronavirus outbreak on aviation. Dostupné z : <https://www.icao.int/covid/Pages/default.aspx>
- [21] ZAHEER, Allam, Chapter 7 – Vital COVID-19 Economic Stimulus Packages Pose a Challenge for Long-Term Environmental Sustainability, Editor(s): Zaheer Allam, Surveying the Covid-19 Pandemic and its Implications, Elsevier, 2020, pp. 97-105.8.00007-3



[22] IATA Guidance for Managing Aircraft Airworthiness for Operations During and Post Pandemic. Edition 2–07 October 2020. Dostupné z: <https://www.iata.org/contentassets/d0e499e4b2824d4d867a8e07800b14bd/iata-guidance-managing-aircraft-airworthiness-during-post-pandemic.pdf>

[23] ICAO. Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. Economic Development – Air Transport Bureau. Online. Dostupné z: https://www.icao.int/sustainability/Documents/Covid-19/ICAO_coronavirus_Econ_Impact.pdf

[24] Flightradar24 Blog. How airlines have managed their fleet mix during the COVID-19 pandemic. Online. Dostupné z: <https://www.flightradar24.com/blog/how-airlines-have-managed-their-fleet-mix-during-the-covid-19-pandemic/>

[25] Cabin Crew Operations Manual. G-MN-09. Smartwings. 3rd revision. 07Nov 2022. [pdf]

[26] BOEING. *Boeing Maintenance Manual: B737 NG 600/700/800/900*. 2019.

[27] MTBF, MTTR, MTTA, and MTTF. [online]. Dostupné z: <https://www.atlassian.com/incident-management/kpis/common-metrics>

[28] Understanding MTTF, MTBF, MTTD, and MTTR in Aircraft Maintenance Engineering: A Comprehensive Analysis. [online]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-mttf-mtbf-mtt-d-mttr-aircraft-analysis-sandirajah>

[29] TOPHAM, James. ANA counts cost of grounded 787, not yet seeking damages. *Reuters* [online]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-boeing-dreamliner-ana-january/ana-counts-cost-of-grounded-787-not-yet-seeking-damages-idUSBRE90U06T20130131>

[30] How much does it cost to ground a B737 max aircraft for an airline? AVIATION: Stack exchange [online]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/64393/how-much-does-it-cost-to-ground-a-b737-max-aircraft-for-an-airline>

[31] Parking Effects on Aircraft Reliability and Flight Performance. Embry-Riddle Aeronautical University. São Paulo, Brazil. November 2020. [online]. Dostupné z: <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=brazil-graduate-works>



[32] Here's What You Do With Two-Thirds of the World's Jets When They Can't Fly
<https://www.bloomberg.com/news/features/2020-04-16/coronavirus-travel-what-happens-to-planes-grounded-by-covid-19>

[33] Popis hydraulického systému (přeloženo z ruštiny). [online]. Dostupné z:
https://studopedia.ru/4_143616_opisanie-gidravlicheskoy-sistemi.html



Přílohy

Příloha 1: Výsledný strom FTA hlavního hydraulického systému

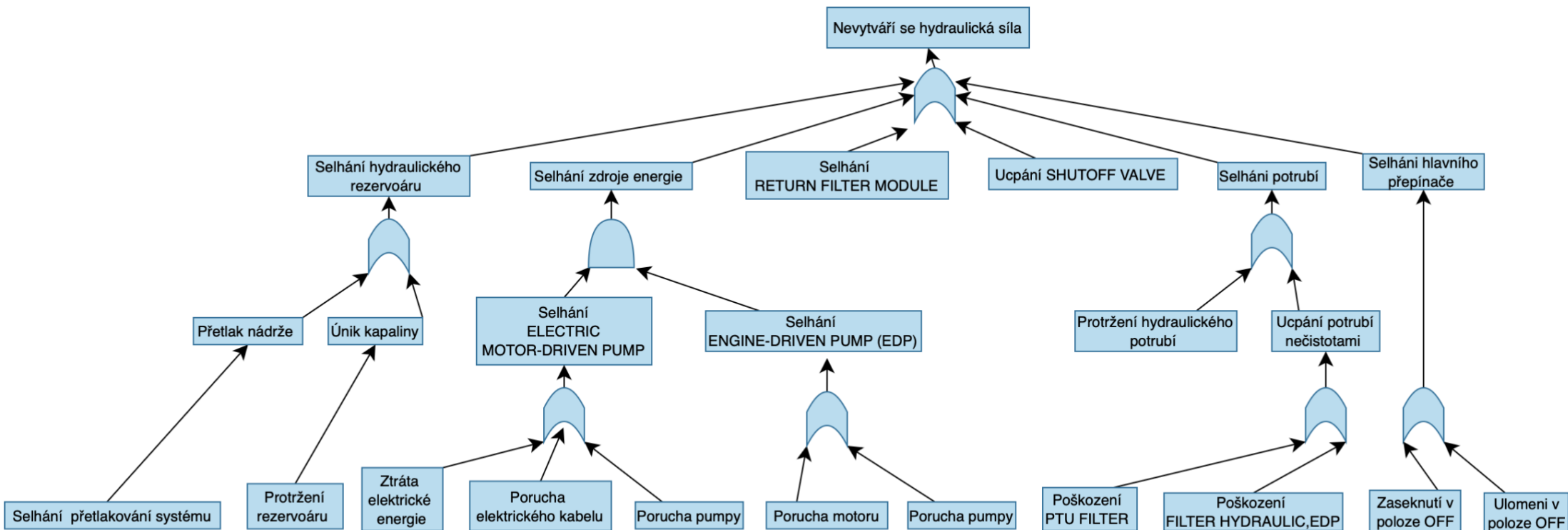
Příloha 2: Výsledný strom FTA záložního hydraulického systému

Příloha 3: Potvrzení validace výsledků bakalářské práce



Příloha 1.

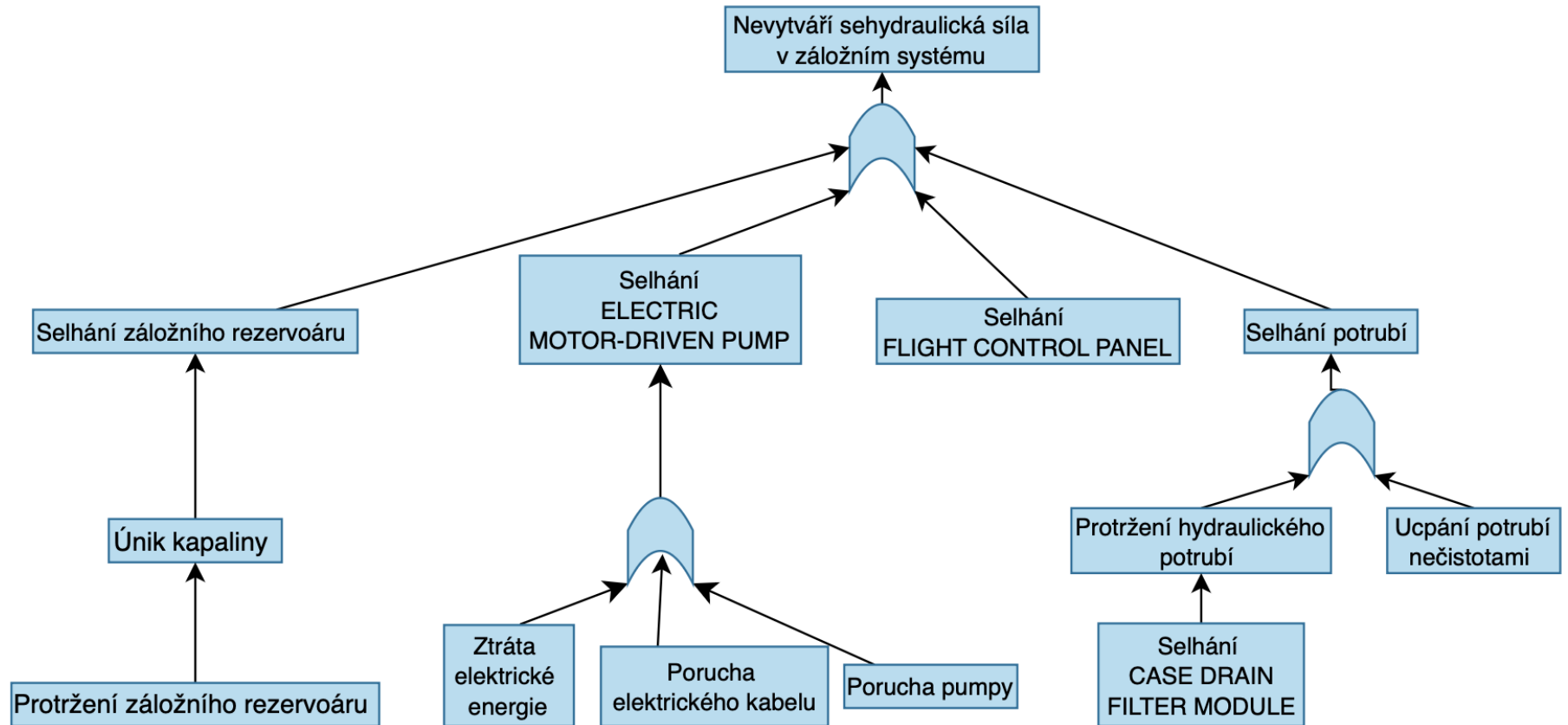
Výsledný strom FTA hlavního hydraulického systému





Příloha 2.

Výsledný strom FTA záložního hydraulického systém





Příloha 3.

Potvrzení validace výsledků bakalářské práce



V Praze, 4. 8. 2023

Validace výsledků bakalářské práce.

Po prostudování bakalářské práce slečny Mensheniny *Technické aspekty flotily letadel s dlouhým stáním* prohlašuji, že práce byla provedena důkladně a získané výsledky jsou validní a relevantní pro zkoumané téma. Zjištění uvedená v práci mohou přispět k lepšímu pochopení vlivu dlouhodobého odstavení na spolehlivost systémů letadla a poskytnout leteckým společnostem užitečné informace při plánování údržby a předcházení případným problémům.

Ing. Pavel Hovorka,

Technical Support Engineer ve společnosti Smartwings a.s.