



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**PLÁN PROHLÍDEK A ÚDRŽBY DRAKU MALÉHO  
DOPRAVNÍHO LETOUNU S VYUŽITÍM MODERNÍCH  
PŘÍSTUPŮ**

MODERN MAINTENANCE PROCEDURES FOR AIRFRAME INSPECTIONS FOR GENERAL AVIATION  
CATEGORY AIRCRAFT

**ZKRÁCENÁ VERZE PhD Thesis**

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Rostislav Košťál**

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.**

**BRNO 2017**

## **ABSTRAKT:**

Rychlý vývoj letectví v oblasti malých dopravních letadel (FAR 23/ EASA CS-23) výrazně zvyšuje požadavky na údržbu letadel. Tento rozvoj přináší implementaci způsobů údržby, které byly ještě donedávna výhradně aplikovány v kategorii velkých dopravních letadel (FAR 25/ EASA CS-25). Výrobci letadel postupně ustupují od současné praxe údržby typu HARD TIME a aplikují způsoby údržby závislé na stavu udržovaného objektu.

Rozvoj konstrukcí koncepce DAMAGE TOLERANCE proces přejímání údržby založené na skutečném stavu objektu urychluje. Výrobci letadel dále hledají způsoby integrace požadavků na údržbu konstrukcí typu DAMAGE TOLERANCE do procedur plánování údržby. Jedním z přístupů, který řeší oba výše uvedené problémy je přístup k údržbě MSG-3, který je dnes standardem u letadel kategorie FAR 25/ EASA CS-25. Jediný problém, který MSG-3 detailně neřeší je otázka vhodných inspekčních metod použitých pro konkrétní část letounu. Tuto otázku lze vyřešit aplikací Vícekriteriálního Hodnocení Variant (VHV) pro inspekční metody konstrukcí letounu.

## **ABSTRACT:**

Aircraft scheduled maintenance requirements are rapidly extending and developing due to rapid evolution of small aircraft. This evolution leads to implementation of until recently exclusively airliner class maintenance standards. In the field of general aviation and FAR 23/ EASA CS-23 especially, preventive maintenance based on part replacing or repairing is still dominant. DAMAGE TOLERANCE philosophy implementation into an aircraft design influences maintenance procedures, which are adjusted to older SAFE LIFE philosophy.

Aircraft manufactures are developing new ways, how to integrate requirements of damage tolerance application into scheduled maintenance procedures. Huge airliner manufactures (FAR 25/ CS-25) are using the ATA MSG-3 intelligent maintenance approach based on inspection. This dissertation thesis develops intelligent scheduled maintenance methodology, utilizing ATA MSG-3 procedures, expert knowledge and Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA).

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

MSG-3, Údržba letadel, NDT, Inspekce Prohlídka, Životnost, Únava, Koroze, Náhodné poškození, Konstrukce, Vícekriteriální hodnocení

## **KEYWORDS:**

MSG-3, Aircraft Maintenance, Inspection, Durability, Corosion, Acidental damage, Construction, MCDA

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

## Obsah

|       |                                                                                   |           |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1     | ÚVOD .....                                                                        | 5         |
| 2     | SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....                                           | 5         |
| 3     | CÍLE PRÁCE.....                                                                   | 6         |
| 4     | ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....                                                   | 6         |
| 4.1   | msg-3.....                                                                        | 6         |
| 4.1.1 | <i>Tvorba plánované údržby konstrukce .....</i>                                   | <i>9</i>  |
| 4.2   | Metody stanovení intervalů mezi prolídkami .....                                  | 11        |
| 4.2.1 | <i>Šíření trhliny pod proměnlivou amplitudou.....</i>                             | <i>12</i> |
| 4.2.2 | <i>Detekovatelná délka trhliny .....</i>                                          | <i>13</i> |
| 4.2.3 | <i>Výpočet intervalů údržby.....</i>                                              | <i>17</i> |
| 4.2.4 | <i>Vytvoření stromu logického rozhodování a jeho začlenění do MSG-3.....</i>      | <i>18</i> |
| 4.3   | Vícekritériální hodnocení variant .....                                           | 19        |
| 4.3.1 | <i>Metody stanovení vah kritérií .....</i>                                        | <i>20</i> |
| 4.3.2 | <i>Metody stanovení pořadí variant.....</i>                                       | <i>21</i> |
| 4.3.3 | <i>Vytvoření stromu logického rozhodování a jeho začlenění do MSG-3.....</i>      | <i>23</i> |
| 5     | HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....                                                       | 24        |
| 5.1   | Návrh údržbového plánu na konkrétní části konstrukce (Spodní pásnice křídla)..... | 24        |
| 5.1.1 | <i>Stanovení základních parametrů inspekce.....</i>                               | <i>26</i> |
| 5.1.2 | <i>Určení efektivní metody údržby pomocí metody TOPSIS.....</i>                   | <i>27</i> |
| 5.1.3 | <i>Stanovení úkolů údržby .....</i>                                               | <i>29</i> |
| 5.2   | Vyhodnocení údržbového plánu Pásnice .....                                        | 29        |
| 6     | ZÁVĚR .....                                                                       | 31        |
|       | Použité symboly .....                                                             | 32        |
|       | Seznam zkratk.....                                                                | 32        |
|       | Seznam Zdrojů.....                                                                | 33        |
|       | Publikace autora.....                                                             | 35        |
|       | Tvůrčí aktivity .....                                                             | 35        |

|                        |    |
|------------------------|----|
| AUTORŮV ŽIVOTOPIS..... | 36 |
|------------------------|----|

# 1 ÚVOD

Údržba letadlové techniky je problematikou s neustále zvyšujícími se požadavky na efektivitu, ekonomičnost a spolehlivost. Program prohlídek a údržby je závislý na mnoha faktorech, například kategorie a typ letadla, složitost a typ konstrukce letadla, koncepce konstrukce z hlediska únavy materiálu, výrobních technologií, složitosti systémů a jejich požadavků na spolehlivost, způsobu a místě provozu letounu atd.

Obecně platí, že se vzrůstající snahou o zvyšování provozní spolehlivosti letounu rostou i náklady na údržbu. Snahou výrobců letadel je optimalizace údržby z hlediska nákladů, časových prodlev při zachování požadované spolehlivosti a bezpečnosti provozu letounu. Tento trend je podporován i narůstajícím vytížením civilní letecké dopravy. V dnešní době se rozvíjí snaha o aplikaci diagnostických a automatizačních systémů pro údržbu.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V kategorii letadel FAR 23/CS-23, nebyly tyto trendy v minulosti, natolik patrné, z toho důvodu stále u těchto letadel převládají starší metody údržby s převládající preventivní údržbou, výměnami letadlových dílů a celků nebo jejich renovací. V posledních letech však u této kategorie letadel dochází ke značnému pokroku, při kterém letouny začínají používat moderní komplexní systémy, které byly dříve používány výhradně u dopravních letadlech kategorie FAR 25/CS-25. Tento trend lze sledovat i v přístupu k návrhu draku letadla z hlediska únavy, kde výrobci letadel pomalu začínají zavádět konstrukce s koncepcí DAMAGE TOLERANCE místo dnes obvyklé SAFE LIFE. Tento trend má vliv i na údržbu samotnou, u které dochází ke zvýšení její náročnosti včetně finančních nákladů.

V posledním desetiletí vzniklo několik prací, jejichž cílem je zefektivnění postupů údržby a snížení nákladů na údržbu. Hlavním trendem je zavádění systémů monitorování stavu konstrukce **SHM** (Structure Health Monitoring), pomocí aktivních senzorů, které jsou prezentovány např. v práci [11] a [12]. **SHM** systémy mohou v budoucnosti do značné míry zredukovat počet nutných inspekčních prohlídek. Tyto systémy se však v současnosti zavádí hlavně u velkých dopravních letadel, kde jsou monitorovány vybrané konstrukční celky. U malých dopravních letadel, je v dnešní době snaha o snížení nákladů a zefektivnění plánované údržby, například v dizertační práci Ing. Jindřicha Findy, Ph.D. [7] jsou implementovány metody používané u velkých dopravních letadel kategorie FAR 25/CS-25 do kategorie letadel FAR 23/CS-23, zejména pak přístup k údržbě dle **MSG-3** (Maintenance Steering Group v.3 rev 2011.1). Dizertační práce Jindřicha Findy je zaměřena primárně na systémy letadel, jelikož v jeho práci byly uvažovány letouny s koncepcí konstrukce SAFE LIFE. Nicméně některé postupy navržené v jeho práci mohou posloužit i pro řešení problematiky údržby draku a konstrukce letadel, zejména pak přístup k údržbě **MSG-3**.

**MSG-3** obsahuje základní postupy pro sestavení plánu údržby velkých dopravních letadel. Tyto postupy je nutné v některých ohledech přizpůsobit pro použití na letounech kategorie CS-23. Důležitou součástí plánování údržby je volba vhodných inspekčních metod, jejichž výběr se v **MSG-3** podrobně neřeší.

Problematika volby efektivních metod inspekce zůstává v současné době navzdory svému významu poněkud opomíjena. To je dáno i tím, že i dnes se stále doporučuje použití **NDT** inspekce na letadlech jen v případech, kdy není možno použít vizuální metody [17]. Většina prací se zabývá využitím **NDT** metod na letadlech z hlediska technické proveditelnosti a jejich aplikovatelnosti [25] [26]. Nalezené práce se však nedostatečně zabývají otázkou výběru konkrétní metody inspekce pro konkrétní část konstrukce letadla, z hlediska jejich efektivity v porovnání s ostatními metodami inspekce.

Pro efektivní výběr konkrétní metody je nutné uvažovat mnoho různých kritérií, jakými jsou například cena prohlídky, detekovatelná velikost poškození, nároky na personál atp. Jednotlivá kritéria reprezentující rozmanité požadavky je nutné mezi sebou porovnat. Jedním z vhodných způsobů porovnání více různorodých kritérií mezi sebou jsou metody Vícekritériálního Hodnocení Variant (**VHV**) resp. Multiple Criteria Decision Making Analysis (**MCDMA**). Jednotlivé metody jsou hodnoceny na základě preferencí a

hodnocení jednotlivých zvolených kritérií. Tyto metody se díky své univerzálnosti používají v celé řadě oborů od ekonomických po technické. Existuje několik studií Energetické koncepce využívající metody **MCDA**, například M. Beccali a kol. [13] používající **MCDA** ve studii návrhu energetické koncepce Sardinie v Itálii. Dalším příkladem univerzálnosti **MCDA** metod může být jejich použití při výzkumu závislosti na tabákových výrobcích, kde David J. Nutt a kol. [14] použil **MCDA** pro určení míry nebezpečnosti jednotlivých nikotinových výrobků. V letectví je **MCDA** využíváno v menší míře. X. Sun [15] ve své dizertační práci aplikuje **MCDA** při vývoji/ hodnocení konstrukčního návrhu letounu a dále pro výběr letounu zákazníky. V údržbě se tyto metody používají pro plánování údržby z hlediska výkonosti personálu a jeho efektivity, jak popisuje ve své práci H. WU a kol. [36]. Z dostupné literatury je patrné, že vícekritériální hodnocení variant je obecně použitelné v širokém spektru úloh. Vzhledem k faktu, že **MSG-3** ve své podstatě neřeší výběr konkrétní metody inspekce konstrukce může být problematika výběru konkrétní metody řešená pomocí vícekritériálního hodnocení variant, přičemž mohou být zároveň jednotlivá kritéria hodnocena s ohledem na požadavky provozu či provozovatele letounu.

### 3 CÍLE PRÁCE

Na základě informací uvedených v kapitole 2, autor nabyl přesvědčení, že u letadel kategorie CS-23/ FAR 23, je vhodné se zabývat otázkou výběru vhodné metody inspekce v rámci plánovaných prohlídek letounu, které budou doplňovat aktuální postupy **MSG-3**.

#### Přehled cílů dizertační práce:

- Získání a shrnutí dostupných informací v oboru údržby letadel, jejich životnosti a požadavků předpisů.
- Vytvoření metodiky pro aplikaci programu **MSG-3** na konstrukci draku malého dopravního letounu (doposud jen u dopravních letadel kategorie CS-25/FAR 25)
- Vypracování souboru doporučení pro volbu inspekčních metod s uvážením různorodého použití letounu a požadavků na údržbu (Výběr inspekčních metod pomocí vícekritériálního hodnocení variant) a jeho možná implementace do logiky **MSG-3**.
- Vytvoření certifikační báze pro tvorbu plánů údržby malého dopravního letounu, s uvážením použití koncepce **DAMAGE TOLERANCE** v konstrukci letounu.
- Vytvoření metod pro stanovení intervalů údržby, s uvážením specifického použití letadel kategorie CS-23/FAR 23.

### 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Jako základ práce slouží aplikace metodiky **MSG-3** na letouny kategorie CS-23/ FAR 23. A to i z důvodu, že základě oběžníku FAA AC-121-22C [5] musí být při vývoji nových dopravních letounů kategorie FAR 25 těžších jak 33000 liber (14968kg) použity nejnovější postupy **MSG** analýz. Zjednodušeně řečeno jde o jedinou metodiku uznávanou úřadem pro řešení údržby velkých dopravních letadel. Avšak v dnešní době jsou již postupy přejímány i do menších letounů, kategorie Business Jet (např. Cessna Citation Sovereign). **MSG-3** je pak rozšířeno o problematiku stanovení intervalů mezi prohlídkami pro vizuální i **NDT** metody inspekce a výběr efektivních metod na základě výběru pomocí Vícekritériálního Hodnocení Variant (**VHV**).

#### 4.1 MSG-3

**MSG-3** byla vydána v roce 1980, od té doby je neustále aktualizována pomocí revizí, poslední revize byla vydána v roce 2015 pod názvem:

„**MSG-3: Operator/ Manufacturer Scheduled Maintenance Development, Revision 2015.1**“

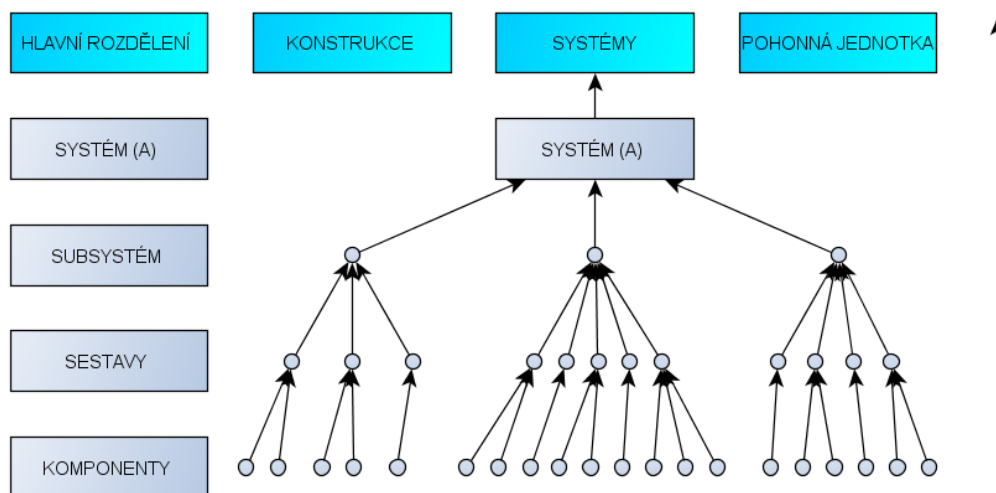
**Pozn.:** Tato práce vychází z revize 2011.1 [3]. Nejzásadnější rozdíl mezi revizí 2011.1 a 2015.1 je v tom, že revize 2015.1 je rozdělena do dvou samostatných dokumentů (Letadla s pevným křídlem, Helikoptéry).

Základní rozdíl mezi staršími přístupy k údržbě a **MSG-3** je v logice plánování údržby, kdy údržba dle starších přístupů k údržbě (např. **MSG-2**) byly procesně orientované, na rozdíl od úkolově orientované **MSG-3** [8,13]. Pro každou potenciální příčinu poruchy poskytuje **MSG-3** úkol pro zajištění potřebné preventivní údržby. Úkolově orientovaná údržba se skládá z konkrétních úkolů, které jsou vybrány pro daný funkční důsledek poruchy na základě spolehlivostní charakteristiky daného zařízení.

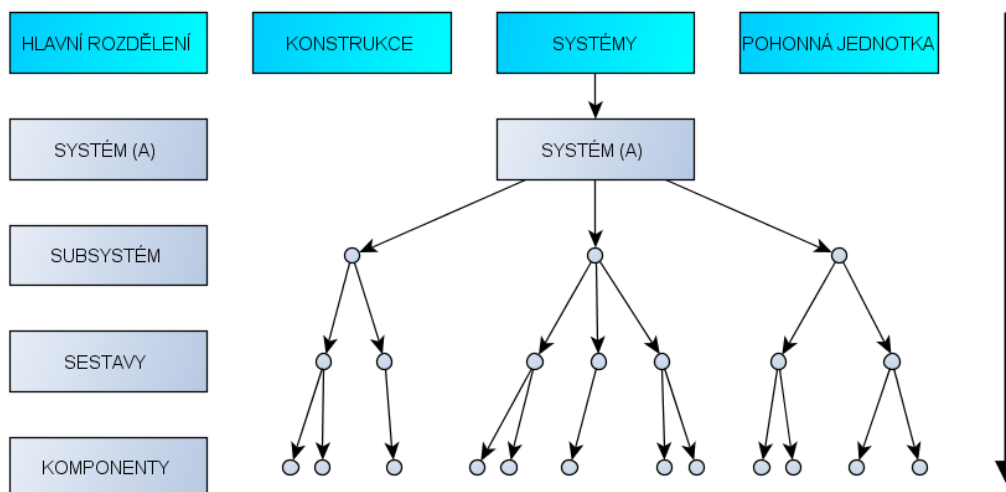
Úkoly jsou řazeny na základě nákladů od nejnižších po nejvyšší a v závislosti na závažnosti důsledků poruchy (bezpečnostní, provozní, ekonomické, skrytá bezpečnostní, skrytá ekonomická) je vybrán jeden nebo více úkolů. Pro údržbu mohou být vybrány tyto obecné úkoly [3]:

1. Mazání / Běžná údržba (Lubrication / Servicing)  
Za účelem zachování funkcí daného zařízení.
2. Provozní / Vizuální kontrola (Operational / Visual check)  
Cílem tohoto úkolu je zajistit, zda zařízení plní svůj účel. Jedná se o úkol, jehož cílem je zjistit poruchu.
3. Inspekce / Funkční kontrola (Inspection / Functional Check)  
Funkční kontroly sledují kvantitativní znaky ke zjištění, zda jedna nebo více funkcí daného zařízení jsou prováděny ve stanovených mezích.  
  
U inspekce se rozlišují tři úrovně kontroly, které mají určit, zda zařízení plní svůj zamýšlený účel.
  - Obecná vizuální prohlídka
  - Podrobná vizuální prohlídka
  - Speciální detailní inspekce
4. Renovace  
Renovace se provádí, pokud je k navrácení požadovaných vlastností zařízení nutné důkladné očištění zařízení, renovace nebo výměna určitých dílů.
5. Vyřazení  
Vyřazení z provozu určitého zařízení po uplynutí stanovené doby života a jeho výměna za nový kus.

Dalším podstatným rozdílem je způsob v provádění analýzy, která byla u starších přístupů k údržbě prováděna „**Od spodu nahoru**“, tedy od jednotlivých komponent, přes sestavy až k samotnému výrobku [2]. U **MSG-3** je volen opačný způsob „**Z vrchu dolů**“ tedy, kdy se analýza provádí od samotného výrobku přes sestavy k jednotlivým komponentům. Důvodem zavedení tohoto způsobu analýzy bylo, že například při analýze **MSG-2** muselo být individuálně řešeno mnoho prvků. V případě **MSG-3** se při analýze z vrchu dolů na nižších úrovních řeší jen prvky, které mohou představovat bezpečnostní, provozní, nebo ekonomické riziko. Způsob provádění analýzy **MSG-2** a **MSG-3** je znázorněn na *Obr. 4-1* a *Obr. 4-2*.



Obr. 4-1 Způsob postupu analýzy MSG-2



Obr. 4-2 Způsob postupu analýzy MSG-3

Při aplikaci logiky **MSG-3** se utváří 4 pracovní skupiny (Obr. 4-3)[3]:

- Systémy a pohonné jednotky (Aircraft Systems/Powerplant Analysis Procedure)
- Konstrukce letadel (Aircraft Structural Analysis Procedure)
- Zonální analýza (Zonal Analysis Procedure)
- Ohrožení blesky a vysokofrekvenčními poli (Lightning/ High Intensity Radiated Field (**L/ HIRF**))

#### Systémy a pohonné jednotky

Účelem programu údržby Systémů a pohonné jednotky je provádění kontrol a stanovení periodicity údržby typických palubních systémů, tj. soustava řízení, pneumatický/ hydraulický systémy, avionika, zdroje a rozvod el. energie, pohonných systémů atd.

#### Konstrukce letadel

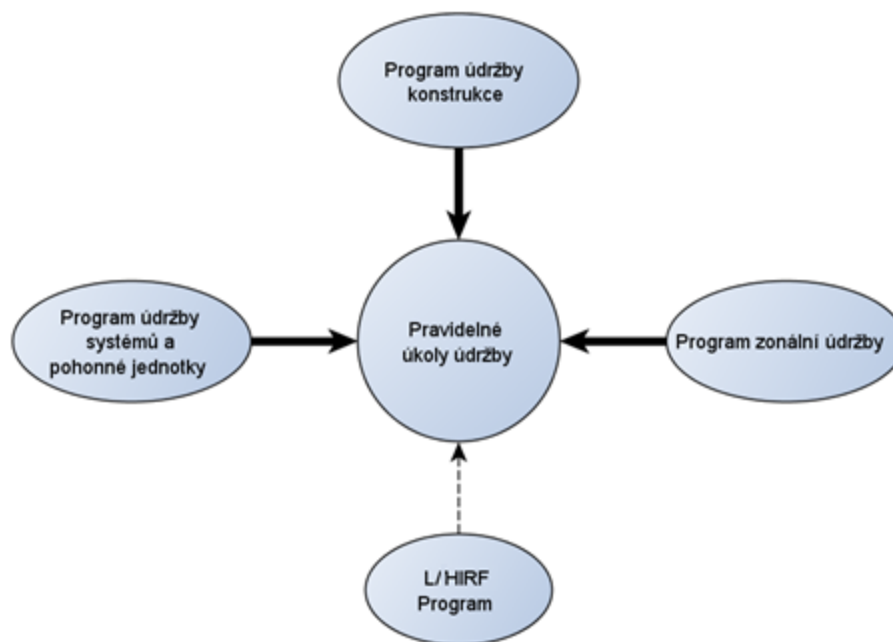
Účelem inspekčního programu konstrukcí letadel, je zajištění včasné detekce a opravy strukturálních poškození v průběhu provozu letounu. Detekce koroze, únavových poškození, nebo drobných náhodných poškození jsou prováděny vizuálními nebo speciálními (**NDT**) metodami.

## Zonální analýza

Účelem zonální analýzy je posoudit stav všech systémů, konstrukčních částí obsažených v analyzované zóně prostředky vymezenými úkoly zonální inspekce. Úkoly zonální inspekce zahrnují např. vizuální kontroly elektrického vedení, hydraulických hadic, kontrolu spojů, a konstrukcí atd., které jsou obsaženy v dané zóně.

## Lighting/ High Intensity Radiated Field

Účelem údržby **L/ HIRF** je včasná detekce degradace a oprava prostředků ochrany proti **L/ HIRF**. Úkony údržby **L/ HIRF** jsou ve většině případů pokryty úkony zonální údržby. Zvláštní analýza údržby **L/ HIRF** se provádí pouze v případech, ve kterých není možné pomocí zonální údržby odhalit všechny možné degradace prostředků ochrany proti **L/ HIRF**.



Obr. 4-3 Pracovní skupiny podílející se na sestavení plánu údržby

Dizertační práce se zaměřuje výhradně na aplikovanou metodiku MSG-3 na konstrukce letounu, ostatní skupiny nejsou v práci řešeny.

### 4.1.1 Tvorba plánované údržby konstrukce

Úkoly plánované údržby konstrukce a jejich intervaly jsou založeny na posouzení informací o konstrukčním řešení, únavové životnosti, zkušenostech s podobnou konstrukcí a výsledcích relevantních zkoušek.

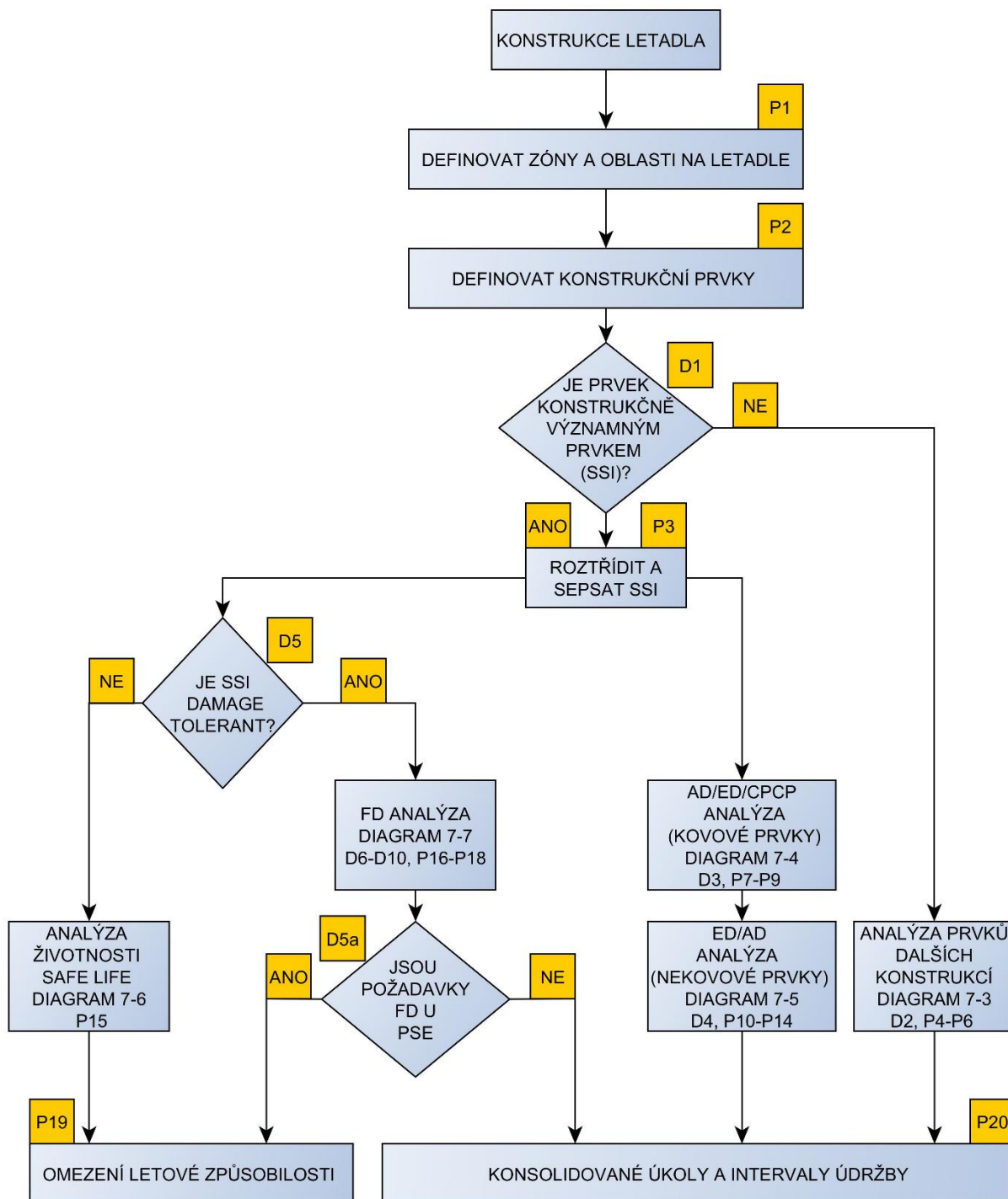
**Posouzení konstrukce pro přidělení jednotlivých úkolů údržby by mělo obsahovat:**

- a.) **Zdroje poškození konstrukce:**
  - 1.) Náhodné poškození (**AD**)
  - 2.) Poškození od prostředí (**ED**)
  - 3.) Únavové poškození (**FD**)
- b.) **Hodnocení citlivosti konstrukce na jednotlivé druhy poškození**
- c.) **Důsledky strukturálního poškození na zachování letové způsobilosti:**
  - 1.) Důsledky pro letadlo (např. ztráta funkce nebo snížení zbytkové pevnosti).
  - 2.) Důsledky současného únavového poškození více prvků.

- 3.) Ovlivnění letu nebo letových vlastností způsobené interakcí strukturálního poškození nebo poruchy s ostatními systémy nebo pohonnými jednotkami letadla.
  - 4.) Důsledky ztráty částí konstrukce během letu.
- d.) **Posouzení použitelnosti a účinnosti různých metod prevence, kontroly a detekce strukturálního poškození s uvažováním inspekčních prahů a intervalů opakování**

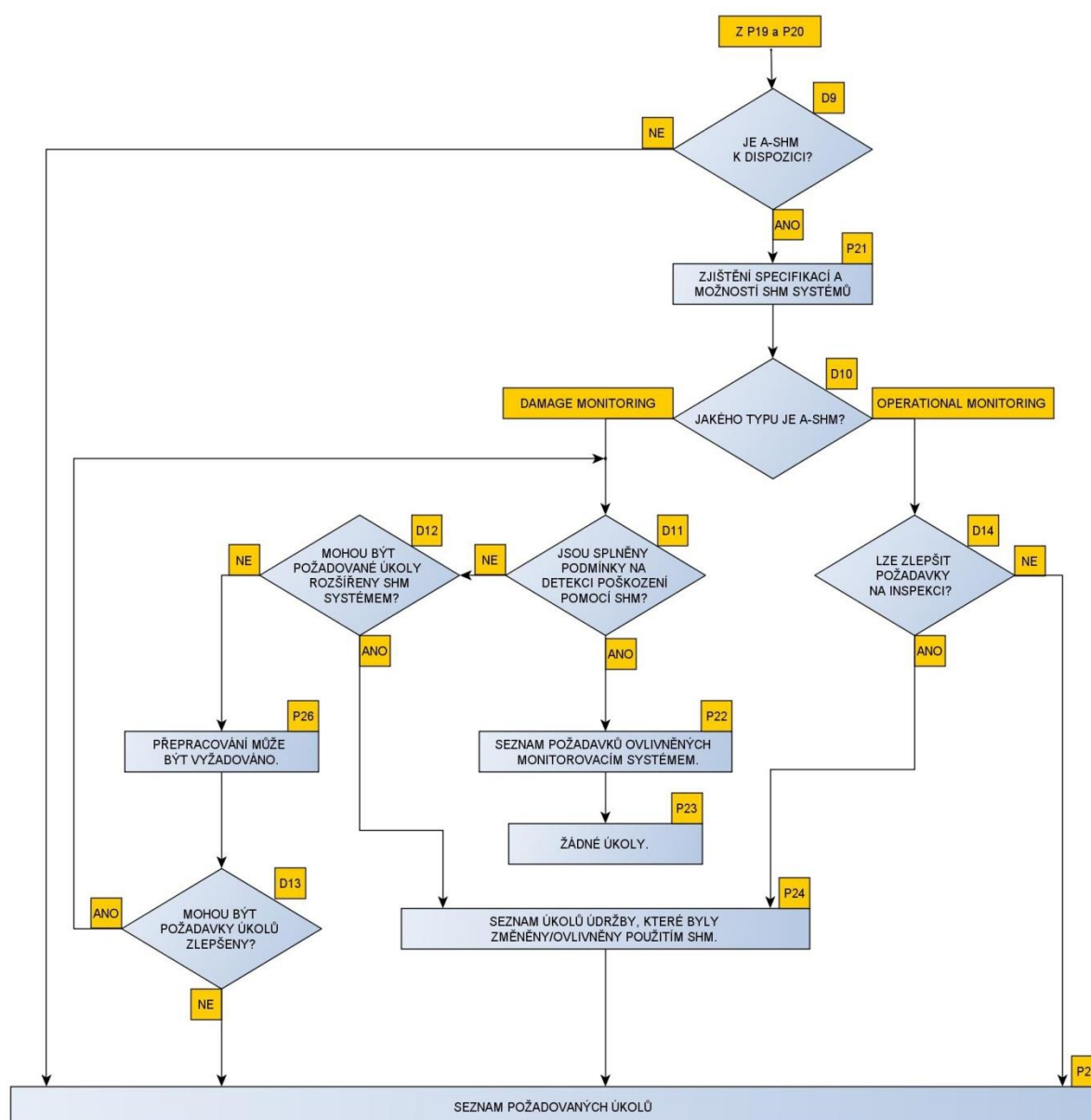
**Podrobnosti o jakékoliv aplikaci SHM navržené výrobcem letadla**

**MSG-3** pro každou skupinu používá strom logického rozhodování pro určení efektivních úkolů údržby.



Obr. 4-4 Logický diagram údržby konstrukce

Postupy byly rozšířeny o možnosti aplikace SHM systému do údržby letadel na základě z ISSUE PAPER IP 105 [10].



Obr. 4-5 Logický Diagram – Implementace A-SHM

## 4.2 METODY STANOVENÍ INTERVALŮ MEZI PROLÍDKAMI

Důležitým bodem při přípravě efektivní údržby draku letounu, je stanovení intervalů prohlídek konstrukce. To platí především pro konstrukce DAMAGE TOLERANCE, u kterých může v průběhu života letounu dojít k inicializaci únavových trhlin.

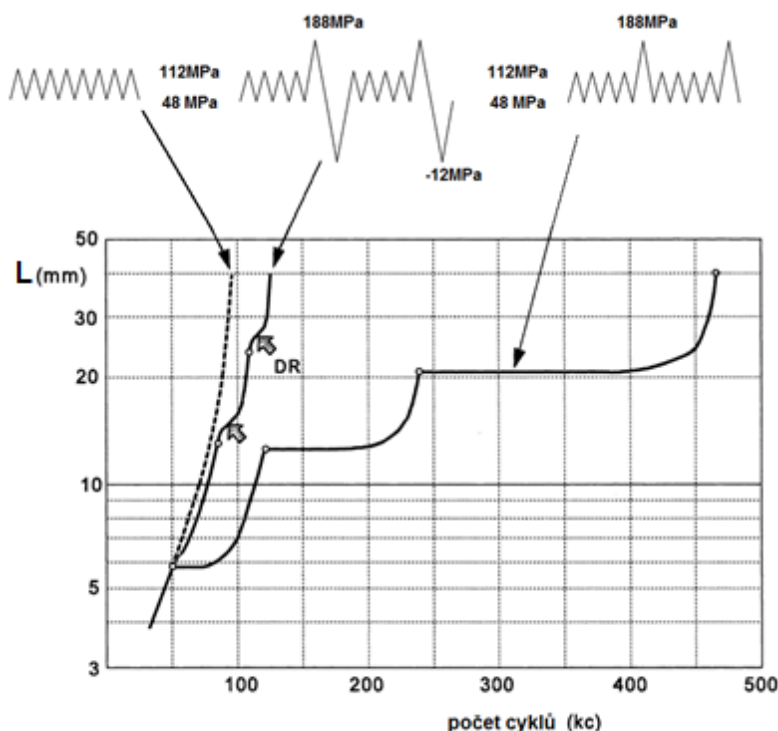
Pro zjištění intervalu údržby je nutné určit růstové křivky trhliny včetně detekovatelné a kritické délky trhliny. V případě návrhu nového letounu můžeme provést prvotní stanovení únavových charakteristik na základě teorie únavy a na jejich základě určit prvotní intervaly inspekčních prohlídek nového letounu. Intervaly je poté možné/ nutné upravovat na základě reálných únavových zkoušek nebo na základě zkušeností z provozu.

### 4.2.1 Šíření trhliny pod proměnlivou amplitudou

Šíření trhliny pod proměnlivou amplitudou zatížení je složitý a komplexní problém, který je předmětem intenzivního výzkumu. Pro potřeby práce jsou uvedeny jen základní informace, které mohou být využity v případě návrhu údržbových plánů.

#### Základní princip

V případě použití proměnného (variabilního) zatěžování dochází při špičkovém zatížení (přetížení) k rozšíření plastické oblasti [17,18,19]. To má za následek zvětšení stlačené oblasti na čele trhliny a redukcí otevírání trhliny. Tento jev se nazývá „**crack retardaton**“ (zpomalení trhliny) nebo „**load interaction**“ (interakce zatížení). Efekt přetížení je dobře patrný na příkladu Obr. 4-6, kde byly zkoušeny vzorky hliníkové slitiny 2024-T3 při různém přetížení



Obr. 4-6 Únavové charakteristiky pro různá zatěžování materiálu 2024-T3 [17]

Z obrázku je patrné, že přetížení v jednom směru výrazně prodloužilo únavovou životnost daného vzorku. V případě přetížení oběma směry, došlo k méně výraznému zvýšení životnosti.

Na základě čehož je možné usuzovat, že pokud nebude docházet k extrémním a příliš častým přetížením, při nichž dochází k poškození konstrukce, vydrží daná konstrukce déle, než kdyby byla zatížena cyklickým namáháním o konstantní amplitudě.

Z hlediska údržby je proto vhodné, pokud jsou analýzy životnosti počítány z reálných, či naměřených spekter zatížení, měřených na letadlech podobné konstrukce a podobného způsobu využití, pro získání co nejpresnějších dat o životnosti konstrukce. To může vest k eliminaci či snížení počtu nutných budoucích zásahů do plánovaných úkolů údržby během života letounu.

## 4.2.2 Detekovatelná délka trhliny

Detekovatelná délka trhliny je úroveň poškození v cestě primárního zatížení, která je detekovatelná pomocí vybrané detekční metody. Detekovatelná délka trhliny je obvykle větší než počáteční délka trhliny. Je nutné počítat s faktem, že skutečná délka trhliny, která je uváděna jako detekovatelné poškození, se skládá z detekovatelné délky trhliny a velikosti trhliny která je skrytá (například pod hlavičkou nýtů, přepletováním atd.).

### Vizuální prohlídky

Jak již bylo zmíněno, každá trhlina nebo poškození se skládá s viditelné a skryté části. Pokud používáme vizuální prohlídky je důležité odvodit nebo určit základní detekovatelnou délku trhliny  $L_{BAS}$ , aby se dospělo k určení viditelné délky trhliny  $L_{VIS}$ . Skrytá část trhliny  $L_H$  je určena nejčastěji výpočtem nebo změřena obecnými metodami. Detekovatelná délka  $L_{DET}$  trhliny je potom:

$$L_{DET} = L_{VIS} + L_H \quad (1)$$

Pro získání detekovatelné délky trhliny  $L_{BAS}$  je nutné uvažovat následující hlavní faktory [17]:

#### - Faktor viditelnosti

Faktor viditelnosti popisuje, jak blízko je možné přiblížit se k prohlížené konstrukci pouhým okem. Pokud je konstrukce skrytá nebo vzdálenost od oka pozorovatele je vyšší než 3 m (118 in.), faktor viditelnosti je nutné hodnotit jako „**Nedostatečný**“ a je nutné volit jinou metodu údržby nebo upravit danou konstrukci. V případě, že je vzdálenost prohlížené konstrukce mezi 1,5 a 3 m (59–118 in.) je hodnocení faktoru viditelnosti „**Slabý**“. V případě, že je vzdálenost 0,5 a 1,5 m (19–59 in.) je hodnocení „**Průměrný**“. V případě, že přístup ke sledované konstrukci je naprosto volný a technik se může přiblížit na takovou vzdálenost, kterou potřebuje, aby měl ideální podmínky pro inspekci konstrukce je faktor viditelnosti hodnocen jako „**Dobrý**“.

#### - Faktor zaplněnosti prostoru

Faktor zaplněnosti prostoru hodnotí množství komponent a částí systémů, včetně jejich složitosti, instalovaných v prohlíženém prostoru. Hodnocení má tři úrovně. V případě, že je prohlížený prostor zakryt, například elektrickým vedením a táhly řízení je hodnocení faktoru zaplněnosti „**Zaplněn**“. V případě, že v prostoru nejsou žádné komponenty či systém, které by prostor zakrývaly, je hodnocení „**Volný prostor**“. Střední úroveň faktoru zaplněnosti je definována „**Mírně zaplněn**“.

#### - Faktor velikosti

Pro jednoduché **GVI** je obvykle posouzení faktoru velikosti bráno s ohledem na zónové rozdělení letounu. Hodnocení „**Velká plocha**“ je přiřazeno komplexním celkům jakými jsou panely trupu nebo potah křídla, zatímco „**Středně velká plocha**“ je hodnocení pro plochy o rozloze zhruba jeden metr čtvereční.

Pro detailní vizuální prohlídky **DET** je nutné brát v potaz velikost **SSI**. Rámy nebo nosníky jsou hodnoceny „**Velká část**“. Žebra se stringery jsou příkladem částí hodnocených „**Střední část**“. Části, u kterých je prohlížená plocha menší, jak 10 cm<sup>2</sup> je hodnocení faktoru velikosti „**Malá část**“.

## - Faktor osvětlení

Hodnocení osvětlení a podmínky se mohou měnit od přirozeného slunečního světla až po umělé bodové osvětlení. Pro jednoduché **GVI** se rozlišují dvě hodnocení. „**Zastíněné plochy**“ pro části, které jsou zastíněny částmi konstrukce letounu od obvyklých zdrojů světla, jakými jsou stropní lampy, sluneční svit. V případě ploch, které jsou vystaveny obvyklému světelnému zdroji je hodnocení „**Plochy osvětlené obvyklým zdrojem světla**“. V případě detailní vizuální **DET** prohlídky je obvykle nutné použít zdroje koncentrovaného světla „**Vyžadován zdroj koncentrovaného světla**“

## - Faktor znečištění

Stav prohlíženého povrchu se může měnit v závislosti na povaze režimu ochrany, přítomnosti tmelů, maziv a celkové úrovni nečistot. Povrch je hodnocen jako „**Čistý**“, pokud byly veškeré nečistoty odstraněny a „**Znečištěn**“ pokud, je povrch stále pokryt nečistotami. U detailních vizuálních prohlídek je obvykle vyžadováno očištění povrchu prohlížené konstrukce před inspekční prohlídkou. V případě jednoduchých vizuálních **GVI**, je časté, že se očištění konstrukce nevyžaduje, a znečištění je promítnuto do specifikace velikosti skryté trhliny  $L_H$ .

Kombinací výše uvedených faktorů získáme hodnocení pomocí, kterých definujeme velikost  $L_{BAS}$  Tab. 1.

## - Určení základní velikosti detekovatelné trhliny

Jakmile je určena základní velikost detekovatelné trhliny  $L_{BAS}$ , je možné určit velikost viditelné délky trhliny  $L_{VIS}$ . Tu lze určit tak, že hodnota  $L_{BAS}$  je vynásobena korekčním faktorem „tloušťky“ (Gauge Factor) a korekčním faktorem „hrany“ (Edge Factor).

U korekčního faktoru „tloušťky konstrukce“ (Gauge Factor) se bere v úvahu fakt, že trhliny určité délky se stávají hůře zjištěitelné s tím, jak se zvyšuje tloušťka daného materiálu. To je způsobeno tím, že se zvyšující se tloušťkou materiálu, dochází k omezení „otevírání“ trhliny, což má za následek „uzavřenější“ a hůře detekovatelný tvar trhliny.

Korekční faktor „tloušťky konstrukce“ je stanoven následovně:

$$t < 5mm (0,197 in.) \rightarrow k_g = 1,00 \quad (2)$$

$$5mm (0,197 in.) < t < 10mm (0,394 in.) \rightarrow k_g = 1,25 \quad (3)$$

$$t > 10mm (0,394 in.) \rightarrow k_g = 1,50 \quad (4)$$

$t$  = tloušťka

$k_g$  = faktor „tloušťky“

Korekční faktor „hran“ (Edge Factor) bere v úvahu fakt, že trhliny určité délky na hraně konstrukce jsou lépe zjištěitelné než trhliny, které jsou mimo hranu konstrukce. Bent [17] uvádí, že detekovatelná délka trhliny na hraně konstrukce odpovídá polovině detekovatelné délky trhliny mimo hranu.

Korekční faktor „hrany“ je stanoven následovně:

$$Trhlina mimo hranu konstrukce \rightarrow k_e = 1,00 \quad (5)$$

$$Trhlina na hraně konstrukce \rightarrow k_e = 0,50 \quad (6)$$

$k_e$  = faktor „hrany“

| Detekovatelná délka trhliny dle Benta |  | GVI             | DET |
|---------------------------------------|--|-----------------|-----|
| Hodnocení přístupu                    |  | Hodnocení stavu |     |

|                     |              | Faktor zaplnění prostoru                                   | Hodnocení |
|---------------------|--------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| Faktor viditelnosti | Nedostatečný | Nutnost redefinovat způsob údržby nebo upravit konstrukci. | 0         |
|                     |              |                                                            |           |
|                     | Slabý        | Zaplněn                                                    | 1         |
|                     |              | Mírně zaplněn                                              | 2         |
|                     |              | Volný prostor                                              | 3         |
|                     | Průměrný     | Zaplněn                                                    | 2         |
|                     |              | Mírně zaplněn                                              | 3         |
|                     |              | Volný prostor                                              | 4         |
|                     | Dobrý        | Zaplněn                                                    | 3         |
|                     |              | Mírně zaplněn                                              | 4         |
|                     |              | Volný prostor                                              | 5         |

|                  |                                          | Faktor znečištění | Hodnocení |
|------------------|------------------------------------------|-------------------|-----------|
| Faktor osvětlení | Zastíněné plochy                         | Znečištěn         | 1         |
|                  |                                          | Čistý             | 2         |
|                  | Plochy osvětlené obvyklým zdrojem světla | Znečištěn         | 2         |
|                  |                                          | Čistý             | 3         |
|                  | Vyžadován zdroj koncentrovaného světla   | Znečištěn         | 3         |
|                  |                                          | Čistý             | 4         |

### Hodnocení praktičnosti

|                    |   | Faktor velikosti |                                        |                       |              |
|--------------------|---|------------------|----------------------------------------|-----------------------|--------------|
|                    |   | Velká plocha     | Středně velká plocha/<br>Velká součást | Středně velká součást | Malá součást |
| Hodnocení přístupu | 1 | 1                | 1                                      | 1                     | 1            |
|                    | 2 | 1                | 2                                      | 2                     | 2            |
|                    | 3 | 2                | 2                                      | 3                     | 3            |
|                    | 4 | 2                | 3                                      | 4                     | 4            |
|                    | 5 | 3                | 3                                      | 4                     | 5            |

### Základní velikost detekovatelné trhliny $L_{BAS}$ [mm]

|                        |   | Hodnocení stavu |     |     |     |
|------------------------|---|-----------------|-----|-----|-----|
|                        |   | 1               | 2   | 3   | 4   |
| Hodnocení praktičnosti | 1 | 295             | 205 | 145 | 100 |
|                        | 2 | 205             | 100 | 70  | 50  |
|                        | 3 | 145             | 70  | 35  | 22  |
|                        | 4 | 100             | 50  | 15  | 10  |
|                        | 5 | 70              | 22  | 10  | 8   |

| Velikost detekovatelné trhliny |      |   |             |     |   |                   |   |                                      |   |                               |   |                                                        |
|--------------------------------|------|---|-------------|-----|---|-------------------|---|--------------------------------------|---|-------------------------------|---|--------------------------------------------------------|
| Faktor tloušťky                |      | x | Faktor hran |     | x | $L_{BAS}$<br>[mm] | = | Viditelná délka<br>$L_{VIS}$<br>[mm] | + | Skrytá délka<br>$L_H$<br>[mm] | = | Velikost<br>detekovatelné<br>trhliny $L_{DET}$<br>[mm] |
| t<5 mm                         | 1    |   | Hrana       | 0,5 |   |                   |   |                                      |   |                               |   |                                                        |
| 5<t<10mm                       | 1.25 |   |             | 1   |   |                   |   |                                      |   |                               |   |                                                        |
| t>10mm                         | 1.5  |   | Mimo hranu  |     |   |                   |   |                                      |   |                               |   |                                                        |
|                                |      | X |             |     | X |                   | = |                                      | + |                               | = |                                                        |

Tab. 1 Určení detekovatelné velikosti trhliny

Vzhledem k tomu, že se uvažují i speciální detailní **NDT** prohlídky je postup rozšířen o použití speciálních **NDT** prohlídek.

## NDT prohlídky

V případě určení detekovatelné trhliny pomocí **NDT** metod je situace komplikovanější, jelikož nezáleží pouze na samotných podmínkách inspekce a druhu **NDT**, ale i na konkrétním použitém zařízení, jelikož se mohou dané parametry zařízení lišit dle použitého typu nebo výrobce. Dále se kladou zvýšené nároky na personál, přičemž **EASA** požaduje, aby veškeré inspekční práce zaštitila náležitě kvalifikovaná osoba, která bude za **NDT** inspekce zodpovídat [17,24].

V případě požadavku nebo nutnosti použití **NDT** metod by měly být pro určení vhodné **NDT** metody známy následující informace:

- Materiál konstrukce  
Kovy, kompozity, plasty a jiné materiály
- Typ poruchy  
Únavové trhliny, poruchy od prostředí (koroze), impakty atd.
- Přibližná poloha poruchy  
Předpokládané místo očekávané iniciace poruchy, a předpokládaný směr šíření.
- Základní rozměry poruchy  
Délka a hloubka trhliny, předpokládaná plocha a úbytek materiálu v případě zasažení korozí atd.
- Inspekční oblast  
Definovány hranice a části konstrukce, kde budou **NDT** metody použity.
- Příprava konstrukce pro inspekci  
Úroveň očištění a odstrojení konstrukce případně přilehlých systémů atd.

V případě, že jsou **NDT** metody zavedeny do údržby letounu je nutné si uvědomit, že ne všechny se v reálném provozu ukáží jako použitelné, respektive efektivní. Je proto důležité, aby byly jejich výsledky sledovány, zvláště pokud je výrobce nebo provozovatel na daný typ nově zavádí.

V případě použití **NDT** metod na letounu, musí být sestaven **NDT** manuál, ve kterém jsou popsány postupy jednotlivých **NDT** úkonů na letounu. Kromě toho obvykle obsahuje i obecný popis jednotlivých **NDT** metod. V tabulce Tab. 2 je uvedeno shrnutí velikostí detekovatelných vad jednotlivé metody **NDT**. Tyto hodnoty budou dále použity pro výpočet intervalů prohlídek.

| Velikost detekovatelných vad pro vybrané NDT metody |                                  |                    |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Vnější vady                                         | Metoda                           | Velikost vady [mm] |
|                                                     | Vířivé proudy (standardní sonda) | 2,54               |
|                                                     | Vířivé proudy (rotační sonda)    | 1,27               |
|                                                     | Magnetické metody                | >1,27*             |
|                                                     | Kapilární                        | 5,08               |
| Vnitřní vady                                        | Prozařovací metody               | 10,16              |
|                                                     | Ultrazvukové                     | 6,35               |

*\*Platí jen pro feromagnetické materiály, u slitin hliníku se metoda nepoužívá*

Tab. 2 Velikost detekovatelných vad pro vybrané **NDT** metody

### 4.2.3 Výpočet intervalů údržby

V případě, že známe detekovatelné velikosti vad, a jsou k dispozici růstové křivky trhlin pro konstrukci je možné určit interval údržby (inspekce).

Cílem inspekčních prohlídek je odhalení rostoucí vady (trhlina), před dosažením kritické velikosti, proto je důležitá definice, jak prvních, tak i následujících kontrol. V případě, že je odhalena trhlina, je buď zajištěna oprava a/nebo je daná část konstrukce sledována se zvýšenou intenzitou.

Pro určení intervalů údržby je důležité definovat rozptylový faktor. Jejich hlavním cílem je zajištění několikanásobné možnosti odhalení rostoucí vady konstrukce, ještě před jejím selháním. Pro určení intervalů údržby letounu se používají dva základní rozptylové faktory. Rozptylový faktor RF1 je zaměřen na celkovou životnost konstrukce, zatímco rozptylový faktor RF2 definuje opakující se počet prohlídek od první prohlídky. Rozptylové faktory, můžeme určit pomocí ovlivňujících faktorů [8] z tabulky

| Faktory ovlivňující hodnotu rozptylových faktorů |                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Faktor                                           | Hodnota / Popis                                                                                                                             |
| K1, K2                                           | 2 / Základní hodnota                                                                                                                        |
| K3                                               | 1 / Pro prostředí s nízkou úrovní vlhkosti<br>1,5 / Pro prostředí se střední úrovní vlhkosti<br>2 / pro prostředí s vysokou úrovní vlhkosti |
| K4                                               | Speciální ovlivňující faktor, použitý pro speciální použití<br>(použití schvaluje úřad)                                                     |

Tab. 3 a rovnic 7 a 8.

| Faktory ovlivňující hodnotu rozptylových faktorů |                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Faktor                                           | Hodnota / Popis                                                                                                                             |
| K1, K2                                           | 2 / Základní hodnota                                                                                                                        |
| K3                                               | 1 / Pro prostředí s nízkou úrovní vlhkosti<br>1,5 / Pro prostředí se střední úrovní vlhkosti<br>2 / pro prostředí s vysokou úrovní vlhkosti |
| K4                                               | Speciální ovlivňující faktor, použitý pro speciální použití<br>(použití schvaluje úřad)                                                     |

Tab. 3 Faktory ovlivňující hodnotu rozptylový faktor [8]

$$RF_1 = K_1 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (7)$$

$$RF_2 = K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (8)$$

Pro potřeby dizertační práce bude faktor K<sub>3</sub> volen pro prostředí s nízkou úrovní vlhkosti K<sub>3</sub>=1. Faktor K<sub>4</sub> bude volen pro popis přenosu zatížení K<sub>4</sub>=1 pro mnohačetný přenos zatížení (Multiple Load Path – MLP) a K<sub>4</sub>=1,5 pro jednoduchý přenos zatížení (Single Load Path – SLP). Dosazením do rovnic získáme rozptylové faktory:

$$RF_1 = K_1 \cdot K_3 \cdot K_4 = 2 \cdot 1 \cdot 1 = 2 \text{ (MLP)}$$

$$RF_2 = K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 2 \cdot 1 \cdot 1 = 2 \text{ (MLP)}$$

$$RF_1 = K_1 \cdot K_3 \cdot K_4 = 2 \cdot 1 \cdot 1,5 = 3 \text{ (SLP)}$$

$$RF_2 = K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 2 \cdot 1 \cdot 1,5 = 3 (SLP)$$

Počáteční inspekci také známou jako počáteční práh inspekčních prohlídek, určíme jako podíl celkové životnosti (stanovenou analýzou šíření trhliny) a faktoru rozptylu  $RF_1$ .

$$T_P = \frac{T_{Crit}}{RF_1} \quad (9)$$

**Pozn.: Počáteční inspekce musí být provedena nejpozději v polovině navrhované životnosti.** To znamená, že v případě, že uvažujeme životnost letounu 30000 h musí být počáteční prohlídka provedena nejpozději po 15 000 letových hodinách.

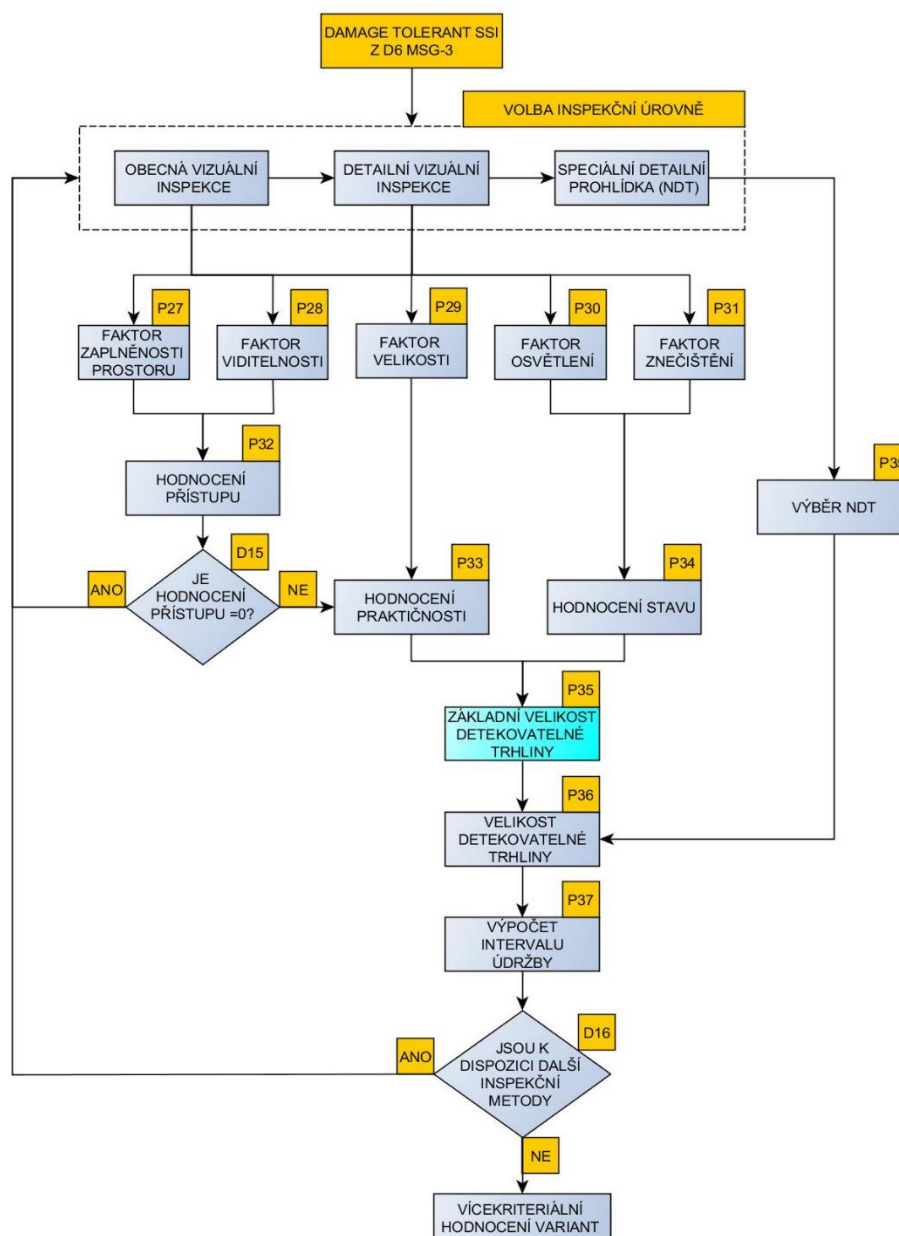
Interval prohlídek je následně vypočten z rozdílu času dosažení kritické a detekovatelné trhliny dělené rozptylovým faktorem  $RF_2$ .

$$T_I = \frac{T_{Crit} - T_{Det}}{RF_2} \quad (10)$$

**Pozn.: Na základě těchto dat, je možné vypočítat intervaly prohlídek pro jednotlivé SSI prvky konstrukce a navrhnout úkoly údržby. Je nutné si uvědomit, že pro každý konstrukční prvek na letounu pravděpodobně vyjde jiný potřebný interval údržby. Proto se dané intervaly mohou v konečném plánu údržby lišit od vypočtených hodnot.**

#### 4.2.4 Vytvoření stromu logického rozhodování a jeho začlenění do MSG-3

Postup pro určení intervalů údržby vycházející z analýz únavy a životnosti byly zařazeny do **MSG-3** analýz únavového poškození (**FD**). Zjednodušený postup určení intervalů údržby a velikosti detekovatelného poškození je zobrazen na vývojovém diagramu Obr. 4-7 a popsán řadou procesních kroků (P1, P2, P3 atd.) a rozhodovacích kroků (D1, D2, D3 atd.) podobně jako postupy **MSG-3** takto:



Obr. 4-7 Postup pro určení intervalů údržby

### 4.3 VÍCEKRITERIÁLNÍ HODNOCENÍ VARIANT

Obecně se uvádí, že použití sofistikovanějších **NDT** metod zvyšuje náklady a je proto vhodné navrhovat údržbu od jednoduchých (**GVI**) vizuálních prohlídek, až po speciální detailní prohlídky (**SDI**) [3]. Některé zdroje dokonce uvádí, že sofistikovanější metody inspekce by měly být uvažovány jen v případech, kdy nelze použít obecné vizuální metody (**GVI**) [17]. Avšak je nutné si uvědomit, že efektivnost inspekční prohlídky nezávisí jen na nákladech na provedení prohlídky nebo její technickou proveditelnost, ale na mnoha dalších kritériích jako je například doba prohlídky, nároky na obsluhu nebo interval mezi prohlídkami. To znamená, že v některých případech, kdy je možné využít vizuální inspekci, nemusí být její použití nejvýhodnější. **Bohužel MSG-3 neřeší jaký druh inspekce, je pro danou konstrukci volen a zda se opravdu jedná o nejvhodnější metodu inspekce pro daný případ. Zároveň momentálně neexistuje žádná metodika, která by strukturovaně a logicky řešila postupy pro stanovení nejvhodnějších metod údržby.** Jedním z hlavních cílů práce je tedy navrhnout metody pro volbu vhodných inspekčních metod draku letounu s uvážením různých priorit a kritérií provozu letounu a různých požadavků, které ovlivňují.

Pro výběr vhodných metod inspekce na základě různých kritérií existuje řada různých přístupů např. použití fuzzy systémů nebo vícekritériální rozhodování atp. Po zvážení byly pro účely dizertační práce

vybrány metody Vícekriteriálního Hodnocení Variant (**VHV**), především z toho důvodu, že tyto metody jsou přímo určené k výběru různých variant na základě většího množství kritérií.

Vícekriteriální rozhodování je proces hodnocení několika variant řešení podle různých kritérií [3,4]. Cílem je nalézt jednu nejlépe hodnocenou variantu řešení, seřadit varianty dle vhodnosti, nebo vyloučit neefektivní varianty.

Rozdělujeme dva základní modely vícekriteriálního rozhodování:

- **Vícekriteriální optimalizační model** – Množina přípustných řešení je nekonečná (implicitní vyjádření).
- **Vícekriteriální hodnocení variant** – Množina přípustných řešení je konečná (explicitní vyjádření)

Vzhledem k povaze úlohy, bude v práci dále uvažován model vícekriteriálního hodnocení variant.

V úlohách vícekriteriálního hodnocení variant je dána konečná množina  $m$  variant, které jsou hodnoceny podle  $n$  kritérií. Cílem je učinit rozhodnutí, která varianta je podle daných kritérií hodnocená nejlépe.

Mezi komponenty vícekriteriálního hodnocení variant patří varianty, kritéria, kritériální matice a váhy kritérií.

Varianty – konkrétní rozhodovací možnosti, které jsou realizovatelné. Varianty budou v textu značeny  $A_i$  (*pro*  $i=1, 2, \dots, m$ ). V tomto případě jsou varianty metody inspekce.

Kritéria – hlediska, podle kterých jsou varianty posuzovány. Kritéria budou značeny  $K_j$  (*pro*  $j=1, 2, \dots, n$ ). Kritéria mohou být čas prohlídky, detekční schopnosti jednotlivých variant, cena prohlídky atd.

### Typy kritérií

Kritéria kvantifikovatelnosti:

- Kvantitativní kritérium – objektivně měřitelný údaj (velikost trhliny, čas do prohlídky)
- Kvalitativní kritérium – subjektivní údaj, který nelze měřit. Je nutné užít k převedení subjektivního údaje bodovací stupnice nebo relativní hodnocení variant (nároky na zkušenost obsluhy)

Kritérium dle povahy:

- Maximalizační kritérium – platí, že vyšší hodnota znamená vyšší hodnocení kritéria.
- Minimalizační kritérium – platí, že nižší hodnota znamená vyšší hodnocení.

Preference kritérií – vyjadřuje důležitost daného kritéria v porovnání s ostatními kritérii:

- Bez preference kritérií
- Hodnocení dle aspiračních úrovní
- Ordinální preference (známé pořadí kritérií, ale ne jejich rozestup)
- Kardinální preference (známé pořadí i rozestupy kritérií)

Kritériální matice – Je-li hodnocení všech variant kvantifikováno údaje se uspořádají do tzv. **kritériální matice**  $Y=(y_{ij})$ . Prvky této matice vyjadřují hodnocení  $i$ -té varianty podle  $j$ -tého kritéria. Řádky odpovídají variantám, sloupce kritériím (Tab. 4).

| $Y=(y_{ij})$ | $K_1$    | $K_2$    | ... | $K_n$    |
|--------------|----------|----------|-----|----------|
| $A_1$        | $y_{11}$ | $y_{12}$ | ... | $y_{1n}$ |
| $A_2$        | $y_{21}$ | $y_{22}$ | ... | $y_{2n}$ |
| ...          | ...      | ...      | ... | ...      |
| $A_m$        | $y_{m1}$ | $y_{m2}$ | ... | $y_{mn}$ |

Tab. 4 Kriteriační matice

### 4.3.1 Metody stanovení vah kritérií

Většina metod vícekritériálního hodnocení vyžaduje odlišení jednotlivých kritérií z hlediska jejich významnosti. Významnost kritérií můžeme vyjádřit číselně pomocí tzv. vah kritérií.

Váha kritéria  $K_j$  bude značena  $v_j, j=1,2, \dots, n$ , kde  $n$  je počet všech uvažovaných kritérií. Pro možnost srovnání váhy kritérií jsou stanovené různými metodami, popř. různými experty, vyjadřujeme je v normovaných hodnotách  $w_j$ , které jsou vypočítány dle vztahu:

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_{k=1}^n v_k}, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Normované váhy jsou nezáporná čísla, jejichž součet se rovná jedné.

Metody stanovení vah kritérií jsou děleny podle informace, která je nutná ke stanovení vah:

- Nelze určit preference
- Používá se v situaci, kdy není možné rozlišit důležitost jednotlivých kritérií. Všem kritériím je přiřazena stejná váha. To znamená, máme-li 10 kritérií. Každému je přiřazena váha 0,1 ( $w_j = \frac{1}{n}$ ).
- Jsou k dispozici ordinální informace o kritériích  
Je možno určit pořadí jednotlivých kritérií, ale nelze určit rozestupy v pořadí preferencí mezi jednotlivými kritérii.
- Jsou k dispozici kardinální informace o kritériích  
Je možno určit jak pořadí, ale i rozestupy v pořadí preferencí mezi jednotlivými kritérii.

Mezi často používané metody určení pořadí patří:

- **Metoda pořadí**  
Kritéria jsou seřazena od nejvýznamnějšího po nejméně významné  $K_1, K_2, \dots, K_n$ . K takto uspořádaným kritériím se přiřadí váhy  $n, n-1, \dots, 2, 1$ . Pro normovanou váhu kritéria  $K_j$ s vahou  $v_j$  poté platí vztah:

$$w_j = \frac{v_j}{1+2+\dots+n} = \frac{v_j}{\frac{n(n+1)}{2}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

- **Fullerova metoda**  
Při vyšším počtu kritérií je vhodné srovnávat vždy pouze dvě kritéria, u kterých je snazší rozhodnout, které je důležitější. V takových případech lze využít srovnání pomocí tzv. Fullerova trojúhelníku. Za předpokladu, že jednotlivá kritéria jsou pevně očíslována pořadovými čísly  $1, 2, \dots, n$ . Fullerův trojúhelník je tvořen dvojřádky, přičemž každá dvojice kritérií vyskytuje jednou (Obr. 4-8). U každé dvojice se označí číslo toho kritéria, které je považováno za důležitější. Takže pro kritérium  $K_j$  představuje počet označených čísel  $j$  počet jeho preferencí, který označíme  $f_j$ . Protože při počtu

kritérií  $n$  je počet párových srovnání kombinačnímu číslu  $\binom{n}{2}$ , tak pro normovanou váhu kritéria  $K_j$  platí vztah.

$$w_j = \frac{f_j}{\frac{n(n-1)}{2}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

|       |   |     |     |     |
|-------|---|-----|-----|-----|
| 1     | 1 | 1   | ... | 1   |
| 2     | 3 | 4   | ... | n   |
| <hr/> |   |     |     |     |
|       | 2 | 2   | ... | 2   |
|       | 3 | 4   | ... | n   |
| <hr/> |   |     |     |     |
|       |   | ... | ... | n   |
| <hr/> |   |     |     |     |
|       |   |     | n-2 | n-2 |
|       |   |     | n-1 | n   |
| <hr/> |   |     |     |     |
|       |   |     |     | n-1 |
|       |   |     |     | n   |

Obr. 4-8 Schéma Fullera trojúhelníku

#### - Bodovací metoda

Při bodovací metodě se důležitost kritérií hodnotí počtem bodů (čím je kritérium důležitější tím více bodů mu je přiděleno). Bodovací stupnice může mít větší či menší rozsah např. 1 až 5 nebo 1 až 100 apod. Přidělený počet bodů lze převést na normovanou váhu podle vzorce (1). Zvláštním případem bodovací metody je alokace 100 bodů (Metfesselova alokace), které se mezi jednotlivá kritéria v souladu s jejich důležitostmi rozdělují.

### 4.3.2 Metody stanovení pořadí variant

Cílem metod vícekritériálního hodnocení variant je stanovení pořadí výhodnosti jednotlivých variant z hlediska zvolených kritérií. Obvykle se hledá nejlépe hodnocená kompromisní varianta, která není dominována jinou variantou. Rozlišujeme následující druhy variant ve vztahu s ostatními variantami:

- Dominovaná varianta - V případě, že máme všechny kritéria maximalizační tak varianta  $A_i$  dominuje variantu  $A_j$  v případě že existuje alespoň jedno kritérium  $K_i$ , kde  $y_{ii} > y_{ji}$  a zároveň pro ostatní kritéria platí  $(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}) \geq (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jn})$ .
- Kompromisní varianta – nedominovaná varianta doporučená k řešení.
- Ideální varianta – Hypotetická či reálná varianta, jejíž ohodnocení je nejlepší podle všech kritérií. Varianta dominuje všechny ostatní varianty.
- Bazální varianta- Hypotetická či reálná varianta, jejíž ohodnocení je nejhorší podle všech kritérií.

Jednotlivé metody se pak liší definicí kompromisní varianty, náročností a použitelností pro různé druhy úloh. V dnešní době existuje mnoho různých metod, které lze použít. Existují 3 základní typy metod stanovení pořadí variant:

- **Metody vyžadující aspirační úroveň kritérií** – Je známa hodnota kritérií, které má být dosaženo (například je požadován interval mezi prohlídkami daného prvku je alespoň 3000 h)
  - Konjunktivní metoda
  - Disjunktivní metoda

- **Metody vyžadující ordinální informace o variantách** – Je vyžadována informace o pořadí variant dle každého kritéria
  - Metoda pořadí
  - Lexikografická metoda
  - ORESTE
- **Metody vyžadující kardinální informaci o variantách** – Je vyžadována kardinální (rozestup) informace o každé variantě dle každého kritéria
  - Metoda bodovací
  - TOPSIS
  - Bazické varianty

**Pozn.: Ve zkrácených tezích je rozvedena pouze metoda TOPSIS, která bude uvedena i v kapitole 5 při řešení údržby na případové studii.**

#### - Metoda TOPSIS (Kardinální informace)

Metoda TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) je založena na výběru varianty, která je nejbližší k ideální variantě a nejdále od bazální varianty. Předpokládá se maximalizační charakter všech kritérií. Jedná se o komplexnější metodu, proto je zde uveden stručný postup výpočtu [17,18], který bude dále rozveden na případové studii v kapitole 5 :

- 1.) Vytvoří se normalizovaná kritériální matice  $R=(r_{ij})$  dle vztahu:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

- 2.) Matice  $R$  je převedena na normalizovanou kritériální matici  $Z$ , tak, že každý sloupec matice  $R$  je vynásoben vahou odpovídajícího kritéria dle vztahu:

$$z_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (26)$$

- 3.) Pomocí matice  $Z$  je vytvořena ideální varianta  $(h_1, h_2, \dots, h_n)$  a bazální varianta  $(d_1, d_2, \dots, d_n)$ , kde:

$$h_j = \max_i z_{ij}; j = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

$$d_j = \min_i z_{ij}; j = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

- 4.) Vypočítá se vzdálenost od ideální varianty a vzdálenost od bazální varianty dle vztahu:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_j)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

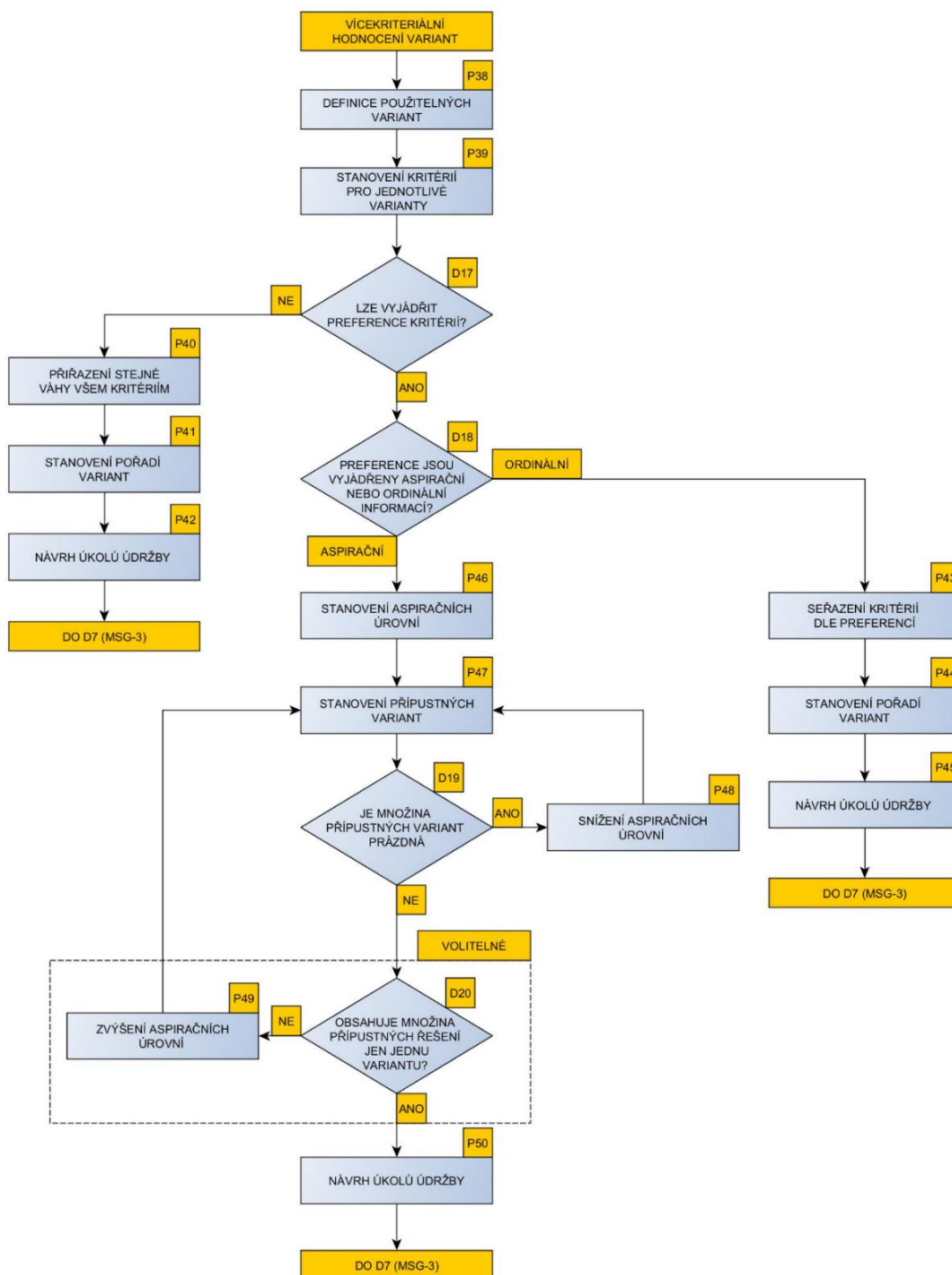
$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - d_j)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (30)$$

- 5.) Určí se relativní ukazatel od bazální varianty dle vztahu:

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}; i = 1, 2, \dots, m \quad (31)$$

### 4.3.3 Vytvoření stromu logického rozhodování a jeho začlenění do MSG-3

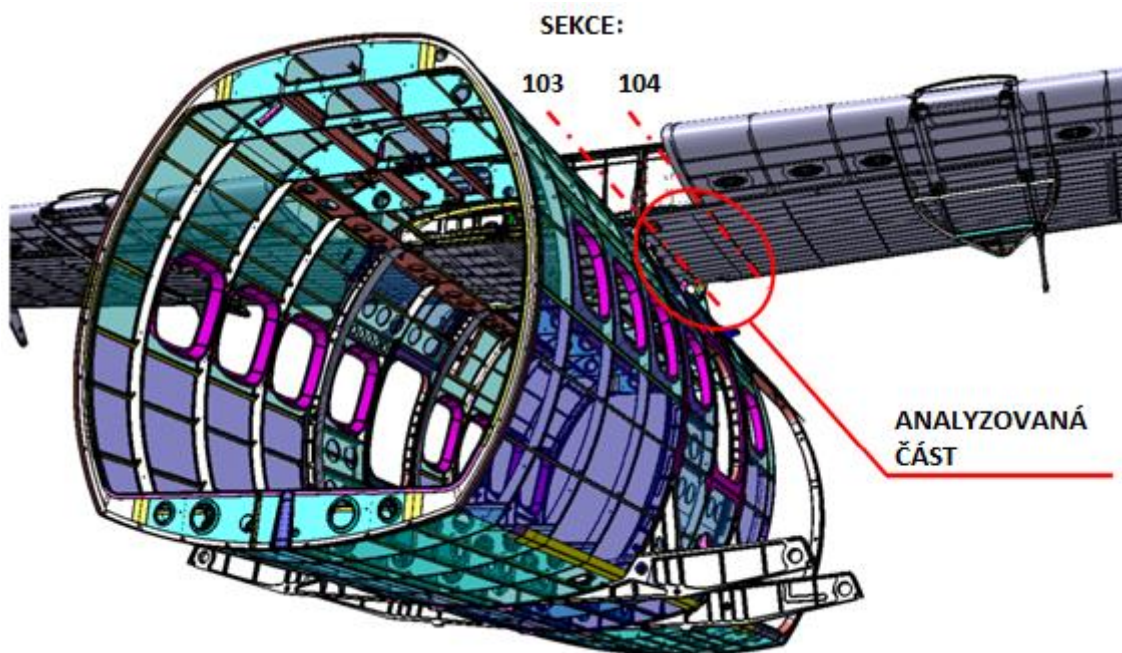
Postupy vícekritériálního hodnocení variant pro výběr metody údržby byly zařazeny do **MSG-3** analýz únavového poškození (**FD**) navazujíc na postupy určení intervalů údržby. Postup vícekritériálního hodnocení variant pro výběr metody údržby je zobrazen na vývojovém diagramu (Obr. 4-9), a je popsán řadou Procesních kroků (P1, P2, P3 atd.) a rozhodovacích kroků (D1, D2, D3 atd.) podobně jako postupy **MSG-3** takto:



Obr. 4-9 Vícekritériální hodnocení variant údržby

## 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Pro potřeby dizertační práce byla použita analýza šíření trhliny spodního panelu křídla letounu L-410 NG, které byly publikovány v diplomové práci Ing. Dalibora Vlčka [9]. V diplomové práci byla řešena životnost integrálního panelu spodní části křídla mezi sekcí **103** a **104**. Tato část křídla obsahuje závěsy křídlo-trup v sekci 103. Další spoje, klouby a výřezy daná část křídla neobsahuje, ale je uvažováno, že jsou v dané části umístěny palivové nádrže. Ilustrace daného místa jsou uvedeny na následujících obrázcích. Plánovaná životnost letounu je stanovena na 30000 h.



Obr. 5-1 Detail analyzovaného místa [9]

Byly uvažovány materiály:

- Hliníková slitina 2124-T851 – Pásnice
- Hliníková slitina 7475-T7351 – Integrální panel

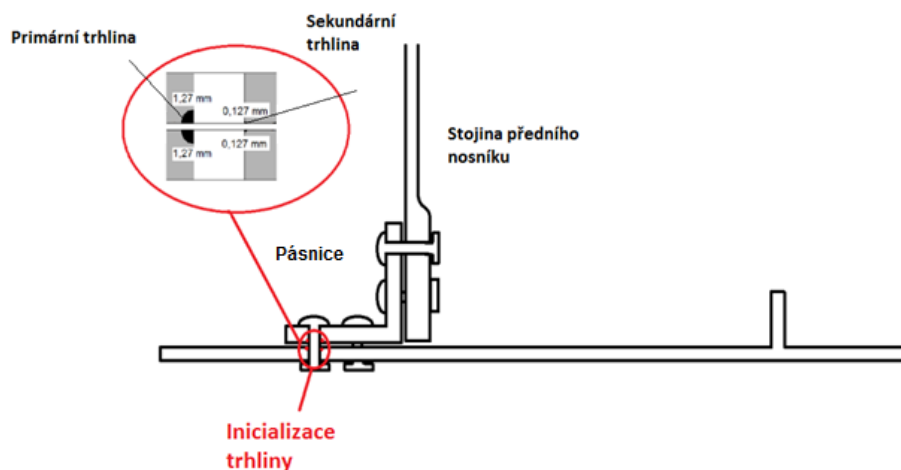
V práci byly uvažovány následující metody inspekce:

- Obecná vizuální prohlídka (**GVI**)
- Detailní vizuální prohlídka (**DET**)
- Kapilární metody (**SDI**)
- Vířivé proudy (**SDI**)

## 5.1 NÁVRH ÚDRŽBOVÉHO PLÁNU NA KONKRÉTNÍ ČÁSTI KONSTRUKCE (SPODNÍ PÁSNICE KŘÍDLA)

Trhlina se šíří od vývrtu otvoru pro nýt, který je blíže okraji přilehlé pásnice. Uvažuje se šíření trhliny, jak v potahu integrálního panelu, tak v přilehlé pásnici viz Obr. 5-2. Tento případ byl vybrán z důvodu nejnižší vypočítané životnosti daného spoje.

**Pozn.:** Únosnost nýtových spojů není v práci uvažována.



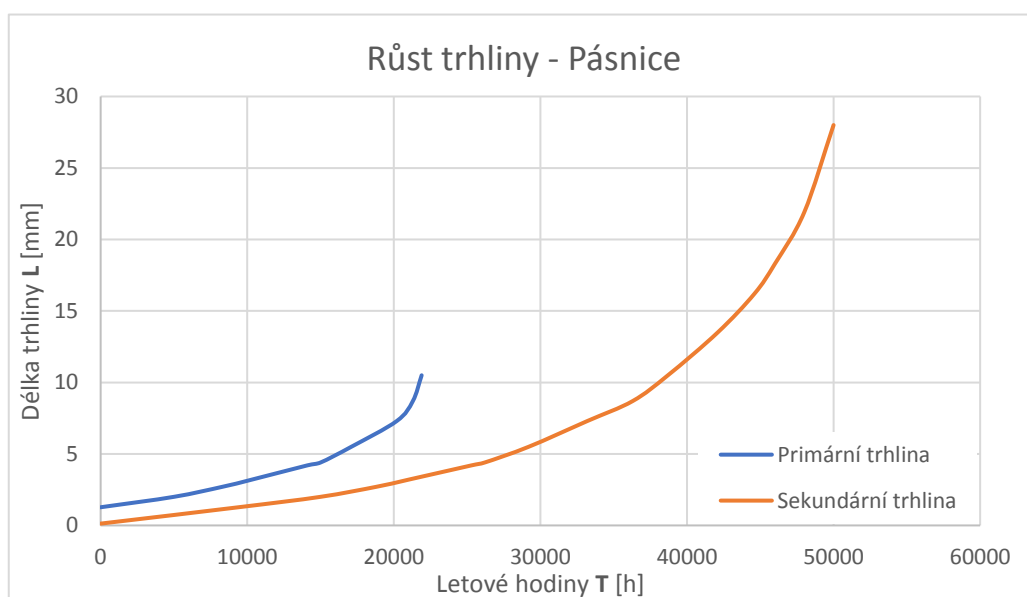
Obr. 5-2 Místo vzniku trhliny Případ 1 [9]

Analýzou životnosti, která byla provedena v lit. [9] byla zjištěna životnost jednotlivých komponent konstrukce.

Pásnice – 50000 letových hodin (Nestabilní šíření trhliny  $L_{crit}=28$  mm u sekundární trhliny. Celková trhlina včetně primární 39,5 mm).

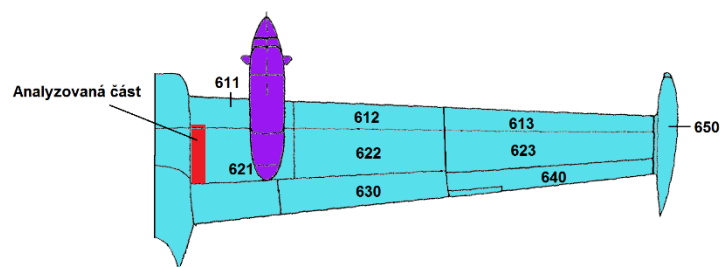
**Pozn. Detekovatelné velikosti trhliny jsou v této práci počítány jen ze sekundární trhliny.**

Na Obr. 5-3 a je zobrazena křivka šíření trhliny v pásnici křídla.



Obr. 5-3 Šíření trhliny v pásnici

Definují konstrukční prvky na letounu, rozřídí se do zón (Obr. 5-4) a určí se, zda se jedná o významné konstrukční prvky **SSI**.



Obr. 5-4 Detailní zónování letounu L-410

Analyzovaná část náleží zóně **511** resp. **611** dle Ipec 2200 [22]. Číslování a základní rozdělení analyzovaných dílů je uvedeno v Tab. 5 dle Gama Specification No.2 [21].

| Číslování analyzovaných částí na základě GAMA 2 a iSpec 2200 |      |                  |                     |                    |                                |
|--------------------------------------------------------------|------|------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
| Konstrukční prvek                                            | Zóna | Kapitola systému | Kapitola podsystému | Označení části     | Významnost konstrukčních prvků |
| Spodní pásnice (L)                                           | 511  | 57 (Wings)       | 10 (Main Frame)     | 57-10-L-Main_Spare | PSE ( <b>SSI</b> )             |
| Spodní pásnice (P)                                           | 611  | 57 (Wings)       | 10 (Main Frame)     | 57-10-P-Main_Spare | PSE ( <b>SSI</b> )             |

Tab. 5 Číslování analyzovaných částí konstrukce

### 5.1.1 Stanovení základních parametrů inspekce

Na základě informací uvedených v kapitole 4.1, 4.2 a 4.3, byly určeny základní parametry inspekce pro jednotlivé inspekční metody Tab. 6.

| Kritéria a varianty inspekce spodní pásnice (PŘÍPAD 1) |              |                               |                      |                          |                    |
|--------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|
| Varianty                                               | Kritéria     |                               |                      |                          |                    |
|                                                        | Náklady [Kč] | Interval mezi prohlídkami [h] | Doba prohlídky [min] | Komplexnost inspekce [-] | Vliv velikosti [-] |
| <b>GVI</b>                                             | 109          | 733                           | 35                   | 1                        | 2                  |
| <b>DET</b>                                             | 144          | 2400                          | 40                   | 2                        | 1                  |
| Vířivé proudy                                          | 231          | 10667                         | 45                   | 4                        | 1                  |
| Kapilární metody                                       | 292          | 3900                          | 100                  | 3                        | 2                  |

Tab. 6 Definice základního hodnocení variant pro inspekci pásnice

Jednotlivé úkoly údržby se slučují do větších údržbových celků, které jsou obvykle označovány jako bloky nebo úrovně údržby. Tab. 7 uvádí současné úrovně údržby na letounu L-410 UVP-E20 a autorův návrh pro letoun L-410NG.

| Úrovně údržby a intervaly údržby letounu L-410 |                                     |                                |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Úroveň údržby                                  | Interval údržby [h]<br>L410 UVP-E20 | Interval údržby [h]<br>L-410NG |
| Check 1 (S)                                    | 10±1 Dnů                            | 10±1 Dnů                       |
| Check 2 (A)                                    | 300±30 Letových hodin               | 400±30 Letových hodin          |
| Check 3 (C)                                    | 1200±30 Letových hodin              | 1600±30 Letových hodin         |
| Check 4 (D)                                    | 2400±30 Letových hodin              | 3200±30 Letových hodin         |

Tab. 7 Úrovně a intervaly údržby letounu L-410 UVP-E20 [20] a L-410NG (Odhad autora)

### 5.1.2 Určení efektivní metody údržby pomocí metody TOPSIS

Metoda TOPSIS je založena na výběru varianty, která je nejbližší k ideální variantě a nejdále od bazální varianty. Pomocí metody pořadí byly určeny váhy kritérií Tab. 8. Hodnoty jsou vypočítány vždy pro hodnotu prvního řádku, prvního sloupce  $N_{Max11}$  (**GVI a Cenu**), ostatní buňky matice byly vypočítány v MS Excel 2016.

| Váhy kritérií (Metoda pořadí) - spodní pásnice (PŘÍPAD 1) |          |                           |                |                      |                |
|-----------------------------------------------------------|----------|---------------------------|----------------|----------------------|----------------|
|                                                           | Kritéria |                           |                |                      |                |
|                                                           | Náklady  | Interval mezi prohlídkami | Doba prohlídky | Komplexnost inspekce | Vliv velikosti |
| Váhy                                                      | 0,333    | 0,267                     | 0,133          | 0,067                | 0,2            |

Tab. 8 Váhy kritérií (metoda pořadí)

Metoda TOPSIS pracuje jen s maximalizačním zadáním hodnot.

$$N_{Max} = \begin{pmatrix} 183 & 733 & 65 & 3 & 0 \\ 148 & 2400 & 60 & 2 & 1 \\ 61 & 10667 & 55 & 0 & 1 \\ 0 & 3900 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Vytvoří se normalizovaná kritériální matice  $R=(r_{ij})$  dle vztahu (25):

$$r_{11} = \frac{183}{\sqrt{183^2 + 148^2 + 61^2 + 0^2}} = 0,753$$

| Normalizovaná kritériální matice R (PŘÍPAD 1) |          |                           |                |                      |                |
|-----------------------------------------------|----------|---------------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Varianty                                      | Kritéria |                           |                |                      |                |
|                                               | Náklady  | Interval mezi prohlídkami | Doba prohlídky | Komplexnost inspekce | Vliv velikosti |
| <b>GVI</b>                                    | 0,753    | 0,063                     | 0,624          | 0,802                | 0,000          |
| <b>DET</b>                                    | 0,609    | 0,206                     | 0,576          | 0,535                | 0,707          |
| Vířivé proudy                                 | 0,251    | 0,917                     | 0,528          | 0,000                | 0,707          |
| Kapilární metody                              | 0,000    | 0,335                     | 0,000          | 0,267                | 0,000          |

Tab. 9 Normalizovaná kritériální matice R

Matice **R** je převedena na normalizovanou kritériální matici **Z** tak, že každý sloupec matice **R** je vynásoben váhou odpovídajícího kritéria dle vztahu (26):

$$z_{11} = 0,333 \cdot 0,753 = 0,251$$

Pomocí matice **Z** je vytvořena ideální varianta ( $h_1, h_2, \dots, h_n$ ) a bazální varianta ( $d_1, d_2, \dots, d_n$ ), kde:

$$h_j = \max_i z_{ij} ; j = 1, 2, \dots, n$$

$$d_j = \min_i z_{ij} ; j = 1, 2, \dots, n$$

| Normalizovaná kritériální matice Z (PŘÍPAD 1) |          |                           |                |                      |                |
|-----------------------------------------------|----------|---------------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Varianty                                      | Kritéria |                           |                |                      |                |
|                                               | Náklady  | Interval mezi prohlídkami | Doba prohlídky | Komplexnost inspekce | Vliv velikosti |
| <b>GVI</b>                                    | 0,251    | 0,017                     | 0,083          | 0,054                | 0              |
| <b>DET</b>                                    | 0,203    | 0,055                     | 0,077          | 0,036                | 0,141          |
| Vířivé proudy                                 | 0,084    | 0,245                     | 0,070          | 0                    | 0,141          |
| Kapilární metody                              | 0        | 0,090                     | 0              | 0,018                | 0              |
| $h_j$                                         | 0,251    | 0,245                     | 0,083          | 0,054                | 0,141          |
| $d_j$                                         | 0        | 0,017                     | 0              | 0                    | 0              |

Tab. 10 Normalizovaná kritériální matice Z

Vzdálenost od ideální varianty je vypočítána dle vztahu (29):

$$d_1^+ = \sqrt{(0,251 - 0,251)^2 + (0,017 - 0,245)^2 + (0,083 - 0,083)^2 + (0,054 - 0,054)^2 + (0 - 0,141)^2} =$$

$$d_1^+ = 0,268$$

Vzdálenost od bazální varianty je vypočítána dle vztahu (30):

$$d_1^- = \sqrt{(0,251 - 0)^2 + (0,017 - 0,017)^2 + (0,083 - 0)^2 + (0,054 - 0)^2 + (0 - 0)^2} =$$

$$d_1^- = 0,269$$

Relativní ukazatel od bazální varianty vypočítáme pomocí vztahu (31):

$$c_1 = \frac{d_1^-}{d_1^+ + d_1^-} = \frac{0,269}{0,268 + 0,269} = 0,501$$

| Hodnocení variant – metoda TOPSIS (PŘÍPAD 1) |                                      |                                      |                                              |                |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|
| Varianty                                     | Hodnocení variant                    |                                      |                                              |                |
|                                              | Vzdálenost od ideální varianty $d^+$ | Vzdálenost od bazální varianty $d^-$ | Relativní ukazatel vzdálenosti variant $c_i$ | Pořadí variant |
| <b>GVI</b>                                   | 0,268                                | 0,269                                | 0,501                                        | 3              |
| <b>DET</b>                                   | 0,197                                | 0,264                                | 0,573                                        | 2              |
| Vířivé proudy                                | 0,176                                | 0,290                                | 0,622                                        | 1              |
| Kapilární metody                             | 0,339                                | 0,075                                | 0,181                                        | 4              |

Tab. 11 Hodnocení variant – metoda TOPSIS

### 5.1.3 Stanovení úkolů údržby

Na základě výsledků vícekritériálního hodnocení byla zvolena inspekce pásnice pomocí vířivých proudů. Dále je nutné navrhnout intervaly údržby pro vířivé proudy. Vzhledem k tomu, že interval mezi prohlídkami může být až 10667 hodin, je možné navrhnout údržbový plán tak, že vířivé proudy nebudou použity při každé generální prohlídce letounu (**úroveň D**). V Tab. 12 jsou uvedeny 3 možné varianty inspekce pomocí vířivých proudů.

| Návrh inspekce na základě MSG-3 analýzy pro FD |                                        |                                                   |             |                  |   |
|------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------|------------------|---|
| Varianta prohlídky                             | Úkol                                   | MSI Sestava/Prvek                                 |             |                  |   |
|                                                |                                        | Případ 1 (Spodní pásnice-Spodní integrální panel) |             |                  |   |
|                                                |                                        | Pásnice                                           |             | Integrální panel |   |
|                                                |                                        | Značení                                           | Interval    |                  |   |
| V1                                             | Inspekce pomocí vířivých proudů        | 1C                                                | 3200        | -                | - |
| V2                                             | <b>Inspekce pomocí vířivých proudů</b> | <b>2C</b>                                         | <b>6400</b> | -                | - |
| V3                                             | Inspekce pomocí vířivých proudů        | 3C                                                | 9600        | -                | - |

Tab. 12 Návrh inspekce dle **FD** analýzy

Bylo rozhodnuto, že **prohlídka pomocí vířivých proudů bude provedena každý druhý cyklus úrovně údržby D**. Počáteční práh prohlídek spodní pásnice křídla byl předběžně stanoven na hodnotu 15000 hodin, avšak v takovém případě by byla nutná jedna speciální prohlídka. Proto byl počáteční práh prohlídek posunut na **12800 letových hodin**. Tato hodnota koresponduje s navrhovanou údržbou **úrovně D**.

## 5.2 VYHODNOCENÍ ÚDRŽBOVÉHO PLÁNU PÁSNICE

Porovnání výsledků případové studie s obecnými vizuálními **GVI** a detailními **DET** inspekčními metodami je uvedeno i vzhledem k obecně doporučovanému způsobu údržby, kdy se pro konstrukce doporučuje používat vždy vizuální metody a **NDT** metody použít jen v případech, kdy není vizuální metody možné použít [17].

Porovnání je provedeno pro spodní pásnici křídla. V Tab. 13, Tab. 14 a Tab. 15 jsou **počítány rozdíly vzhledem k hodnotám kritérií vířivých proudů**.

| Porovnání základních kritérií vířivých proudů s vizuálními metodami |                                       |      |                |       |                |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------|----------------|-------|----------------|
| Parametr                                                            | Vířivé proudy<br>(referenční hodnota) | GVI  | Rozdíl [%]     | DET   | Rozdíl [%]     |
| Cena [Kč]                                                           | <b>231</b>                            | 109  | <b>+111,93</b> | 144   | <b>+60,41</b>  |
| Interval mezi prohlídkami [h]                                       | <b>6400</b>                           | 600* | <b>+966,66</b> | 2400* | <b>+166,67</b> |
| Doba prohlídky [min]                                                | <b>45</b>                             | 35   | <b>+28,57</b>  | 40    | <b>+12,50</b>  |

\*Jsou použity původní intervaly údržby letounu L-410 UVP-E20 viz Tab. 7

Tab. 13 Porovnání základních kritérií vybraných inspekčních metod\*Jsou použity původní intervaly údržby letounu L-410 UVP-E20 viz Tab. 7

Tab. 13 porovnává základní parametry jednotlivých inspekčních metod z hlediska jedné prohlídky. V tabulce Tab. 14 a Tab. 15 jsou uvedena kumulovaná data pro celou životnost letounu 30000 h resp. 50000 h.

| Porovnání základních kritérií vířivých proudů s vizuálními metodami (30000 h) |                                       |      |            |       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------|------------|-------|------------|
| Parametr                                                                      | Vířivé proudy<br>(referenční hodnota) | GVI  | Rozdíl [%] | DET   | Rozdíl [%] |
| Počet inspekcí (cca 30000 letových hodin)*                                    | 3                                     | 25   | -88,00     | 7     | -57,14     |
| Interval mezi prohlídkami [h]                                                 | 6400                                  | 600* | +966,66    | 2400* | +166,67    |
| Celková cena [Kč]                                                             | 693                                   | 2725 | -74,57     | 1008  | -31,25     |
| Celková doba prohlídek [min]                                                  | 135                                   | 875  | -84,57     | 280   | -51,79     |

\*Uvažuje se první prohlídka po dosažení 30000 h a počátek inspekci po 12800 h (ED), 14400 h (DET) a 15000 h (GVI)

Tab. 14 Porovnání základních kritérií vizuálních metod a vířivých metod po 30000 h

| Porovnání základních kritérií vířivých proudů s vizuálními metodami (50000 h) |                                       |      |            |       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------|------------|-------|------------|
| Parametr                                                                      | Vířivé proudy<br>(referenční hodnota) | GVI  | Rozdíl [%] | DET   | Rozdíl [%] |
| Počet inspekci (cca 50000 letových hodin)*                                    | 6                                     | 59   | -89,80     | 15    | -60,00     |
| Interval mezi prohlídkami [h]                                                 | 6400                                  | 600* | +966,66    | 2400* | +166,67    |
| Celková cena [Kč]                                                             | 1386                                  | 6431 | -78,45     | 2160  | -35,83     |
| Celková doba prohlídek [min]                                                  | 270                                   | 2065 | -86,92     | 600   | -55,00     |

\*Uvažuje se první prohlídka po dosažení 50000 h a počátek inspekci po 12800 h (ED), 14400 h (DET) a 15000 h (GVI)

Tab. 15 Porovnání základních kritérií vizuálních metod a vířivých metod po 50000 h

Z výsledků je patrné, že ačkoliv jsou vířivé proudy nejnákladnější z ekonomického hlediska i časové náročnosti potřebného na provedení inspekce, tak díky delším intervalům mezi prohlídkami jsou z hlediska celé životnosti letounu **nejlevnější a vyžadují nejméně času pro údržbu**. Další výhodou je, že oproti vizuálním metodám je možné prodloužit interval údržby **úrovně D** z původních **2400 hodin** na **3200 hodin**. V dnešní době se průměrná doba údržby **úrovně D** pohybuje mezi 25-45 dny. To znamená, že tato změna v intervalech údržby značně redukuje čas, kdy letoun nelétá a negeneruje provozovateli zisk.

Samotná prohlídka pásnice je prováděna každou druhou prohlídku **úrovně D**, tedy jednou za **6400 hod**. Tato hodnota je oproti výpočtům **10667 hod resp. 9600 hod** (po zařazení do každé třetí prohlídky **úrovně D**) mírně konzervativní. Prohlídka je volena konzervativně z důvodu, že se jedná o první DAMAGE TOLERANCE konstrukci výrobce letounu a zatím neexistují zkušenosti s chováním konstrukcí DAMAGE TOLERANCE na letounu L-410 NG během běžného provozu.

## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo analyzovat současný stav údržby a navrhnout efektivní postupy údržby konstrukčních částí letadel v souladu s koncepcí **DAMAGE TOLERANCE**.

Cíle práce odráží potřeby leteckého průmyslu současnosti, kdy v České republice vznikají první letadla s koncepcí konstrukce **DAMAGE TOLERANCE**. U této konstrukce je zapotřebí aplikovat rozdílný přístup k údržbě než u konstrukcí s koncepcí **SAFE LIFE**. V českém leteckém průmyslu konstrukce **DAMAGE TOLERANCE** zatím nebyly aplikovány, modernizaci plánování údržby tak nebylo nutné řešit. Tato situace se mění nejen s příchodem moderních koncepcí konstrukce do dané kategorie letadel, ale i se stále se zvyšující se komplexitou ostatních systémů letadel, k čemuž přispívá fakt, že zvyšování efektivity údržby se stává celosvětovým trendem i u menších letadel. Práce byla koncipována s důrazem na maximální obecnost, tak aby výsledky práce bylo možné použít univerzálně u každého letadla. Případová studie byla provedena na základě veřejně dostupných podkladů k letounu L-410NG, které je prozatím jediným letounem využívajícím koncepci **DAMAGE TOLERANCE** v České republice.

Dizertační práce obsahuje nový pohled na oblast údržby draku letadel kategorie CS-23/ FAR 23 a zároveň rozšiřuje práci Ing. Jindřicha Findy, Ph.D. [7], ve které byla metoda **MSG-3** aplikována na systémy a pohonné jednotky. Práce přináší prvek novosti v oblasti volby konkrétních inspekčních metod a jejich aplikace do plánované údržby. Postupy navržené v této práci se ukazují jako přínosné i při uvažování některých zjednodušení, které pramení z nedostatků podkladů nebo zjednodušení některých (zejména ekonomických) aspektů.

Dále bylo prokázáno, že za jistých okolností může použití **NDT** metod zefektivnit údržbu výrazným způsobem, ačkoliv je obecně doporučováno, aby se v případech, kdy je to možné používali pouze vizuální metody. Postupy navržené v této práci mají značný potenciál k rozšíření. **Vícekritériální hodnocení variant může být například aplikováno v SHM pro určení vhodných konstrukčních částí letounu pro umístění senzorů pro systém SHM.**

## POUŽITÉ SYMBOLY

|            |   |                                                |      |
|------------|---|------------------------------------------------|------|
| $L$        | - | Velikost trhliny                               | [mm] |
| $L_{DET}$  | - | Detekovatelná délka trhliny                    | [mm] |
| $L_{VIS}$  | - | Viditelná délka trhliny                        | [mm] |
| $L_H$      | - | Skrytá část trhliny                            | [mm] |
| $L_{BAS}$  | - | Základní detekovatelná délka trhliny           | [mm] |
| $L_{Crit}$ | - | Kritická délka trhliny                         | [mm] |
| $t$        | - | Tloušťka                                       | [mm] |
| $T_P$      | - | Počáteční práh prohlídek                       | [h]  |
| $T_{Crit}$ | - | Čas do dosažení kritické délky trhliny         | [h]  |
| $T_I$      | - | Základní interval prohlídek                    | [h]  |
| $T_{Det}$  | - | Čas dosažení detekovatelné trhliny             | [h]  |
| $k_g$      | - | Faktor „tloušťky“                              | [-]  |
| $k_e$      | - | Faktor „hrany“                                 | [-]  |
| $RF_1$     | - | Rozptylový faktor pro počáteční práh prohlídek | [-]  |
| $RF_2$     | - | Rozptylový faktor pro intervaly prohlídek      | [-]  |
| $A$        | - | Označení variant                               | [-]  |
| $K$        | - | Označení kritérií                              | [-]  |
| $v$        | - | Váha kritérií                                  | [-]  |
| $w$        | - | Normovaná váha kritérií                        | [-]  |
| $f$        | - | Počet preferencí                               | [-]  |
| $b$        | - | Počet bodů                                     | [-]  |
| $d^+$      | - | Vzdálenost od ideální varianty                 | [-]  |
| $d^-$      | - | Vzdálenost od bazální varianty                 | [-]  |
| $c$        | - | Relativní ukazatel od bazální varianty         | [-]  |
| $u(A)$     | - | Agregovaná funkce užitku                       | [-]  |
| $kc$       | - | Počet cyklů                                    | [-]  |

## SEZNAM ZKRATEK

|               |   |                                                        |
|---------------|---|--------------------------------------------------------|
| <b>MSG-3</b>  | - | Maintenance Steering Group (rev. 2011.1)               |
| <b>SHM</b>    | - | Structure Health Monitoring                            |
| <b>MCDA</b>   | - | Multiple Criteria Decision Analysis                    |
| <b>VHV</b>    | - | Vícekritériální Hodnocení Variant                      |
| <b>FAA</b>    | - | Federal Aviation Administration                        |
| <b>L/HIFR</b> | - | Lighting/ High Intensity Radiated Field                |
| <b>SSI</b>    | - | Significant Structural Item                            |
| <b>PSE</b>    | - | Principal Structural Elements                          |
| <b>ED</b>     | - | Environmental Deterioration                            |
| <b>AD</b>     | - | Accidental damage                                      |
| <b>FD</b>     | - | Fatigue damage                                         |
| <b>SI</b>     | - | Structural Item                                        |
| <b>S-SHM</b>  | - | Scheduled Structure Health Monitoring                  |
| <b>A-SHM</b>  | - | Automated Structure Health Monitoring                  |
| <b>MSI</b>    | - | Maintenance Significant Items                          |
| <b>NDT</b>    | - | Nedestruktivní Defektoskopie (Non-Destructive Testing) |
| <b>EASA</b>   | - | European Aviation Safety Agency                        |

|            |   |                              |
|------------|---|------------------------------|
| <b>GVI</b> | - | Obecná vizuální prohlídka    |
| <b>DET</b> | - | Detailní vizuální prohlídka  |
| <b>SDI</b> | - | Speciální detailní prohlídka |

## SEZNAM ZDROJŮ

- [1] ATA MSG-3 - Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Developement; Revision 2011.
- [2] ACKERT, S. P. Basics of Aircraft Maintenance Programs for financiers, Aircraftmonitor.com [Online] Dostupné z: [www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/basics\\_of\\_aircraft\\_maintenance\\_programs\\_for\\_financiers\\_v1.pdf](http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/basics_of_aircraft_maintenance_programs_for_financiers_v1.pdf) [7.2.2014]
- [3] FIALA, P. - JABLONSKÝ, J. - MAŇAS, M. Vícekriteriální rozhodování. 1. vyd. Praha, VŠE 1997. ISBN 80-7079-743-7
- [4] KORVINY, P. Teoretické základy vícekriteriálního rozhodování. Dostupné z: [http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie\\_mca.pdf](http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie_mca.pdf) [17.1.2014]
- [5] AC-121-22C: Maintenance Review Boards, Maintenance Type Boards, and OEM/TCH Recommended Maintenance Proceses, 2012
- [6] EASA CS-23: Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes
- [7] FINDA, J. Metody stanovení rozsahu a periodicity údržby letadel/ letadlových celků, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008
- [8] Approval Procedures For Modifications and Repairs to Damage Tolerant Aircraft Structures. Transport Canada. [S.l.]. 2004. dostupné na <https://www.tc.gc.ca> [22.6.2016]
- [9] VLČEK, D.: Stanovení životnosti dolního integrálního panelu křídla letounu L410 NG filozofií damage tolerance. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 160 s.
- [10] Issue Paper IP 105 Further definition of Structural Health Monitoring (SHM)/Addition to MSG-3, 2009 Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/imrbpb-issue-papers/ip-105> [26.9.2016]
- [11] BERAL, B.- SPECKMANN, H. Structural health monitoring (SHM) for aircraft structures: a challenge for system developers and aircraft manufactures. Proc. of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Edited by F.-K. Chang, Stanford University. 2003.
- [12] ZHAO, X. et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. Smart materials and structures, 2007, 16.4: 1208.
- [13] BECCALI, M. et al. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. Renewable energy, 2003, 28.13: 2063-2087.
- [14] NUTT, D. J., et al. Estimating the harms of nicotine-containing products using the MCDA approach. European addiction research, 2014, 20.5: 218-225.
- [15] SUN, Xiaoqian. Multiple criteria decision analysis techniques in aircraft design and evaluation processes. Hamburg, Technischen Universitat Hamburg, Air Transportation Systems. 2012.

- [16] WU, H., et al. Performance evaluation of aircraft maintenance staff using a fuzzy MCDM approach. *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, 2012, 8: 3919-3937.
- [17] BENT, L. Practical airframe fatigue and damage tolerance. S.l.: Sigma K, 2010. ISBN 9780956517401.
- [18] ASM Handbook. Volume 19: Fatigue and Fracture. S.l.: ASM International, 1996. ISBN 978-0-87170-385-9.
- [19] SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials. 2nd ed. S.l.: Springer, 2009. ISBN 978-1402068072.
- [20] Maintenance schedule for the L410 UVP-E20 aeroplane without overhaul, LET a.s, 1995
- [21] GAMA Specification No.2 – Specification for Manufacturers Maintenance Data, 1978
- [22] ATA Sepcification 2200 (iSpec 2200) – Information Standards for Aviation Maintenance, 2004
- [23] EASA CS-25 Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes
- [24] Nařízení Komise (EU) č. 1321/2014 – Příloha 2 Část 145 (Annex II Part 145)
- [25] DUGGAL, K. Study of various non-destructive testing technique & application of these techniques to inspect aircraft wheel hubs & aero engine fan blades & suggest remedial measures. Gurgaon, Haryana, 2005. Vedoucí práce O.P. Chawla.
- [26] KATUNIN, A; DRAGAN, K; DZIENDZIKOWSKI, M. Damage identification in aircraft composite structures: a case study using various non-destructive testing techniques. *Composite structures*, 2015, 127: 1-9.

## PUBLIKACE AUTORA

- [PA1] KOŠTIAL, R. Use Common Cause Analysis in the Czech General Aviation. *RESEARCH BULLETIN*, 2012, roč. 2012, č. 22, s. 1-9. ISSN: 1425- 2104.
- [PA2] KOŠTIAL, R. *Summary Of Anti-Icing/ De-Icing Systems Patents*. Výzkumná zpráva, Projekt FSI-S-14-2211, Brno, 2014.
- [PA3] KOŠTIAL, R. Přehled a Popis Zkoušek Vzorků Anti- Icing Systému v Klimatické Komoře, *Výzkumná zpráva*, Projekt FSI-S-14-2211, Brno, 2016.
- [PA4] KOŠTIAL, R. Vyhodnocení Zkoušek Anti- Námrazového Systému, Výzkumná zpráva, Projekt FSI-S-14-2211, Brno, 2016.
- [PA5] KOŠTIAL, R., JANHUBA, L., HLINKA, J. Intelligent Scheduled Maintenance Methodology for General Aviation Structures Based on MSG-3 And Multiple- Criteria Decision Making Analysis, *Engineering Mechanics 2017 Proceedings*, s. 498-501. ISBN: 978-80-214-5497-2

## TVŮRČÍ AKTIVITY

- [TA1] KOŠTIAL, R.; BENČALÍK, K.; HLINKA, J.; JANHUBA, L.; TŘETINA, K. Rám pro zkoušení elektrických aktuátorů; funkční vzorek; 2013
- [TA2] BENČALÍK, K.; KOŠTIAL, R.; TŘETINA, K.; Stend pro testování elektrických aktuátorů; funkční vzorek; 2012
- [TA3] TŘETINA, K.; BENČALÍK, K.; TREFILOVÁ, H.; KOŠTIAL, R. Siloměr pro měření síly v laně; -funkční vzorek; 2011

## Autorův životopis

### Jméno

Rostislav Košťál

### Osobní údaje

Datum narození: 27. 6. 1984  
Místo narození: Znojmo  
Státní příslušnost: Česká republika  
Národnost: česká  
Rodinný stav: svobodný  
Email: kostial@fme.vutbr.cz

### Dosažené vzdělání

2010 –dosud      Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně  
Technická 2, 616 69 Brno  
Specializace: Konstrukční a procesní inženýrství – postgraduální studium

2008 – 2010      Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně  
Technická 2, 616 69 Brno  
Specializace: Stavba letadel – magisterské studium

2004 – 2008      Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně  
Technická 2, 616 69 Brno  
Specializace: Strojní inženýrství – bakalářské studium

2000 – 2004      Střední průmyslová škola Edvarda Beneše, nábř. Komenského 1  
690 25 Břeclav  
Specializace: Konstruování s podporou počítače

### Jazykové znalosti

Angličtina

### Zaměstnání

2012-dosud      Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně  
Technicko-hospodářský pracovník – Sekce CFD a FEM

2009-2011      Soukromá střední průmyslová škola Břeclav, spol. s r. o. CULTUS  
Učitel- Odborné předměty (Informační technologie, CAD, Stroje a zařízení)

### Stáže a praxe

2011      Aircraft Industries a.s.  
Analytik – Analýzy statické pevnosti na projektu M.O.S.T.A.

### Vědecko–výzkumná činnost

2012-2013      Řešitel grantového projektu FSI-S-12-4  
s názvem „Rozvoj metod zkoušení a diagnostiky moderních palubních  
soustav letadel“

### Projektová činnost

Letadla      EV-55, L-410NG (projekt MOSTA), VUT 061 Turbo, VUT 051 RAY,  
Aerospool WT-9 Dynamic

TAČR CoC      Výzkumné centrum pokročilých leteckých konstrukcí

**Konference a semináře**

2012                      Konference READ 2012, Brno, příspěvek

2017                      Konference Engineering Mechanics 2017, Svatka, příspěvek