



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

METODY ANALÝZY SPOLEHLIVOSTNÍCH DAT Z PROVOZU A ZKOUŠEK LETADEL

METHODS OF RELIABILITY ANALYSES OF OPERATION AND TESTING DATA OF
AIRPLANES

TÉZE DOKTORSKÉ PRÁCE
PHD THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JOSEF NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL TŘETINA, CSc.

BRNO 2011

Abstrakt

Doktorská práce se zabývá možnými způsoby analýzy spolehlivostních dat z provozu a zkoušek letadel. Požadavky amerického leteckého předpisu FAR 23 a evropského ekvivalentu CS 23 na certifikaci hydraulických soustav jsou brány v úvahu. Tyto předpisy pokrývají širokou oblast letounů od sportovních až po 19 místné určené pro tzv. sběrnou dopravu.

V doktorské práci jsou uvedeny možné vstupy do prediktivních analýz spolehlivosti (testová a provozní data, komerční databáze). Praktická aplikace je provedena na podvozkové hydraulické soustavě vyvíjeného malého dopravního letounu. Je navržena karta poruch pro sběr provozních dat.

Hlavní přínos práce by měl být výběr a aplikace nejvhodnějších postupů pro zajištění předepsané úrovně bezpečnosti leteckých hydraulických soustav. Je ukázáno, které postupy jsou vhodné a které nikoliv. Jsou porovnána možná vstupní data pro spolehlivostní analýzy a uvedeny závěry. Složité elektronické soustavy, ale i hydraulické jsou běžnou součástí i menších letadel. Zde se jedná o kategorii, která tvoří hlavní náplň českého leteckého průmyslu.

Abstract

The doctoral thesis deals with reliability (dependability) analyses of operation and testing data of the Airplanes. Requirements of airworthiness regulations on aircraft hydraulic systems (with a focus on US FAR-23 and European CS-23 regulations) are taken into account. Mentioned regulations include requirements for the structural design, design of systems, etc. They cover wide range of airplanes from small sport airplanes to 19-seats transport aircraft. Also options for predictive reliability analyses (resources) and reliability tests are discussed in the doctoral thesis. Practical application is done on small transport airplane (currently in the development). The failure report is designed.

Expected major contribution of the work is selection and practical application of the most suitable procedures for safety assessment on the field of aircraft hydraulic systems, with a focus on the small transport aircraft. Also the comparison to different data source is shown.

Klíčová slova

Zkoušky spolehlivosti, spolehlivost, bezporuchovost, letadlová technika, intenzita poruch, prediktivní analýzy spolehlivosti, FMEA, RBD, FTA

Key Words

Reliability testing, dependability, reliability, aircraft, failure rate, predictive reliability analyses, FMEA, RBD, FTA

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat prof. Ing. Antonínu Píštěkovi, CSc. za pomoc poskytnutou při vypracování disertační práce a za možnost praktické aplikace popisovaných metod analýz v rámci Leteckého ústavu. Dále děkuji doc. Ing. Karlu Třetinovi, CSc. za poskytování odborných konzultací a pomoc při řešení úkolů souvisejících s tématem disertační práce. Poděkování patří také Ing. Janu Hyskému a doc. Ing. Jiřímu Hlinkovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad, za informace a zkušenosti z řešení problematiky spolehlivosti v leteckém průmyslu.

OBSAH

KAPITOLA	NÁZEV	STRANA
	POUŽITÉ ZKRATKY	5
	POUŽITÉ OZNAČENÍ	5
1	ÚVOD.....	6
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
3	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	8
3.1	HISTORIE ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY	8
3.2	SPOLEHLIVOST A ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI LETECKÉ TECHNIKY	9
3.3	PREDIKTIVNÍ ANALÝZY SOUSTAV LETADEL	10
4	METODY ZPRACOVÁNÍ DATOVÝCH SOUBORŮ.....	11
4.1	OBEČNÉ POSTUPY ZKOUŠEK SPOLEHLIVOSTI.....	11
4.2	VÝBĚR METOD PRO URČENÍ UKAZATELŮ SPOLEHLIVOSTI	13
4.3	PLÁNOVÁNÍ A ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI	16
4.4	ANALÝZA PROVOZNÍCH DAT	16
4.5	AKCEPTOVATELNÉ PRŮMYSLOVÉ STANDARDY	17
4.6	NÁVODY SBĚRU DAT	19
4.7	SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZA HYDRAULICKÉ SOUSTAVY MALÉHO DOPRAVNÍHO LETOUNU	20
4.8	TABULKA VSTUPNÍCH DAT.....	21
4.9	FMEA	21
4.10	BLOKOVÝ DIAGRAM PODVOZKOVÉ SOUSTAVY	23
4.11	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	25
5	VÝSLEDKY PRO PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU	26
6	ZÁVĚR.....	28
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
8	SEZNAM PRACÍ VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTAČNÍ PRÁCI	30
9	OHLASY	30

Použité zkratky

AC	Advisory Circular – Poradní oběžník (součást leteckých předpisů FAR a CS)
AMSAA	Army Materiel Systems Analysis Activity
CS	Certifications Specifications – Specifikace pro certifikaci
EASA	European Aviation Safety Agency – Evropská agentura pro bezpečnost letectví
IEC	International Electrotechnical Commission – Mezinárodní elektrotechnická komise
FAR	Federal Aviation Regulations – Federální letecké předpisy
FHA	Functional Hazard Assessment – Rozbor funkčních rizik (obdobu „předběžné analýzy rizik“)
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis – Analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků (někdy též: Analýza způsobů a důsledků poruch)
FTA	Fault Tree Analysis – Analýza pomocí stromu poruchových stavů, často značená pouze FT
LÚ	Letecký ústav, VUT FSI v Brně
MTBF	Mean Time Between Failures – Střední doba mezi poruchami
PFHA	Preliminary Functional Hazard Assessment – Předběžné hodnocení nebezpečnosti funkcí
RBD	Reliability Block Diagram Analysis – Analýza spolehlivosti pomocí blokových schémat
VZLÚ	Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

Použité označení

$f(x)$	- funkce hustoty pravděpodobnosti
$F(x)$	- distribuční funkce
MTBF	- střední doba mezi poruchami (Mean Time Between Failures)
$P(A)$	- pravděpodobnost nastoupení jevu A
Q	- pravděpodobnost nastoupení poruchy
r	- počet poruch, počet platných poruch během zkoušek
R	- pravděpodobnost bezporuchového provozu (Reliability)
T_{OE}	- ekvivalentní doba zkoušky
T^*	- celková kumulovaná doba zkoušky
$t_p(\nu)$	- hodnota kvantilu Studentova rozdělení
$\alpha(\hat{\alpha})$	- hodnota (odhad) parametru měřítka Weibullova rozdělení
$\beta(\hat{\beta})$	- hodnota (odhad) parametru tvaru Weibullova rozdělení
γ	- úroveň konfidence
λ	- okamžitá intenzita poruch (Instantaneous Failure Rate)
$\mu, (\hat{\mu})$	- střední hodnota (odhad střední hodnoty)
$\sigma(\hat{\sigma})$	- hodnota (odhad) směrodatné odchylky
χ^2	- hodnota rozdělení chí-kvadrát

1 Úvod

Přijatelná úroveň bezpečnosti byla vždy jedním z nejdůležitějších požadavků v civilním letectví již od samého počátku. Pojem akceptovatelná úroveň bezpečnosti se postupem let vyvíjel a posouval se k vyšší úrovni bezpečnosti. Postupem času (60. léta minulého století) se požadavky na spolehlivost stávají součástí stavebních předpisů nejprve pro dopravní letouny, pak i pro sportovní letadla a zároveň nutnou podmínkou při certifikaci letadla.

Letouny vyvíjené v dnešní době včetně sportovních již nelze označit za „relativně jednoduché“, jak tomu bylo dříve, v minulosti většina letadel měla obdobnou strukturu sestávající z křídla, trupu, ocasních ploch, podvozku, pohonné jednotky a jednoduchého mechanického systému řízení. U těchto jednoduchých letadel bylo možné deterministicky předepsat návrhové postupy (včetně výpočtových postupů používajících koeficienty bezpečnosti), které zajistí určitou úroveň spolehlivosti letadla. Tato úroveň byla prověřená historickými zkušenostmi z podobných konstrukcí.

S poválečným rozvojem velkých dopravních letadel, které současně obsahovaly nové typy soustav (hydraulické, elektronické, ...) přestal tento přístup dostačovat. Bylo třeba najít nové postupy, které zaručí bezpečnost cestujících a posádky. Řešení bylo nalezeno v analýzách bezpečnosti. Tyto soustavy se staly nedílnou součástí i malých sportovních letadel.

Pro certifikaci letounů i této kategorie je pak nutné vypracovat spolehlivostní analýzy, tento přístup nebyl dosud běžný. Pro tyto analýzy je důležité znát různé parametry o spolehlivosti použitých součástí. Jejich věrohodnost se pak odráží v závěrech o celé soustavě. Jedná se tedy o velmi důležitý parametr, respektive základní podmínku správné analýzy.

Tato data mohou být různého původu. Mohou být z provozu stávajících letadel, z komerčních databází a ze zkoušek spolehlivosti. Jejich dostupnost pro analýzy může být komplikovaná.

Další neméně důležitou oblastí, kromě určení dat pro analýzy spolehlivosti, je určení provozní spolehlivosti, která se dostává i do mnoha komerčních smluv týkající se nejen letounů, ale i dalších průmyslových produktů. Problematika úzce souvisí s moderními postupy údržby.

2 Cíle disertační práce

Práce navazuje na předchozí práce vytvořené na Leteckém ústavu VUT v Brně, věnované metodám posuzování spolehlivosti letadlové techniky např. literatura [16] a rozšiřuje je o oblast zkoušek spolehlivosti.

Úvod práce je věnován seznámení s historií a požadavky předpisů vydaných EASA a FAA, norem v oblasti vyhodnocení provozních dat, zkoušek spolehlivosti a matematickými nástroji. Použity jsou zejména předpisy týkající se menších letadel certifikovaných podle CS 23 a FAR 23. Následující část je věnována návodům sběru dat, plánování zkoušek a zpracování dat ze zkoušek spolehlivosti ve spolupráci se společností Jihlavan, a.s.. Jedná se o hydraulické přístroje a soustavy. V další kapitole je provedena spolehlivostní analýza vybrané hydraulické soustavy malého dopravního letounu (podvozková). Dále je provedeno porovnání s několika zdroji vstupních dat. Z provozních dat z použitých přístrojů od výrobce, komponentními zkouškami nových přístrojů a komerčními databázemi. V těchto kapitolách je aplikována spolupráce s průmyslem při praktickém vývoji malého dopravního letounu.

Zjištěné poznatky a srovnání jsou shrnuty do návodů, kde se nachází doporučení pro použití vstupních dat v analýzách. Taková srovnání a doporučení nejsou zatím k dispozici. Vzhledem k častější aplikaci spolehlivostních analýz a aplikaci i tam, kde to nebylo dříve běžné, platí stále pravidlo, že vstupní data jsou základní podmínkou správné spolehlivostní analýzy. Dále jsou zpracována doporučení pro návrh databázových programů vyhodnocující provozní spolehlivost, návrh tzv. karty poruch. Řešení zapadá do celkové koncepce aplikace moderních metod zajištění bezpečnosti a spolehlivosti letadlové techniky v kategorii všeobecného letectví (General Aviation) a úzce souvisí s problematikou řešení údržby s využitím moderních postupů s ohledem na ekonomické aspekty.

Jednotlivé cíle:

1. *získání a shrnutí dostupných informací v oblasti zkoušek a vyhodnocování provozních dat*
2. *vytvoření návodů při sběru dat, návrhu a plánování zkoušek, vyhodnocení a zpracování dat*
3. *provedení analýzy spolehlivosti na hydraulické podvozkové soustavě malého dopravního při spolupráci s průmyslem (firmy Jihlavan, a.s., Evektor, spol. s r.o.) při vývoji malého dopravního letounu*
4. *aplikace prediktivních postupů analýz inherentní spolehlivosti využívající pro odhady úrovně spolehlivosti akceptované průmyslové standardy (komerční databáze), standové zkoušky a provozní data*
5. *vypracování závěrů z provedených prediktivních analýz spolehlivosti s různými vstupními daty a návodů pro použití uvedených dat v analýzách spolehlivosti*
6. *zpracování podkladů a návrhů pro doplnění softwarové aplikace zabývající se zpracováním dat z provozu a zkoušek a doporučení pro návrh databázových programů vyhodnocujících provozní spolehlivost, návrh tzv. karty poruch*

3 Současný stav řešené problematiky

3.1 Historie řešení problematiky

Matematické základy v oblasti spolehlivosti objektů byly položeny ve 30. a 40. letech 20. století. Použití balistických raket a letecké techniky za II. světové války vedlo k vymezení nového oboru - spolehlivost. Poválečná léta přinesla rozvoj techniky a kosmických letů. Vůdčí velmocí se staly Spojené státy americké, kde byla zpracována řada postupů a metod vypracovaných např. v NASA. Použití složitých konstrukcí a soustav u dopravních letadel přináší rozšíření těchto metod v celosvětovém měřítku.

V Československu byly vytvořeny spolehlivostní analýzy, které byly zaměřeny na bezpečnost jaderných elektráren (Ústav jaderného výzkumu Řež) a leteckou techniku. V omezené míře u letounu Z-37, kde se řešila únava (subvlastnost spolehlivosti), dále u L 410, L 610, L-39. U letounu L-39, výrobce Aero Vodochody, a.s., se u několika soustav sledovala provozní spolehlivost. Významnou roli má Aircraft Industries, a.s. (bývalý Let Kunovice), kde se nadále sleduje provozní spolehlivost uvedeného letounu L 410. Údaje o provozní spolehlivosti soustav a jednotlivých přístrojů jsou shromažďovány, dále jsou zpracovány výrobcem, např. Jihlavan, a.s. a odesílány dozorujícímu Úřadu pro civilní letectví. Další významnou roli v oblasti spolehlivosti má VZLÚ a Výzkumný ústav stavebních a zemních strojů. Jsou publikovány normy, které řeší problematiku spolehlivosti.

V 90. letech minulého století nejen v České republice dochází k útlumu letecké výroby. Dnešní doba přináší postupné oživení leteckého průmyslu. Jsou vypracovány spolehlivostní analýzy pro L-159, při certifikaci letounu Ae 270, VUT 100 a nyní vyvíjeného malého dopravního letounu EV 55.

Vznikají vědecké práce zabývající se spolehlivostí letadel a aplikací moderních metod analýz pocházející např. z VZLÚ, Univerzity obrany (UO Brno) a také z VUT FSI v Brně.



Obr. 3.1: L 410 M, VUT 100, EVE 55, zdroj: J. Hlinka a [26]

3.2 Spolehlivost a zkoušky spolehlivosti letecké techniky

Předpisy FAR 23 [1], CS 23 jsou stanovené obecné požadavky při návrhu a certifikaci na spolehlivost. Nalezneme je v poradním oběžníku AC 23.1309 [2]. Zde jsou uvedeny maximální přípustné pravděpodobnosti nastoupení událostí a další podmínky.

Pokud jsou vyžadovány zkoušky pro průkaz vybraných prvků podle těchto požadavků, pak se jimi řídí výrobci nebo certifikační zkušebny.

Simulace provozu je základ zkoušek spolehlivosti. Vzhledem k požadovaným nízkým pravděpodobnostem událostí, musí mít i jednotlivé prvky velmi nízkou pravděpodobnost selhání neboli intenzitu poruch. Nejen proto jsou zkoušky finančně a časově velmi náročné. V některých případech není navíc možné prokázat v dostupném čase požadované parametry (např. extrémně nízké intenzity poruch – obzvláště u mechanických prvků). Často se omezují na skupinu základních prvků. Další doporučení pro zkušební prostředí a postupy palubních zařízení je dán v RTCA/DO-160D [3].

Základní požadavky předpisů je možné stručně shrnout následovně:

Doporučení poradního oběžníku AC 23.1309

- **selhání samostatného prvku nesmí způsobit katastrofickou událost,**
- **max. přípustné pravděpodobnosti nastoupení událostí jsou vztaženy k jejich důsledkům**

Hodnota max. přípustné pravděpodobnosti nastoupení události s katastrofickými důsledky pro letouny sběrné dopravy (třída 4) je totožná s dopravními letouny vyšší kategorie. Vychází z požadavku (vydedukovaného na základě historických statistik), aby u tohoto typu letounů míra katastrof nepřevýšila počet **1 katastrofická nehoda na 10^7 hodin**. Pokud navíc budeme uvažovat, že u každého letounu mohou nastat řádově stovky událostí s katastrofickými důsledky, vychází pro max. přípustnou pravděpodobnost nastoupení každé takové události požadavek, aby pravděpodobnost nastoupení katastrofické události byla menší než 10^{-9} na 1 letovou hodinu. Obdobným způsobem byly stanoveny číselné požadavky pro letouny všeobecného letectví.

Požadavky předpisů na zkoušky spolehlivosti (CS 23, FAR 23), odkazují na standardní postupy při vyhodnocování dat a zkoušek z provozu letadel.

Vhodné a používané postupy se nacházejí v mezinárodních normách vydaných IEC (International Electrotechnical Commission – Mezinárodní elektrotechnická komise) nebo lze použít vojenské standardy MIL (původem z USA).

V případě norem IEC se jedná o široce akceptovaný standard. Tyto normy řada států přejala za své národní normy, včetně České republiky. V ČR jsou tyto normy označovány jako ČSN IEC. Pro provádění odhadů je podstatná norma ČSN IEC 60605-4 literatura [20].

Vojenské standardy MIL udávají postupy použitelné při vyhodnocování datových souborů získaných z provozních dat a ze zkoušek spolehlivosti. Výhodou těchto standardů je jejich široká dostupnost. Jsou také široce uznávané jako informační zdroj. Pro účely vyhodnocení dat lze použít postupy uvedené v MIL-HDBK-338B [8].

3.3 Prediktivní analýzy soustav letadel

Pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti se již ve fázi návrhu využívají prediktivní postupy odhadu úrovně spolehlivosti. Tyto postupy využívají obvykle následující metody: FHA, FMEA, RBD a FTA. Součástí disertační práce je porovnání výstupů z těchto metod s analýzou provozních dat a různých zdrojů vstupních dat.

Poradní oběžník AC 23.1309 doporučuje k prokázání bezpečnosti a bezporuchovosti níže uvedené metody. Detailní postupy a návody k řešení jsou obsaženy v normách SAE (The Engineering Society For Advancing Mobility in Land, Sea, Air and Space) jako jsou ARP 4754 a 4761 [12].

Stručný popis metod prediktivní analýzy:

- **FHA** (Functional Hazard Assessment) – Funkční analýza rizik se používá od ranných fází návrhu až po certifikaci. Obvykle zahrnuje seznam základních funkcí a poruchových stavů letounu. FHA je systematické prověření funkcí (ve všech fázích letu) a často je rozdělena na úroveň letadla a úroveň soustav. Jde o základní dokument pro navazující detailní analýzy (výběr soustav pro detailní analýzy je založen na FHA letadla).
- **FMEA/FMECA** (Failure Mode and Effects Analysis / Failure Mode, Effects and Critically Analysis) – Analýza způsobů a důsledků poruch (Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch) se používá k identifikaci důsledků poruch samostatných prvků. Je tak prokazována shoda s požadavkem, aby „nevznikl katastrofický poruchový stav v důsledku selhání jednoho prvku“. Dále prokazuje, že u žádného prvku nepřevýší pravděpodobnost nastoupení jednotlivých poruchových stavů povolené max. hodnoty pravděpodobností. Analýzy FMEA/FMECA používají prakticky všichni výrobci větších letadel (u nás například AERO Vodochody, a.s. či dříve LET Kunovice, dnes Aircraft Industries, a.s.).
- **RBD** (Reliability Block Diagrams) – Blokované diagramy bezporuchovosti jsou společně s FTA používány pro analýzu složitých poruchových stavů (současné selhání více prvků). Obvykle je jejich použití omezeno na poruchové stavy s nebezpečnými (HAZARDOUS) nebo katastrofickými (CATASTROPHIC) důsledky. Blokované diagramy bezporuchovosti byly často používány např. v Aircraft Industries, a.s..
- **FTA** (Fault Tree Analysis) – Stromy poruchových stavů se používají ke stejnému účelu jako blokované diagramy bezporuchovosti. Tato metoda byla používána např. v Aeru Vodochody a velkým uživatelem je i Boeing (kromě dalších velkých leteckých výrobců).
- **MA** (Markov Analysis) – Markovovy řetězce jsou během vývoje a certifikace používány pro řešení velmi složitých poruchových stavů (obvykle tam, kde není možné použít RBD či FTA).

4 Metody zpracování datových souborů

4.1 Obecné postupy zkoušek spolehlivosti

Pokud nejsou dostupné data pro stanovení odhadů parametrů spolehlivosti, je možné naplánovat a provést zkoušky spolehlivosti u vybraných prvků a systémů. Zkoušky spolehlivosti jsou pak založeny na principu „simulace provozu“. Jsou však finančně a časově velmi náročné. V některých případech není navíc možné prokázat v dostupném čase požadované parametry (např. extrémně nízké intenzity poruch – obzvláště u mechanických prvků). Proto je vhodné, použít je pouze pro velmi omezenou skupinu prvků, u kterých nebylo možné získat odhady jiným způsobem (komerční databáze, literatura atd.).

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, je možné použít obecné postupy. Nacházejí se např. v normách MIL a nebo v normách IEC. Zde se jedná o široce akceptovaný standard. Dále se více zaměříme na normy IEC. Vhodná je norma ČSN IEC 60605-4 [20]: Zkoušky bezporuchovosti zařízení, Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly, kde se nacházejí postupy pro vyhodnocení datových souborů. Na Leteckém ústavu VUT v Brně a v rámci aktivit Centra pro letecký a kosmický výzkum byla vytvořena i jednoduchá softwarová aplikace vycházející z této normy pro analýzu datových souborů s využitím uznávaných standardů a souborů s extrémně malým rozsahem dat. Aplikace umožňuje odhady s využitím postupů uvedených v ČSN IEC 605-4 [5]. V roce 2002 tato norma byla nahrazena výše uvedenou ČSN IEC 60605-4 [20]. Rozdíly jsou uvedeny v dalších kapitolách. Pro Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti je vhodný standard ČSN EN 61649 Weibullova analýza [21]. Tyto postupy doplňuje o analýzu vývoje parametrů bezporuchovosti metodou AMSAA (U.S. Army Materiel Systems Analysis Activity) a o možnost vyhodnocování souborů s extrémně malým rozsahem. Rozsah znamená, u zkoušek založených na čase, kumulovaná platná doba zkoušky a počet poruch.

Zjednodušeně lze říci, že zkouška spolehlivosti je experimentální určení nebo ověření ukazatelů spolehlivosti.

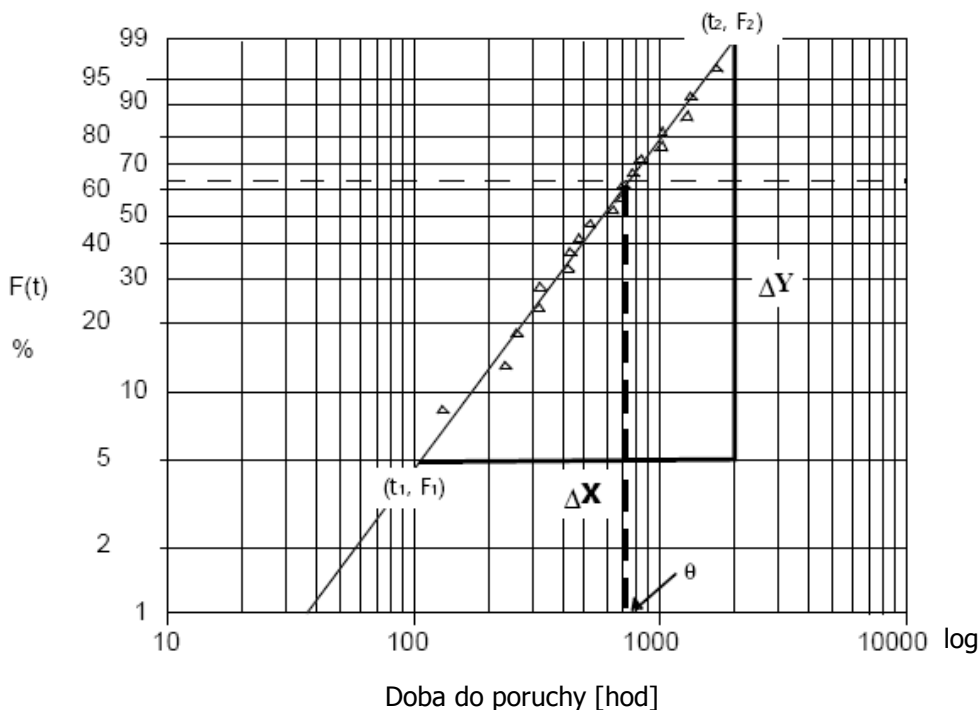
Protože z praktického hlediska je ukazatelem spolehlivosti vždy konkrétní parametr rozdělení náhodné veličiny, je cílem zkoušek určení nebo ověření hodnot parametru rozdělení příslušné náhodné veličiny. Zjednodušeně lze říci, že pomocí zkoušek spolehlivosti je obvyklou snahou získání vstupních dat pro další analýzy nebo také ověření, že jsou zvoleny správné postupy pro zabezpečení spolehlivosti - např. **pravděpodobnosti selhání či intenzity poruch** jednotlivých prvků RBD, FTA.

Dále jsou stručně uvedeny návody pro vyhodnocení datových souborů, které se nacházejí ve vojenských standardech publikovaných vládou Spojených států amerických, ministerstvem obrany. V MIL-HDBK-338B [8] jsou uvedeny postupy založené na:

- a) grafických metodách
- b) statistických analýzách

a) Grafické metody

V mnoha praktických případech jsou grafické metody jednodušší a dávají adekvátní výsledky. Matematicky jsou založeny na mediánovém pořadí (median rank). K výsledku se dojde v několika krocích a zakreslení hodnot do pravděpodobnostního grafu. Tyto postupy jsou shodné s postupy uvedených normách ČSN EN 61649 [21].



$$\theta = 739.41$$

$$\beta = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t_2)} \right) - \ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t_1)} \right)}{\ln t_2 - \ln t_1} = 1.53$$

Obr. 4.1: Příklad grafického určení parametrů Weibullova rozdělení podle [8]

b) Statistická analýza

V normě [8] jsou uvedeny matematické postupy k určení spolehlivostních parametrů např. střední doba mezi poruchami (MTBF), intenzita poruch. V postupech se vychází z klasické matematické statistické analýzy. Pro statistická rozdělení jsou uvedeny vztahy a příklady výpočtu. Dále jsou zde uvedeny Kolmogorovův-Smirnovův test a chí-kvadrát test dobré shody a jejich použití.

Navržené návody pro vyhodnocení datových souborů v této práci se v základech shodují s touto normou.

4.2 Výběr metod pro určení ukazatelů spolehlivosti

Nejprve je definována pro nezápornou náhodnou veličinu X se spojitým rozdělením intenzita poruch vztahem:

$$\lambda(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P[X \in (x, x+h) | X > x]}{h} = \frac{f(x)}{1 - F(x)}, \quad \text{kde: } F(x) < 1, \quad f \text{ je hustota}$$

pravděpodobnosti a F je distribuční funkce X . Představuje-li X dobu do poruchy, intenzita $\lambda(x)$ vyjadřuje, že pokud do času x nedošlo k poruše, tak pravděpodobnost, že k ní dojde v následujícím okamžiku malé délky h , je přibližně $\lambda(x)$. Intenzita charakterizuje rozdělení nezáporné náhodné veličiny:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\int_0^x \lambda(t) dt\right), \quad x > 0 \text{ zdroj [15].}$$

Základní vztaznou jednotkou doby provozu celého objektu je z provozních důvodů obvykle počet hodin, ujetých kilometrů, motohodin, zátěžných cyklů a pod. Při výpočtu ukazatelů spolehlivosti je nutný převod na jednu základní jednotku doby provozu a tou je „počet hodin“.

Při vyhodnocení dat, je nejprve nutné provést test dobré shody na předpokládaný typ rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Obecně platí, že exponenciální typ rozdělení se předpokládá u vysoce spolehlivých, složitých technických systémů (konstantní intenzita poruch). Toto rozdělení se často používá u leteckých součástí a přístrojů za předpokladů uvedených v disertační práci v kapitole 7.3 a 7.5. Weibullovo rozdělení dobře popisuje vliv opotřebení, únavy, koroze a dalších degradačních procesů, atd. v závislosti na parametru β – tvaru rozdělení. Logaritmicko-normální rozdělení je vhodné pro popis, kde se projevuje únava materiálů, vliv opotřebení nebo jiné degradace, ale i pro popis chování při tzv. zahořování elektronických součástek.

V první fázi vyhodnocení dat v disertační práci se uvažuje s předpokladem konstantní intenzity poruch, pak se pro stanovení bodových odhadů intenzity poruch a střední doby mezi poruchami (u opravovaných vzorků) nebo střední doby do poruchy (u neopravovaných vzorků) použijí uvedené numerické a grafické postupy. Grafické postupy jsou uvedeny a popsány v literatuře [21].

Platnost předpokladu konstantní intenzity poruch (exponenciální rozdělení pravděpodobnosti) se má před výpočtem bodových odhadů a konfidencí intervalů testovat, přednostně podle IEC 60605-6 [10] Zkoušení bezporuchovosti zařízení, část 6: Testy platnosti a odhad konstantní intenzity poruch a konstantního parametru proudu poruch.

a) Bodové odhady pro zkoušky ukončené časem:

$$\text{- bodový odhad (pozorovaná hodnota) intenzity poruch: } \hat{\lambda} = \frac{r}{T^*}, \quad (4.1)$$

rcelkový počet platných poruch
 T^* ...kumulovaná platná doba zkoušky.

$$\text{- bodový odhad střední doby do poruchy nebo mezi poruchami: } \hat{\mu} = \frac{T^*}{r}. \quad (4.2)$$

Starší norma ČSN IEC 605-4 [5] doporučuje tento bodový odhad intenzity poruch:

- pokud nebyly do bodu ukončení zkoušky pozorovány žádné poruchy, tj. $r=0$:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{3T^*}. \quad (4.3)$$

Toto doporučení je založeno na výzkumech E. Welkera a M. Lipowa publikovaných v článku Estimating the Exponential Failure Rate from Data with No Failure Events (Odhad intenzity poruch exponenciálního rozdělení z dat s nulovým počtem výskytu poruch), Proceeding 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium, str. 420-427. V nové normě ČSN IEC 60605 - 4 [20] se neuvádí a doporučují se jiné postupy.

Srovnání postupů je uvedeno níže.

Výše uvedená norma (nová) [20] upozorňuje, jestliže nebyly během zkoušky pozorovány žádné poruchy nelze bodový odhad získat. Lze však odhadnout dolní mez jednostranného konfidenčního intervalu MTTF a horní mez jednostranného konfidenčního intervalu intenzity poruch.

Bodový odhad rovnice 4.2 je vychýlený. Pro malé hodnoty r (například menší než 10) může toto vychýlení být sníženo tím, že se místo r dosadí (r + 1). Pro větší hodnoty je vychýlení přijatelné.

b) Konfidenční intervaly pro zkoušky ukončené časem:

Konfidenční meze pro skutečnou intenzitu poruch λ při konfidenční úrovni 90% jsou uvedeny dále. Metody jsou založené na chí-kvadrátu χ^2 rozdělení pravděpodobnosti.

- Jednostranný konfidenční interval s horní mezí:

$$\lambda < \hat{\lambda} \frac{\chi_{0,90}^2(2r+2)}{2r} \text{ nebo } \lambda < \frac{\chi_{0,90}^2(2r+2)}{2T^*}. \quad (4.4)$$

- Dvoustranný konfidenční interval s horní mezí:

$$\hat{\lambda} \frac{\chi_{0,05}^2(2r)}{2r} < \lambda < \hat{\lambda} \frac{\chi_{0,95}^2(2r+2)}{2r} \text{ nebo } \frac{\chi_{0,05}^2(2r)}{2T^*} < \lambda < \frac{\chi_{0,95}^2(2r+2)}{2T^*}. \quad (4.5)$$

Není-li pozorována žádná porucha, může se stanovit pouze jednostranný konfidenční interval s horní mezí. Vzorec založený na $\hat{\lambda}$ nelze použít.

- Jednostranný konfidenční interval pro střední dobu do poruchy, dolní mez:

$$\mu > \hat{\mu} \frac{2r}{\chi_{0,90}^2(2r+2)} \text{ nebo } \mu > \frac{2T^*}{\chi_{0,90}^2(2r+2)}. \quad (4.6)$$

- Dvoustranný konfidenční interval pro střední dobu do poruchy:

$$\hat{\mu} \frac{2r}{\chi_{0,95}^2(2r+2)} < \mu < \hat{\mu} \frac{2r}{\chi_{0,05}^2(2r)} \text{ nebo } \frac{2T^*}{\chi_{0,95}^2(2r+2)} < \mu < \frac{2T^*}{\chi_{0,05}^2(2r)}. \quad (4.7)$$

Není-li pozorována porucha může se stanovit pouze dolní mez. Obdobné vztahy se nacházejí v normě ČSN IEC 60605-4 pro zkoušky ukončené poruchou. Podle definice je

porucha jev spočívající v ukončení provozuschopného stavu objektu při stanovených parametrech. Kritéria poruchy se stanovují v technické dokumentaci.

Test konstantní intenzity poruch

V normě ČSN IEC 60605-6 se nacházejí grafické a numerické postupy pro testování platnosti konstantní intenzity poruch nebo konstantního parametru proudu poruch.

Test slouží:

- k testování, zda jsou doby do poruchy objektů exponenciálně rozděleny, tj. zda je intenzita poruch konstantní
- k testování, zda nemají doby mezi poruchami jediného opravitelného objektu nějaký časový trend, tj. zda parametr proudu poruch nevykazuje rostoucí nebo klesající trend.

Opatření prováděná v případě zamítnutí předpokladu konstantnosti intenzity poruch

Jestliže byl předpoklad konstantnosti poruch zamítnut, doporučuje se data podrobněji analyzovat, aby se určila možná příčina. Numerická analýza má být pokud možno podložena fyzikálním vyšetřením a inženýrskými úvahami.

Pokud není splněn předpoklad konstantní intenzity poruch (exponenciální rozdělení), pak se vybere jiné vhodné rozdělení např. Weibullovo nebo normální. Návody se nacházejí v normě ČSN IEC 61649 Weibullova analýza [21].

Weibullovo rozdělení

Výraz pro distribuční funkci Weibullova rozdělení je vyjádřen rovnicí, zdroj literatura [21]:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x-c}{\alpha} \right)^\beta \right]. \quad (4.8)$$

α ...parametr polohy rozdělení, β ... parametr tvaru rozdělení, c ...parametr posunutí počátku rozdělení (v praxi se často setkáme s $c = 0$, dvou-parametrické rozdělení)

$$x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0, c \geq 0$$

Pro malé výběry je vhodná grafická metoda pro stanovení bodových odhadů. Postup je shodný s MIL standardy, které byly zmíněny výše a spočívají v zakreslování dat do Weibullova pravděpodobnostního papíru, proložení přímky daty, interpretaci grafu a odhadu parametrů s použitím speciálního pravděpodobnostního papíru odvozeného pomocí transformace Weibullovovy rovnice na lineární tvar.

V aktuální verzi normy [21] pro malý rozsah výběru (≤ 20) a pro nulový počet poruch se doporučuje Weibayesova analýza.

Při Weibayesově analýze se předpokládá, že je znám parametr tvaru β na základě historických dat o poruchách, z předchozích zkušeností nebo inženýrských znalostí fyziky poruch. Weibayesova analýza je definována jako Weibullova analýza s daným parametrem β . Je to Weibullovo rozdělení s jediným parametrem (η). Weibayesova analýza se může použít k analýze datových souborů s poruchami i bez nich, kde oba typy dat mohou mít vyloučení.

Charakteristická doba života η je pak dána vztahem:

$$\eta = \left[\sum_{i=1}^N \frac{t_i^\beta}{r} \right]^{1/\beta}, \quad (4.9)$$

kde:

t je doba nebo počet cyklů

r počet porouchaných objektů

N celkový počet poruch plus vyloučení

η odhad charakteristické doby života metodou maximální věrohodnosti

Weibullovo rozdělení je určeno předpokládanou hodnotou β a hodnotou η vypočtenou rovnicí 4.9, Weibayesova čára se zakreslí na Weibullův pravděpodobností papír. Weibayesův graf se používá stejně jako jakýkoliv jiný Weibullův graf. Z Weibayesovy analýzy lze získat odhady dob života, předpovědi poruch a pravděpodobnost bezporuchového provozu.

4.3 Plánování a zkoušky bezporuchovosti

Plánování zkoušek soustavy je nutné věnovat patřičnou pozornost. S ohledem na očekávanou střední dobu do poruchy souvisí délka zkoušky, resp. kumulovaná platná doba zkoušky (T^*).

Naznačený příklad postupu odhadu předpokládá konstantní intenzitu poruch (exponenciální rozdělení). Využívá se metody založené na chí-kvadrátu χ^2 rozdělení pravděpodobnosti. Střední doba do poruchy soustavy se dle těchto postupů určí podle vztahu

$$\mu = \frac{1}{\lambda}, \text{ kumulovaná platná doba zkoušky je pak dána vztahem } T^* = \frac{\mu \cdot \chi^2}{2}.$$

Vzhledem k vysoké požadované úrovni bezporuchovosti je pak nutné hledat různé cesty ke zkrácení doby zkoušky, aby bylo možné provést alespoň omezené vyhodnocení. Např. pro přípustnou hodnotu nastoupení pravděpodobnosti selhání $1 \cdot 10^{-5}$ za 1 letovou hodinu podle doporučení předpisu [1] by za normálních podmínek bylo nutné simulovat (při 90% úrovni konfidence, $\chi^2 = 4,61$, $\mu = 100000$ hod) po dosažení do vzorce pro kumulovanou platnou dobu zkoušky se získá v tomto případě **26,3 let** provozu zařízení. Pokud by se v průběhu zkoušky vyskytlo více poruch, kumulovaná platná doba zkouška by se ještě prodloužila. Samozřejmě není možné uskutečnit takovou zkoušku v „neakcelerované podobě“ a je potřeba hledat vhodný faktor zrychlení, který umožní zkrácení doby zkoušky na řádově několik měsíců, jak bylo uvedeno.

Zkoušky se řídí podle tzv. zkušebního plánu, to je soubor pravidel kodifikující způsob provedení zkoušky. Tato pravidla se nacházejí například v literatuře [6].

4.4 Analýza provozních dat

Provozní data patří mezi nejlepší podklady pro odhady parametrů spolehlivosti jednotlivých prvků a systémů. Zavedený výrobce má obvykle již v průběhu práce na novém typu letadla k dispozici data z provozu předcházející generace letadel. Na základě těchto dat

je možné provést kvalitní odhady potřebných parametrů spolehlivosti. To platí zejména u dopravních letadel. Naproti tomu v kategorii malých letadel velmi často nejsou tato data k dispozici (nejsou k dispozici data od provozovatelů nebo nově zaváděný systém nemá vhodný ekvivalent u předchozí generace letadel). Tento zdroj také předpokládá, že firma je dlouhodobě zavedená na trhu a vyrábí delší dobu letadla s obdobnými systémy.

Doporučení jsou součástí poradního oběžníku AC23-1309 [2]. Zde je zmíněno použití konvenčních postupů matematické statistické analýzy. Pro samotné vyhodnocení dat je možné použít stejné postupy a standardy jako při vyhodnocení zkoušek spolehlivosti odstavce 2.

4.5 Akceptovatelné průmyslové standardy

V případě, že nejsou k dispozici provozní data, je možné použít pro odhady parametrů spolehlivosti metodiky založené na všeobecně uznávaných standardech (vojenských a průmyslových) nebo komerční databáze spolehlivosti prvků a systémů. K používaným standardům patří zejména:

- [12] **MIL-HDBK-217F** (Reliability Prediction of Electronic Equipment) - vojenský standard USA používaný pro odhad intenzit poruch u elektronických zařízení. Podklady pro tento standard pochází z velkého množství dat nashromážděných ozbrojenými složkami USA a tvoří často používaný základ pro odhady v této oblasti.

Pro predikci parametrů spolehlivosti mechanických prvků a systémů se často objevují odkazy na:

- [13] **NSWC 98/LE1** (Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment) - dokument vypracovaný Naval Surface Warfare Center (spadající opět pod ozbrojené složky USA)

Mezi další zdroje pro odhady parametrů spolehlivosti patří:

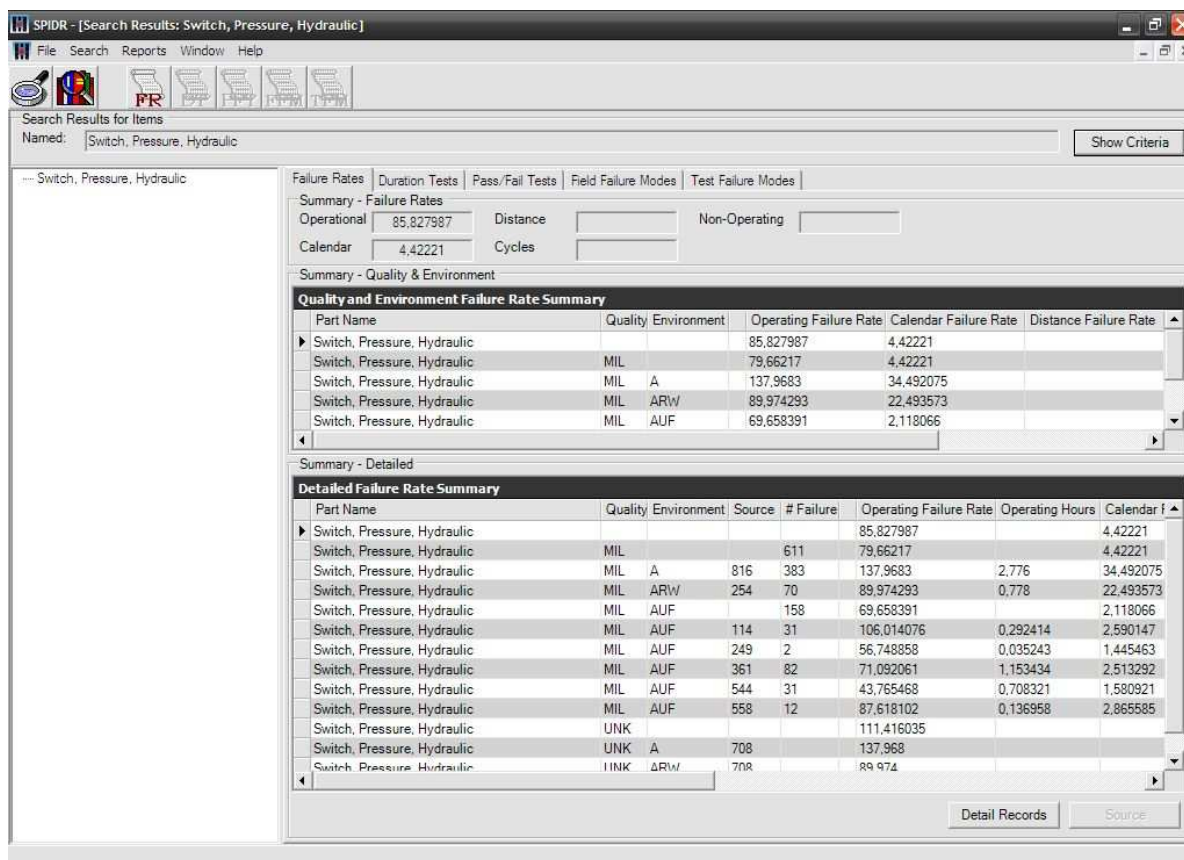
4.5.1 Komerční databáze

Komerční databáze velmi usnadňují práci v hledání a získání spolehlivostních dat. V dalších kapitolách jsou představeny komerční databáze. Tyto podklady jsou zpracovány z databází, které jsou dostupné na VUT FSI v Brně, Letecký ústav pro školní potřeby. Dalším zdrojem pro níže uvedené kapitoly jsou internetové stránky výrobců tohoto softwaru.

- Databáze SPIDRTM
(System and Part Integrated Data Source)

Výrobce je společnost SRC -System Reliability Center (USA), zdroj [23]. Svými produkty pokrývá širokou oblast problematiky.

Grafické rozhraní databáze SPIDR:



Obr. 4.2: Ukázka práce s databází, dolní obrázek okno s výsledky

- **Databáze RELEX**

Výrobce je společnost Relex Software Corporation (USA), zdroj [24].

Jedná se o výrobce softwaru s 24 letou tradicí. Dodává software a služby firmám po celém světě. Nabídka firmy je i v možnosti školení, lze získat certifikát (ASQ CRE - American Society for Quality Certified Reliability Engineer).

- **DATABÁZE RAC PRISM**

PRISM je nový softwarový nástroj od společnosti RAC s novou generací databází, jak pro elektronické tak i mechanické součásti.

- následuje po úspěšné NPRD a EPRD sérii datových knihoven, náhrada MIL-HDBK-217.

Další stručný přehled a popis databází:

- **FMD-91, FMD-97** [14] (Failure Mode/Mechanism Distributions) původ dokumentu opět spadá pod ministerstvo obrany USA. Dokument obsahuje data, podle kterých je možné rozdělit celkové zjištěné intenzity poruch prvků na jednotlivé druhy poruch. Část údajů

z FMD-91 je obsažena také v MIL-HDBK-338 (Electronic Reliability Design Handbook) [8].

- **FIDES** evropský ekvivalent MIL-HDBK-217 pro elektronické vybavení
- **NSWC 98/LE1** (Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment) databáze pro mechanických součástí, vyvinut Naval Surface Warfare Center, USA
- **GJB/z (299B)** čínský ekvivalent MIL-HDBK-217 pro elektronické vybavení
- **RAC EPRD-97** (Electronic Parts Reliability Database) odhady pro elektronické vybavení
- **TELCORDIA (Bellcore)** odhady pro elektronické vybavení
- **RDF 2000** odhady pro elektronické vybavení - France Telecom
- **HRD5** odhady pro elektronické přístroje a součásti - British Telecommunications
- **TELEX TELCORDIA, CNET, BELLCORE, EPRD, NPRD, RDF (2000), GJB/z (299B), British Telecom**

Tab. 4.1: Příklad odhadu intenzity poruch pro prvek systému hydraulické soustavy

prvek/ typ	způsob poruchy		intenzita poruch λ [hod ⁻¹]	zdroj informací	poznámka
hydraulický akumulátor	poruchy celkem		$4,3 \cdot 10^{-5}$	NPRD-95C	zdroj databáze SRC SPIDR, prostředí AU, více ve příloze 3 disertační práce
		netěsnost	$2,87 \cdot 10^{-5}$	FMD-97	
		prasknutí/lom	$2,63 \cdot 10^{-6}$		
		bez funkce	$2,63 \cdot 10^{-6}$		
		trhlina, porušení	$1,29 \cdot 10^{-6}$		

Mezi hlavní nevýhody tohoto zdroje dat patří omezený soubor prvků a systémů zpracovaných ve standardech nebo spolehlivostních databázích. Tento problém je ještě umocněný omezenými podmínkami provozu, pro které je daný odhad k dispozici (např. odhad intenzity poruch alternátoru pro použití v malém letounu není k dispozici – pouze pro použití u dopravního letadla provozovaného v jiných podmínkách). Navíc je obvykle problém zjistit na jaké úrovni konfidence byly údaje získány. Výjimkou je databáze NPRD, kde lit. [15] udává konfidenční úroveň 90%. Úroveň konfidence 90%, resp. 95% pak patří k nejčastěji používaným hodnotám při odhadech parametrů.

4.6 Návod sběru dat

Návody sběru dat by měly sloužit k vytvoření databáze dat sledující spolehlivost jednotlivých přístrojů a zároveň soustavy jako celku. Takto získaná data jsou nejhodnotnější z hlediska spolehlivosti.

Někteří provozovatelé tak mohou sledovat provozní spolehlivost své flotily, pohotovost a další veličiny.

V těchto případech je pak nutné vypracovat katalog kódování poruch letecké techniky. Tak aby bylo umožněno zpracování dat.

Karta poruch je v současné době v provedení „papírovém“, zdroj [22] a [8]. Výstupem zpracování karet poruch je Přehled poruch letadel.

Tato data by pak měla sloužit k ověření předpokladů spolehlivostních analýz a sledování provozní spolehlivosti. Tyto parametry se pak odrážejí v ekonomice provozu a úzce souvisí s problematikou údržby.

Důležitá je klasifikace a kategorizace poruch pro zpracování dat. Musí být jednoznačně uvedeno, zda se jedná o pojem „porucha“ (failure), nebo „chybná funkce“ (fault).

V disertační práci je navržena Karta poruch a Přehled poruch letadel pro malý dopravní letoun EV 55. Karta poruch a Přehled poruch letadel jsou připraveny v excelovských tabulkách tak, aby jejich zpracování bylo co nejjednodušší.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Karta poruch EV-55". The spreadsheet is divided into several sections for data entry:

- Section 1: Aircraft Identification** (Columns 1-4): Includes fields for "Kód letadla" (Aircraft Code), "Poznávací zn." (Registration Mark), "Datum zjištění" (Date of Discovery), and "Odbornost" (Expertise).
- Section 2: Classification** (Columns 5-10): Includes fields for "Hod. draku od poč. provozu" (Damage Rating from start of operation), "Poč. startů" (Number of starts), "Klasifikace" (Classification), "Č. karty PLN, LN" (Card number PLN, LN), "Č. karty PSM" (Card number PSM), "Záruka" (Warranty), and "Reklamacie" (Complaints).
- Section 3: Circumstances** (Columns 11-15): Includes a large dropdown menu for "Okolnost zjištění poruchy letadla" (Circumstances of aircraft malfunction discovery) and fields for "Kdo odstranil poruchu" (Who removed the malfunction), "Doba opravy letadla" (Repair time of the aircraft), "Prům. počet prac. při opravě" (Average number of works during repair), and "Obecná příčina poruchy" (General cause of malfunction).
- Section 4: Repair Details** (Columns 16-20): Includes fields for "katalogové číslo" (Catalog number), "Příznaky poruchy agregátu" (Symptoms of aggregate malfunction), "Způsob opravy" (Repair method), "Jak naloženo s agregátem" (How the aggregate was handled), "Následky pro provoz" (Consequences for operation), and "Letový úkol" (Flight task).

The spreadsheet also includes a list of possible causes for malfunction in the "Okolnost zjištění poruchy letadla" dropdown menu, such as "předletová příprava", "předání pilotovi do vzletu", "poletová příprava", "parkový den", "údržbová prohlídka", "příprava na zimlet. provoz", "předepsaná práce I", "předepsaná práce II", "předepsaná práce III", "předepsaná práce IV", "převzetí ze skladu", "pří opravě (BO, DO)", "pří výměně motoru", "pří uložení a stání", "jiné práce", "za letu (potvrzeno na zemi)", and "za letu (nepotvrzeno na zemi)".

Obr. 4.3: Návrh karty poruch pro malý dopravní letoun EV 55

4.7 Spolehlivostní analýza hydraulické soustavy malého dopravního letounu

Následující odstavce jsou věnovány spolehlivostní analýze hydraulické soustavy malého dopravního letounu. Slouží zejména jako podklad pro porovnání kvality výstupů různých zdrojů dat a postupů vyhodnocení. Zde jsou aplikována data, která byla získána metodami uvedenými výše. Schéma hydraulické soustavy je uvedeno v disertační práci.

Důležité a nutné je rozebrat možné poruchové stavy hydraulického systému, na příkladu je ukázáno hodnocení důsledků poruch. Toto hodnocení je pak použito při přípravě analýzy FMEA, která je uvedena v předkládané disertační práci.

Příklad hodnocení důsledků poruch:

- o Úplná ztráta tlaku v systému
Důsledek poruchy: KATASTROFICKÉ - CATASTROPHIC (CAT)
- o Nevysunutí celého a nebo části podvozku hlavním ani nouzovým okruhem
Hodnocení důsledků poruchového stavu: NEBEZPEČNÉ - HAZARDOUS (HAZ)
- o Ztráta tlaku v okruhu řízení předového kola.
Hodnocení důsledků poruchového stavu: NEZÁVAŽNÉ - MINOR (MIN)
- o Chybná indikace tlaku v hydraulické soustavě
Hodnocení důsledků poruchového stavu: NEZÁVAŽNÉ - MINOR (MIN)

4.8 Tabulka vstupních dat

V tabulce vstupních dat jsou uvedeny hodnoty intenzit poruch a komentáře, které byly vyhledány v komerčních databázích. Další hodnoty a vysvětlení je uvedeno v disertační práci v příloze 3. Uvedené hodnoty jsou dále použity v prediktivních analýzách spolehlivosti resp. v blokových diagramech.

č.	přístroj / poruchový mód	počet dílů	intenzita poruch λ (h ⁻¹)	zdroj	poznámka
1	nádržka hydraulické kapaliny	1	1,03·10 ⁻⁵	NPRD-95C	AUT*, Commercial, NPRD-098 (failure rate); NPRD-3 (failure distribution)
	únik		6,63·10 ⁻⁶	FMD-97	
	prasklá/zlomená		7,97·10 ⁻⁷		
	protržená/roztržená		2,69·10 ⁻⁷		
	proražená		2,69·10 ⁻⁷		
	chybná funkce		2,69·10 ⁻⁷		
	neznámá příčina		2,12·10 ⁻⁶		

Tab. 4.2: Příklad tabulky vstupních dat, intenzity poruch použitých přístrojů a součástí

4.9 FMEA

Na konkrétní hydraulické soustavě malého dopravního letounu je provedena analýza způsobů a důsledků poruch. Jedná se o soustavu ovládání, vysouvání a zasouvání hlavního a předového podvozku, schéma je uvedeno na obrázku 5, podrobněji v příloze 2 disertační práce. Pro účely disertační práce, nebyla analyzována celá soustava, ale její část s ohledem na rozsah a pracnost vypracování této analýzy. FMEA analýza se používá k identifikaci důsledků poruch samostatných prvků. Je tak prokazována shoda s požadavkem předpisu, aby „nevznikl katastrofický poruchový stav v důsledku selhání jednoho prvku“. Dále prokazuje, že u žádného prvku nepřevyší pravděpodobnost nastoupení jednotlivých poruchových stavů povolené max. hodnoty pravděpodobností.

V disertační práci jsou uvedeny specifické předpoklady, které se uplatňují při této analýze.

Při tvorbě analýzy FMEA je nutné být dobře seznámen s vlastní konstrukcí jednotlivých součástí.

FMEA - Hlavní hydraulický okruh

označení a název prvku	popis funkce	způsob poruchy	příčina poruchy	důsledek poruchy	způsob zjištění poruchy	fáze letu	hodnocení důsledků poruchy na letoun	doporučení pro posádku	poznámky
válec příďového podvozku LUN 7121 (F03)	zajišťuje zasunutí a vysunutí příďového podvozku a jeho zajištění v krajních polohách	ztráta pohyblivosti mechanicky-nevysunuto	zadření plov.pístu 5 ve válci nebo pístnice v ucpávce nebo plov. pístu 5 na čepu 7 nebo pístu ve válci	nedojde k vysunutí nohy příďového podvozku	signalizace na přístrojovém panelu	DS2, DS3, LNDG	HAZ	přistát nouzově se zataženým podvozkem	co nejvíce prodloužit fázi výdrže při přistání, nebrzdit
		ztráta pohyblivosti mechanicky-nezasunuto	zadření plov. pístu 6 na pístnici nebo ve válci nebo rozrušení závitu šroubu - 81nebo čepu 7	nedojde k zasunutí nohy příďového podvozku	signalizace na přístrojovém panelu	TOFF, CL1	MIN	nechat vysunutý podvozek a návrat na letiště	
		ztráta pohyblivosti mechanicky-ztráta el. řízení	závada říd. mikropínače nebo porušení vodičů	nedojde k zasunutí nohy příďového podvozku	signalizace na přístrojovém panelu	TOFF, CL1	MIN	nechat vysunutý podvozek a návrat na letiště	

Tab. 4.3: Příklad FMEA analýzy

Obecný závěr a výstup FMEA analýzy je potvrzení nebo vyvrácení předpokladu, že při selhání jednotlivého prvku nedochází k nástupu katastrofického poruchového stavu. Tak se prokazuje shoda s požadavkem, aby „nevznikl katastrofický poruchový stav v důsledku selhání jednoho prvku“. Analyzovaná podvozková soustava není hodnocena podle předpokladů uvedených v disertační práci jako kritická. Bylo by nutné rozšíření analýzy o další soustavy, např. brzdová.

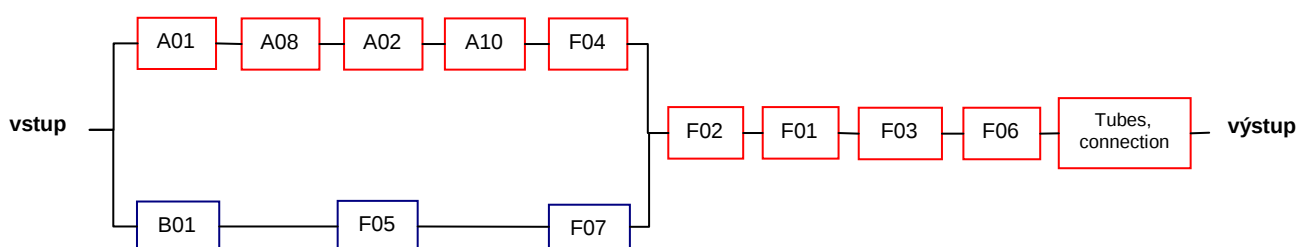
Shrnutí výsledků analýzy FMEA pak poskytuje podklady pro tvorbu plánů údržby založených na posouzení důležitosti jednotlivých prvků pro celý systém. Zpravidla není nutné provádět časté kontroly prvků, jejichž selhání je bez důsledků pro bezpečnost nebo má pouze nezávažné důsledky – to vede k úsporám provozních nákladů. Podvozková soustava patří mezi páteřní soustavy letounu, z tohoto důvodu byla i provedena analýza, a hodnocení bez důsledků se v tabulce nevyskytuje. Pak nelze uvedený přístup v tomto konkrétním případě použít.

4.10 Blokový diagram podvozkové soustavy

Pro určení spolehlivosti podvozkové soustavy byl vybrán výpočet pomocí blokových diagramů (RBD).

Následující analýzy jsou věnovány podvozkové hydraulické soustavě malého dopravního letounu. Funkce jednotlivých přístrojů byly uvedeny a popsány. Soustava je modelována podle zjednodušeného schéma uvedeného na obrázku 4.4. Celé schéma hydraulické soustavy se nachází v příloze 2 disertační práce.

Model vysunutí celého podvozku hlavním nebo nouzovým okruhem



Obr. 4.4

Modelováno je nevysunutí celého a nebo části podvozku hlavním a ani nouzovým okruhem. Výpočty jsou provedeny v excelovském sešitu, který je elektronickou přílohou disertační práce. Modelovány nebyly bezporuchové funkce, ale poruchy. Nastoupení jeví se vztaženo na 1 letovou hodinu.

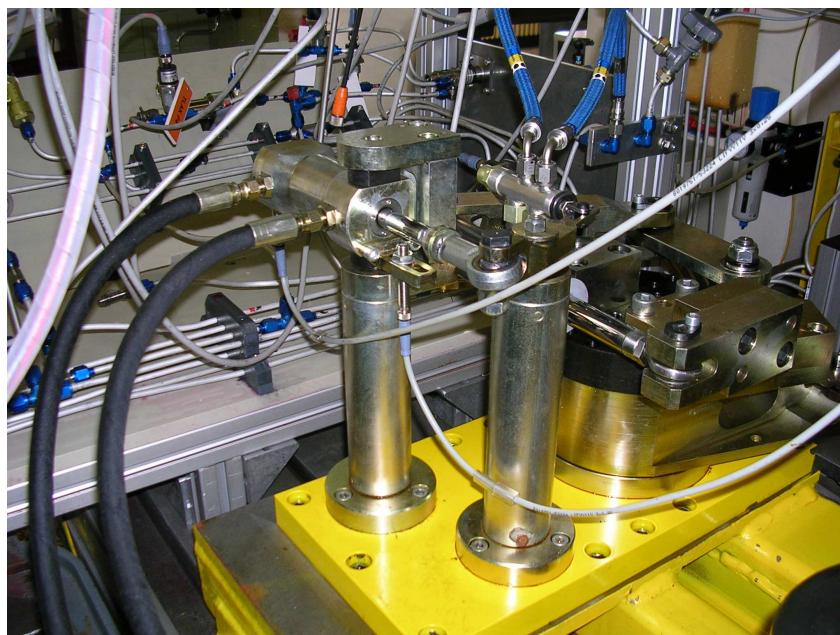
Ve výpočtech jsou použita různá vstupní data pro prediktivní analýzu, výsledky jsou uvedeny pro jednotlivé analyzované databáze:

- komerční databáze, kapitola 4.2
- odborná literatura [18]
- katalog KILPS [19]
- provozní data přístrojů L 410, zdroj Jihlavan, a.s.

4.10.1 Vyhodnocení standových dat

Ve firmě Jihlavan, a.s. je zkoušena funkčnost a spolehlivost hydraulické soustavy. Jedná se o stejnou hydraulickou soustavu podle schéma uvedeného na obrázku 4.4, podrobné schéma se nachází v příloze 2 disertační práce. Dále je uvedena prokázaná intenzita poruch a její intervalový odhad. Data jsou vyhodnocena podle kapitoly 4.2. Vyhodnocení je provedeno podle vztahů pro exponenciální rozdělení. Toto rozdělení je často používáno pro vyhodnocení spolehlivosti leteckých přístrojů a součástí.

Princip a důvod standových zkoušek je v prokázání funkčnosti a odzkoušení předpokladu, aby v následujících letových zkouškách nedošlo k časné poruše.



Obr. 4.4: Část hydraulické soustavy, Jihlavan, a.s., zdroj J. Novák

Standová zkouška proběhla v období od roku 2007 do roku 2010 16876 cyklů, doba běhu standu odpovídá přibližně 2,5 roku. Závažná porucha nevysunutí podvozku nebo části nebyla pozorována.

Je určena horní mez jednostranného konfidenčního intervalu intenzity poruch při konfidenční úrovni 90% podle vzorce (4.4):

$$\lambda_{u_s \tan d} = Q_{u_s \tan d} = \frac{\chi_{0,90}^2 (2r + 2)}{2T^*} = \frac{4,61}{2 \cdot 16876} = 1,366 \cdot 10^{-4} \text{ hod}^{-1}.$$

4.10.2 Data z provozu letounu kategorie FAR 23 / CS 23 Commuter

Pro porovnání výsledků byl vybrán letoun v kategorii pro sběrnou dopravu (Commuter) s obdobnou hydraulickou soustavou. Z více než 40 leté zkušenosti provozu malého dopravního letounu L 410 se ukazuje vysoká spolehlivost a plnění podmínek předpisu pro tuto kategorii letadel.



Obr. 4.5: Let L 410 UVP-E slovinského letectva, Let L 410 MU, zdroj [17]

V disertační práci je proveden rozbor nehod podle dostupných dat, literatura [17], a nebyla nalezena nehoda způsobena nevysunutím podvozku. Pak lze podle výše uvedených předpokladů určit horní mez jednostranného konfidenčního intervalu intenzity poruch při konfidenční úrovni 90%, výpočet je proveden za předpokladů a podle kapitoly 4.2:

$$\lambda_{u_provoz_L410} = Q_{u_provoz_L410} = 5,76 \cdot 10^{-7} \text{ hod}^{-1}.$$

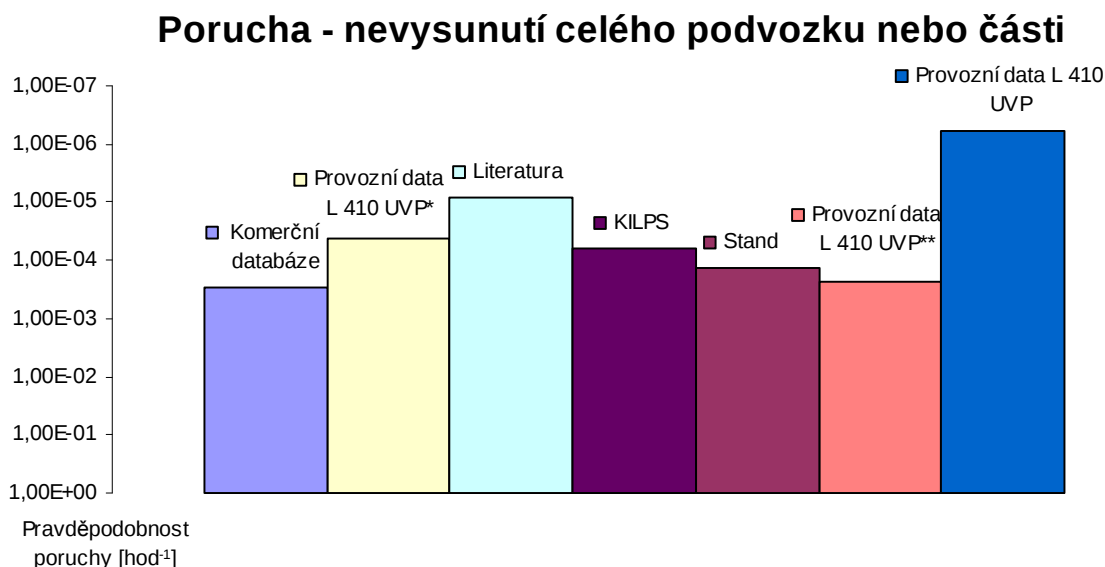
Pro další porovnání jsou analyzována data přístrojů a agregátů vyráběných ve firmě Jihlavan, a.s. a instalovaných na letounech řady L 410 (zdroj: Jihlavan, a.s.). Data jsou rozdělena do dvou skupin a jsou uvozena symbolem * resp. **.

*Tato data byla v roce 2002 zpracována podle metodiky: „ Výpočet provozní spolehlivosti letadel“, autor Prof. Ing.R. Holub CSc., Vojenská akademie Brno

**pravděpodobnost poruchy L 410 UVP. V disertační práci je vypočtena výsledná pravděpodobnost poruchy vztažená na 1 letovou hodinu podle návodů z kapitoly 4.2.

4.11 Srovnání výsledků

V této kapitole je provedeno srovnání výsledků a statistické testování výsledných veličin (pravděpodobnosti poruch) z provedených prediktivních analýz spolehlivosti.



4.11.1 Závěry ze srovnání a testů databází

1. Z uvedeného srovnání výstupů z analýz, graf 4.1, a statistického testování (využito je t-testu) výsledků vychází pro tento konkrétní případ hydraulické podvozkové soustavy, že komerční data patří mezi konzervativnější zdroje ve srovnání s ostatními databázemi na hladině významnosti 10%.
2. Standové data – je ukázána prokázaná intenzita poruchy. V disertační práci je uvedeno na základě rozboru dat, že prokázání nižší pravděpodobnosti poruchy

v časovém horizontu dalších dvou až tří let jeví jako nereálné. Princip a důvod standových zkoušek spočívá v prokázání funkčnosti a v následujících letových zkouškách nedojde k časné poruše.

3. Použití dat podle literatury [18] vede k mírnému podhodnocení pravděpodobnosti poruch ve srovnání s ostatními daty. Statisticky je tato odchylka nevýznamná na 10% hladině významnosti. V první fázi vývoje, kdy je snaha odhalit kritický prvek, je tento zdroj použitelný a zjištěný rozdíl je statisticky nevýznamný. Nevýhodou tohoto zdroje je malý rozsah a omezený počet prvků na rozdíl od databáze KILPS [19].
4. Srovnání vypočtených dat z různých zdrojů nevede k prokázání nastoupení poruchy nevysunutí podvozku celého a nebo části podvozku hlavním a ani nouzovým okruhem klasifikované jako Nebezpečné – Hazardous. Je zjištěno, že kritické přístroje nacházejí na větvi přístrojů - např. hydraulické válce vysouvání/zasouvání podvozku. Zrychlené zkoušky těchto kritických komponent by mohly vést k prokázání požadované úrovně pravděpodobnosti poruchy $1 \cdot 10^{-7} \text{ hod}^{-1}$ předpisy FAR/CS 23. Ve srovnání s provozními daty flotily letounů L 410 UVP (podle rozboru nehod) se jeví uvedené zdroje konzervativní.

5 Výsledky pro praxi a rozvoj vědního oboru

Disertační práce popisuje metody zkoušek spolehlivosti a vyhodnocování provozních dat s ohledem na návaznost použití takto získaných dat v analýzách spolehlivosti.

Vymezení jednotlivých cílů:

1. získání a shrnutí dostupných informací v oblasti zkoušek a vyhodnocování provozních dat
2. vytvoření návodů při sběru dat, návrhu a plánování zkoušek, vyhodnocení a zpracování dat
3. provedení analýzy spolehlivosti na hydraulické podvozkové soustavě malého dopravního při spolupráci s průmyslem (firmy Jihlavan, a.s., Evektor, spol. s r.o.) při vývoji malého dopravního letounu
4. aplikace prediktivních postupů analýz inherentní spolehlivosti využívající pro odhady úrovně spolehlivosti akceptované průmyslové standardy (komerční databáze), standové zkoušky a provozní data
5. vypracování závěrů z provedených prediktivních analýz spolehlivosti s různými vstupními daty a návodů pro použití těchto dat v analýzách spolehlivosti
6. zpracování podkladů a návrhů pro doplnění softwarové aplikace zabývající se zpracováním dat z provozu a zkoušek a doporučení pro návrh databázových programů vyhodnocujících provozní spolehlivost, návrh tzv. karty poruch

Shrnutí a dosažení jednotlivých cílů:

1. Jsou rozebrány různé metodiky vyhodnocení zkoušek a provozních dat, včetně návrhu postupů vyhodnocení a formulářů, a jsou uvedeny v disertační práci. Ukázány jsou dostupné zdroje dat pro provádění spolehlivostních analýz včetně tzv. komerčních databází, jejich použití a příklady jsou uvedeny.
2. V disertační práci v kapitole 4.2 na stranách 25 - 32 jsou shrnuty vhodné návody na vyhodnocení dat, včetně statistických testů. Podle těchto návodů jsou vyhodnocena standová a provozní data. U standových dat je ukázáno s ohledem na délku zkoušky, že prokázání nižší intenzity poruch není reálné.
3. Analýzy spolehlivosti jsou prakticky aplikovány na hydraulické podvozkové soustavy malého dopravního letounu za spolupráce se společnostmi Jihlavan, a.s. a Evektor, spol. s r.o. Analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků (FMEA) a výpočet pomocí blokových schémat (RBD) pro podvozkovou hydraulickou soustavu je uveden .
Shrnutí výsledků analýzy FMEA pak poskytuje podklady pro tvorbu plánů údržby založených na posouzení důležitosti jednotlivých prvků pro celý systém. Zpravidla není nutné provádět časté kontroly prvků, jejichž selhání je bez důsledků pro bezpečnost nebo má pouze nezávažné důsledky – to vede k úsporám provozních nákladů. S ohledem na důležitost analyzované podvozkové soustavy, nebylo možné tento přístup aplikovat.
Výpočty blokových schémat poruchy podvozku s různými vstupními daty jsou provedeny. Výsledky jsou shrnuty a použity do závěrů a výstupů disertační práce. Tyto závěry je možné aplikovat a měly by pomoci při provádění dalších analýz.
4. Jsou aplikovány prediktivní postupy analýz inherentní spolehlivosti využívající pro odhady úrovně spolehlivosti akceptované průmyslové standardy (komerční databáze), odbornou literaturu, standové zkoušky a provozní data (odstavec 3).
Z uvedených srovnání a statistických testů vyplývá, že u hydraulických soustav jsou postupy prediktivní analýzy použitelné a v tomto konkrétním případě jsou konzervativní (na bezpečné straně) ve srovnání s provozními daty.
Rozborem analyzované soustavy jsou zjištěny přístroje, které nejvíce zvyšují pravděpodobnost poruchy. Za daných podmínek není možné prokázat požadovanou úroveň spolehlivosti. Zrychlené zkoušky těchto přístrojů by měly vést k prokázání požadovaných hodnot. Zde by bylo možné a vhodné navázat na tuto disertační práci a pokračovat v řešení této problematiky s ohledem na budoucí certifikaci letounu podle zmíněných předpisů.
5. Závěry pro použití vstupních dat v analýzách spolehlivosti jsou nastíněny a uvedeny předcházející kapitole. Výše uvedená srovnání a doporučení nejsou k dispozici, zde se jedná o zásadní zjištění a přínos této disertační práce, které jsou přímo využitelné pro další činnost v oboru při provádění dalších analýz. Doporučení jsou vhodná pro první (předběžný) návrh, tak i při pozdější přesnější analýze s ohledem na možné zdroje vstupních dat.

6. Je popsána současná metodika sběru dat. S využitím těchto poznatků je vytvořena Karta poruch a přízpůsobena pro malý dopravní letoun EV 55 a Přehled poruch letounů EV 55. Postupy pro zpracování dat jsou zapracovány do konkrétní aplikace pomocí excelovských tabulek usnadňující zpracování provozních dat. Uvedené postupy v disertační práci by měly sloužit k ověření předpokladů použitých při spolehlivostních analýzách. Další využití Přehledu poruch letounů souvisí s údržbou a ekonomikou provozu.

Podkladem byly zejména práce vzniklé na Leteckém ústavu, VUT FSI v Brně, na kterých se autor podílel, praktické analýzy bezpečnosti a spolehlivosti vybrané soustavy letounu provedené v disertační práci ve spolupráci s leteckým průmyslem a publikace [29, 33]. Dále zkušenosti ze zaměstnání při vývoji malého dopravního letounu.

6 Závěr

Aplikace spolehlivostních analýz se v dnešní době stává nedílnou součástí certifikací i v oblasti menších letounů, což nebylo dosud běžné. Vyhodnocení provozní spolehlivosti je běžnou součástí komerčních smluv nejen v oblasti leteckého provozu. Problematika zároveň úzce souvisí s ekonomikou provozu a údržbou.

V disertační práci jsou navrženy a uvedeny vhodné návody sběru, vyhodnocení a doporučení pro zpracování dat, které by měly pomoci při provádění těchto analýz.

Na praktickém příkladu hydraulické soustavy malého dopravního letounu jsou aplikovány postupy vyhodnocení vybraného parametru spolehlivosti – intenzity poruch a dále pravděpodobnosti poruch. Jsou porovnány komerční databáze, data uvedená v literatuře Modelování systémů s hydraulickými mechanismy [18], Katalog intenzit poruch letadlových soustav [19], standová data a data z provozu letounu podobné kategorie. Taková srovnání a doporučení, s ohledem k častější aplikaci spolehlivostních analýz a aplikaci i tam, kde to nebylo dříve běžné, nebyla zatím k dispozici. Jak bylo zmíněno, jsou vstupní data základní podmínkou správné spolehlivostní analýzy. Uvedené výsledky by měly pomoci při přípravě dalších analýz v leteckém průmyslu, ale i v dalších průmyslových odvětvích.

V neposlední řadě práce přispívá k rozvoji vědního oboru spolehlivosti.

7 Seznam použité literatury

- [1] FAR Part 23. *Airplanes Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplanes*. Federal Aviation Administration, Washington D.C., www.faa.gov, 7/2002.
- [2] Advisory Circular AC 23.1309-1C. *Equipment, Systems, and Installations in Part 23 Airplanes*. Federal Aviation Administration, Washington D.C., www.faa.gov, 3/1999.
- [3] RTCA DO-160D. *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington D.C., 12/2002.
- [4] Hlinka, J. *Vypracování metod posuzování spolehlivosti letadlové techniky*, (Disertační práce), Letecký ústav VUT-FSI v Brně, 2004.
- [5] ČSN IEC 605-4. Norma: *Zkoušky bezporuchovosti zařízení (část 4: Postupy pro stanoven bodových odhadů a konfidenčních mezí z určovacích zkoušek bezporuchovosti zařízení)*.
- [6] Holub, R, Vintr, Z. *Spolehlivost letadlové techniky* (elektronická učebnice), VUT-FSI, Brno, 2001, 233 str., <http://clkv.fme.vutbr.cz/clkv.html>.
- [7] ReliaSoft Corporation. [online]. 2008, [cit. 2008-03-05].
Dostupné z: < <http://www.weibull.com/AccelTestWeb/> >
- [8] MIL-HDBK-338B. *Electronic Reliability Design Handbook*, US Department of Defense, Washington DC, 10/1998, 1042 str.
- [9] Nancy R. Mann, Ray. E. Schafer, Nozer D. Singpurwalla. *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*, John Wiley & SONS 1974, 564 stran ISBN 0-471-56737-X.
- [10] ČSN IEC 60605-6. Norma: *Zkoušení bezporuchovosti zařízení, část 6: Testy platnosti a odhad konstantní intenzity poruch a konstantního parametru proudu poruch*.
- [11] ARP 4761. *Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment*, SAE Warrendale USA, 12/1996, 331 str.
- [12] MIL-HDBK-217F. *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, US Department of Defense, Washington DC 20301, 2/1991, 205 str.
- [13] NSWC 98/LE1. *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*, Naval Surface Warfare Center, US Department of Defense, 5/1992, 264 str.
- [14] FMD-97. *Failure Mode / Mechanism Distributions*, IIT Research Institute – Reliability Analysis Center, Rome, New York, <http://rac.alionscience.com>, 1999.
- [15] Villemeur, A. *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment – Volume 1*, John Wiley & sons, Chichester, 1992, 363 str. ISBN 0 417 93048 2.
- [16] Hlinka, J. Habilitační práce: *Posuzování bezpečnosti a spolehlivosti letadlové techniky v průběhu návrhu a certifikace*, Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně, Letecký ústav VUT-FSI v Brně, 2007. ISBN 978-80-214-3517-9.
- [17] Flight Safety Foundation [online]. 2010, [cit. 2010-08-25].
Dostupné z: < <http://aviation-safety.net/database/> >
- [18] Nepraž, Nevrlý, Peňáz, Třetina. *Modelování systémů s hydraulickými mechanismy*, 173 stran, ISBN 80-214-2187-8.
- [19] Jelínek, M. *Katalog intenzit poruch letadlových soustav*, VZLÚ, 30.7.1985.

- [20] ČSN IEC 60605-4. Norma: *Zkoušky bezporuchovosti zařízení, Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly.*
- [21] ČSN EN 61649. Norma: *Weibullova analýza*, červenec 2009.
- [22] *Katalog pro kódování vad letecké techniky*, VZS-031 Praha 1975.
- [23] Oficiální stránky společnosti SRC – System Reliability Center
<http://src.alionscience.com/spidr/>
- [24] Oficiální stránky společnosti Relex Software Corporation
<http://www.relex.com/>
- [25] Oficiální stránky společnosti RAC
<http://www.reliasoft.com/>
- [26] Oficiální stránky společnosti Evektor s.r.o.
<http://www.evektor.cz/>

8 Seznam prací vztahujících se k disertační práci

- [29] Novák, J., Hlinka, J. *Spolehlivostní analýza a zkoušky části letadlové hydraulické soustavy*. In Proceedings of the 19th International Conference on Hydraulics and Pneumatics 1. Ostrava, Česká strojnická společnost, 2006, strana 106-114. ISBN 80-02-01809-5.
- [30] Novák, J. Výpočtová zpráva: *Zatížení trupu*, letoun EV55, Evektor s.r.o., 2006. EV55530-00-L.
- [31] Warchil, M., Novák, J. Výpočtová zpráva: *Zatížení spoje křídlo-trup*, letoun EV55, Evektor s.r.o., 2006. EV55530-01-L.
- [32] Novák, J. Spolehlivostní analýza: *Předběžné posouzení systému avioniky*, letoun EV55, VUT FSI v Brně - Evektor s.r.o., 2005. EV55998-06-R.
- [33] Hlinka, J., Novák, J. *Reliability Analysis of Small Sport Airplane*. In Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2005. Pardubice, Czech Republic, University of Pardubice, 2005, strana 119-127. ISBN 80-7194-769-5.

9 Ohlasy