



ANALÝZA SÚČASNÝCH A MOŽNOSTI APLIKÁCIE NOVÝCH POSTUPOV PREDIKTÍVNEJ ÚDRŽBY

David Milac
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Ján Rostáš
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article deals with the analysis of current predictive maintenance procedures and possibilities of applying its new procedures in aviation. The article examines the currently used strategies as well as their legislative frameworks and then delves deeper into predictive maintenance strategies. The aim of this article is to analyse the current state of predictive maintenance, highlight the causes of problems with its implementation in practice and to explore the future of this maintenance strategy from technical as well as legislative perspective and finally the trends that will adjust it. On the basis of study of technical articles, legislative regulations and various documents, conclusion have been reached that conclude that predictive maintenance in aviation is undoubtedly a major step forward in the field of aircraft maintenance and preservation of their airworthiness. However, the true potential of predictive maintenance remains, due to existing barriers, a question of the future technological and legislative developments in aviation and aircraft maintenance.

Keywords

Predictive maintenance, AI, Maintenance

1. Úvod

Údržba bola súčasťou letectva už od jeho začiatkov. Postupným vývojom letectva došlo aj k vývoju údržby. Začali byť potrební skúsení technici a inžinieri, ktorí disponovali odbornými znalosťami či už komponentov lietadla alebo ich systémov. S príchodom vyspelejšej techniky začali byť lietadlá viacej sofistikovanejšie a efektívnejšie a vzrástli požiadavky aj na údržbu. Údržba má za úlohu udržiavať lietadlá technicky spôsobilé na let tým, že opraví to čo sa pokazí, často to však spôsobuje neželané prestoje lietadiel a ich nedostupnosť. S príchodom digitálnej doby riadenej údajmi, sa musela aj klasická údržba pretransformovať na údržbu riadenú údajmi. Tieto údaje je následne potrebné efektívne spracovať a vytvoriť z nich užitočné informácie pre riadenie údržby. Tento článok sa zaoberá práve prediktívnou údržbou, ktorá by v teoretickej forme vedela veľmi prispieť do letectva. Skúma požiadavky a problémy s aplikovaním prediktívnej údržby do prevádzky a analyzuje aj súčasný stav prediktívnej údržby a súčasne dostupné nástroje, ktoré môžeme považovať za nástroje prediktívnej údržby. V závere sa následne zaoberá budúcnosťou prediktívnej údržby, o ktorej vieme, že ju vo veľkom bude ovplyvňovať umelá inteligencia a strojové učenie. Už dnes sú tieto technológie využívané nielen v letectve a je nepochybné, že ich zakomponovanie do systému a využívanie má pozitívny prínos. Cieľom tohto článku je poukázať na technológiu a postupy prediktívnej údržby, ako aj priblížiť príčiny, ktoré bránia jej širšiemu uplatneniu v civilnom letectve.

2. Metodika a metódy skúmania

Táto kapitola článku je zameraná na metódy a postupy, ktoré boli použité pri zbere, spracovaní a vyhodnocovaní získaných informácií. Hlavným cieľom tohto článku je analyzovať súčasný stav prediktívnej údržby, identifikácia problémov s jej

zavádzaním do praxe a analýza budúcnosti prediktívnej údržby v letectve. Pri zbere údajov a informácií boli použité odborné články, oficiálne stránky Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva (EASA), odborné štúdie a oficiálne stránky poskytovateľov aktuálne dostupných nástrojov prediktívnej údržby na trhu, ako napríklad Boeing alebo Airbus. Použité boli aj informácie z aktuálne platnej legislatívy Slovenskej republiky a Európskej únie. Pre definície a poznatky z leteckej údržby boli využité odborné prezentácie využívané pri výučbe predmetu Technológia údržby lietadiel.

Na začiatku bolo potrebné zdefinovať si údržbu ako takú a pojmy s ňou spojené. Na legislatívnu časť údržby boli použité aktuálne predpisy L8 a L6 a takisto aj Letecký zákon a nariadenia komisie EÚ ako aj dokumenty EASA. Ďalšou úlohou bola identifikácia požiadaviek a problémov so zavádzaním prediktívnej údržby do praxe. Využitá bola syntéza údajov a následné identifikovanie problémov pri zavádzaní prediktívnej údržby formou analýzy s využitím informácií z odborných článkov a informácií o aktuálne dostupných nástrojoch prediktívnej údržby. Pri súčasnom stave prediktívnej údržby bola pozornosť zameraná na štyri aktuálne dostupné riešenia prediktívnej údržby od leteckých výrobcov alebo organizácií poskytujúcich údržbu (MRO). Boli uvedené výhody jednotlivých systémov, ako aj popísané ich funkcie. Ďalšiu časť tvorila budúcnosť prediktívnej údržby ako v technickom smere tak aj v legislatívnom smere, kde bola využitá syntéza údajov z oficiálnych stránok EASA ako aj publikácií tejto agentúry. Táto časť sa zaoberala novými trendami, ktoré budú v budúcnosti určovať smer údržby, keďže tieto technológie sa vo veľkom začínajú využívať už dnes. Poslednou časťou bolo vyhodnotenie analýzy, kde boli zosumarizované všetky dôležité aspekty a informácie týkajúce sa postupov prediktívnej údržby.

3. Poznatky z prediktívnej údržby

Údržba tvorí, dôležitú časť celého leteckého priemyslu, už od jeho začiatkov. Aj keď sú už v dnešnej dobe používané moderné technológie a za väčšinou nehôd stojí zlyhanie ľudského faktora, stále hrozí nebezpečenstvo zlyhania lietadlovej techniky vplyvom dlhodobého používania a s tým vyplývajúceho opotrebovávania, prípadne prevádzkových poškodení. Ak je komponent systému lietadla zaťažovaný v cykloch alebo kontinuálne, môže dôjsť k jeho poškodeniu do takej miery, že nebude schopný ďalej správne fungovať. Ak dôjde k takémuto poškodeniu, je na mieste podľa údržbovej dokumentácie buď oprava daného komponentu lietadla alebo jeho kompletná výmena za nový kus. V rámci šetrenia finančných prostriedkov a využitia potenciálu technickej životnosti súčiastok, by bolo vhodné mať nástroj, ktorý by vedel spoľahlivo predpovedať degradáciu komponentu a vedel by upozorniť na nutnú výmenu daného komponentu lietadla.

3.1. Definície údržby

Technická údržba lietadiel je proces, pri ktorom sa vykonávajú na lietadle také úkony, ktorými sa zabezpečí jeho letová spôsobilosť, teda oprava, výmena alebo prehliadka lietadla, následkom ktorej je lietadlo schopné bezpečného návratu do prevádzky.

Nariadenie komisie (EÚ) č. 1321/2014 definuje údržbu takto: „Údržba znamená jednu z týchto činností alebo kombináciu týchto činností: generálna oprava, oprava, prehliadka, výmena, modifikácia alebo odstránenie porúch lietadla alebo komponentu s výnimkou predletovej prehliadky“ [1].

V predpise L8 Letová spôsobilosť lietadiel, je zase údržba definovaná ako: „Vykonávanie úloh požadovaných na zabezpečenie zachovania letovej spôsobilosti lietadla, ktoré zahŕňajú buď jednotlivu alebo vzájomnú kombináciu generálnej opravy, prehliadky, výmeny, odstránenia porúch a zapracovania modifikácie alebo opravy“ [2].

3.2. Legislatíva

Právne a legislatívne informácie týkajúce sa údržby lietadiel nájdeme v predpisoch L6 Prevádzka lietadiel a L8 Letová spôsobilosť lietadiel, ktoré vychádzajú z medzinárodných štandardov a doporučených postupov Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo (ICAO).

Konkrétne v predpise L6 nájdeme tieto informácie v Hlave 8 – Údržba letúnov, ktorá sa skladá celkom z piatich častí, ktoré majú príslušné podčasti. V týchto častiach nájdeme informácie o zodpovednostiach vlastníka alebo nájomcu lietadla ohľadom údržby, informácie za akých okolností sa letún nesmie používať, informácie, ktoré záznamy o údržbe sa musia uchovávať a aj časové obdobie ich uchovania, informácie o zachovaní letovej spôsobilosti, informácie o modifikáciách lietadla a informácie a pokyny k potvrdeniu o vykonanej údržbe [3].

V predpise L8 nájdeme informácie týkajúce sa údržby v Hlave 10 – Informácie o údržbe, ktorá sa skladá zo štyroch častí. Nájdeme tu informácie na tvorbu postupov pri údržbe a opisy toho, čo by mali dané informácie obsahovať. Ďalej nájdeme informácie o údržbe, teda odporúčané spôsoby a postupy vykonávanie údržby, ako aj návod na diagnostiku chýb, informácie

o programe údržby, opis letúna a informácie o údržbe vyplývajúce z typového osvedčenia [2].

Ďalším dôležitým predpisom, ktorý obsahuje informácie o údržbe a stanovuje požiadavky na údržbu Nariadenie komisie (EÚ) 1321/2014. Toto nariadenie sa skladá z celkom ôsmich častí:

- Časť M – Zachovanie letovej spôsobilosti
- Časť 145 – Organizácie oprávnené k údržbe lietadiel
- Časť 66 – Požiadavky na osvedčujúci personál
- Časť 147 – Organizácie pre výcvik údržby
- Časť T – Technické preskúmanie letovej spôsobilosti lietadla
- Časť ML – Údržba a letová spôsobilosť malých lietadiel do 2730 kg
- Časť CAMO – Organizácia riadenia zachovania letovej spôsobilosti
- Časť CAO – Kombinovaná organizácia zachovania letovej spôsobilosti [1], [4].

3.3. Stratégie údržby

Pri vykonávaní údržby na lietadle je možnosť výberu z viacerých stratégií alebo prístupov k údržbe.

Prvou stratégiou je reaktívna údržba, nazývaná tiež ako údržba po poruche (run to failure). Pri používaní tejto stratégie údržby dochádza k výmene komponentu lietadla až vtedy, keď sa pokazí a nie je schopná ďalej plniť svoj účel. Technický život komponentu sa teda využíva na maximum ale nevýhodou tejto stratégie sú dlhé neplánované prestoje lietadiel kvôli výmene pokazeného komponentu. Túto stratégiu je preto vhodné využívať vtedy, ak je zabezpečená rýchla výmena poškodeného komponentu za nový kus. K dispozícii sú teda dva kusy rovnakého komponentu, jeden na lietadle a jeden na sklade tzv. v stave pohotovosti. Pri poškodení sa komponent vymení za nový a poškodený komponent sa buď opraví, alebo sa zabezpečí čisto nový kus do stavu pohotovosti. Reaktívna údržba teda reaguje na poruchu, ktorá sa už stala. Výhodou tejto stratégie je teda využitie plnej technickej životnosti komponentu ale nevýhodou sú prestoje lietadiel vplyvom neplánovanej údržby [5].

Ďalšou stratégiou údržby je preventívna údržba. Pri tejto stratégií údržby sa komponent vymieňa preventívne, pred jeho poškodením, teda ešte pred dosiahnutím kritického bodu technickej životnosti komponentu. Úmyslom tejto stratégie údržby je minimalizovať riziko poškodenia komponentu a s tým spojené prestoje lietadiel z dôvodu neplánovanej údržby. Základmi tejto stratégie sú všeobecné teórie spoľahlivosti a predpokladané časové priebehy určitých dôležitých parametrov spoľahlivosti. Na základe tohto sú stanovené intervaly výmeny a opráv poškodených komponentov. Preventívnu údržbu je možné rozdeliť na dve kategórie a to:

- Údržba s konštantným intervalom

- Údržba s premenlivým intervalom [5].

Pri preventívnej údržbe s konštantným intervalom sa počíta s tým, že plánovanú životnosť majú len určité komponenty a ostatné komponenty vydržia po celú dobu prevádzky lietadla [5].

Pri preventívnej údržbe s premenlivým intervalom sa interval údržby v závislosti na veku a spôsobe prevádzkovania zariadenia mení (väčšinou skrácuje) tak, aby zostala zachovaná zmena životnosti komponentu spôsobená zmenou mechanických, materiálových a geometrických vlastností stroja ako celku [5].

Výhodou preventívnej údržby je teda minimalizovanie neplánovanej údržby lietadla vplyvom poškodenej súčiastky. Nevýhodou sú však vyššie náklady spojené s plánovanými opravami a výmenami komponentov podľa stanoveného rozvrhu. Nevýhodou je aj to, že komponent je vymenený predčasne, kedy jeho technická životnosť nemusí byť až tak kritická a komponent by mohol fungovať v prevádzke ešte niekoľko letových hodín [5].

Poslednou stratégiou je prediktívna údržba. Pri tejto stratégii je komponent vymenený vtedy, keď je technická životnosť komponentu lietadla využitá do maximálnej miery, teda komponent je treba vymeniť, pretože jeho ďalšie používanie by malo za následok jeho poškodenie. Pri tejto údržbe sa využívajú moderné postupy, ako napríklad diagnostika, modely na predpovedanie degradácie komponentu, umelá inteligencia a strojové učenie. Je to „ideálna“ stratégia pre údržbu v letectve, pretože ako už bolo spomenuté, technická životnosť je využitá na maximum a komponent sa vymieňa až vtedy, keď je to naozaj potrebné. Na druhú stranu táto stratégia má aj svoje negatíva. Hlavnou nevýhodou tejto stratégie sú jej vysoké počiatočné náklady, keďže na úspešné zavedenie tejto stratégie je potrebná určitá softvérová infraštruktúra. Počiatočné vysoké náklady sú však kompenzované počas jej používania, kedy v porovnaní s reaktívnou a preventívnou údržbou výrazne šetrí náklady na údržbu [5].

Ministerstvo energetiky USA odhaduje, že dobre navrhnutý systém prediktívnej údržby vie znížiť náklady na údržbu až o 30%. Nezávislá poradenská spoločnosť zase odhaduje, že úspory leteckých spoločností pri aktívnom využívaní prediktívnej údržby a monitorovania stavu lietadiel by mohli priniesť úspory vo výške až 3 000 000 000 USD, čo predstavuje ekvivalent 2 880 000 000 EUR [6].

4. Požiadavky pre úspešné zavedenie prediktívnej údržby

Prediktívna údržba v letectve kladie vysoké nároky na úspešné zavedenie do praxe, najmä kvôli potrebe spracovania veľkého množstva prevádzkových dát. Údržba sa plánuje na základe pravidelného monitorovania technického stavu komponentov pomocou snímačov, ktoré sledujú fyzikálne veličiny ako vibrácie, tlak alebo teplota. Na základe analýzy týchto údajov sa predpovedá miera degradácie a komponenty sa vymieňajú pred dosiahnutím kritického stavu. Moderné lietadlá, ako napríklad Airbus A380, ktorý využíva 25 000 snímačov, poskytujú ideálne podmienky na využitie prediktívnej údržby [7].

Analýza dát prebieha prostredníctvom štatistických modelov a algoritmov strojového učenia, pričom v praxi sa využívajú tri hlavné prístupy:

- Diagnostika v reálnom čase (zaznamenanie porúch počas letu a ich následná oprava na zemi)
- Asistencia pri lete v reálnom čase (pomoc a pokyny pilotovi počas letu)
- Prognostika (predpovedanie degradácie komponentov alebo systémov pomocou environmentálnych a prevádzkových podmienok) [7].

Dáta používané na údržbu zahŕňajú časové údaje, písomné hlásenia a grafické zobrazenia. Najviac sa využívajú časové údaje vďaka ich jednoduchému spracovaniu, zatiaľ čo písomné hlásenia čelia problémom s jazykovou interpretáciou. Grafické dáta, hoci menej rozšírené, sú prínosné pri vizuálnych kontrolách lietadiel, pričom sa čoraz viac zvažuje ich automatizácia pomocou robotov a umelej inteligencie. Tieto dáta ako aj zdroje týchto dát sú uvedené nižšie v tabuľke 1 [7].

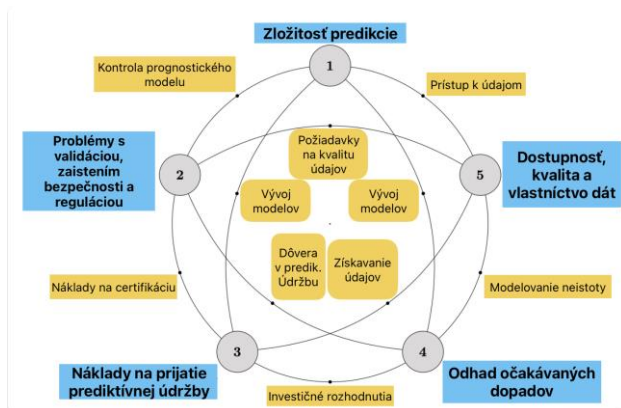
Tabuľka 1, Dáta a ich zdroje, zdroj: [7]

Typ dát	Zdroje dát
Časové údaje	Turbodúchadlový motor, hydraulika a ložiská podvozdu
Písomné hlásenia	Hlásenia pilotov, záznamy o poruchách, hlásenia po lete
Grafické údaje	Zobrazovanie trupu a krídel lietadla

Automatizované systémy si postupne nachádzajú uplatnenie. Napríklad Airbus využíva technológiu „Drone and Augmented Reality Inspections“. Pri tejto technológii sú využívané drony, umelá inteligencia a rozšírená realita na inšpekcie trupu lietadla. Technológia je zatiaľ aplikovaná vo vojenskom sektore, s ktorým aj Airbus spolupracuje na týchto technológiách. Pri lietadle Airbus A400 bolo za pomoci tejto technológie dosiahnutá úspora času na inšpekciách trupu, ktorá sa znížila z niekoľkých týždňov na dve hodiny. Je teda pravdepodobné, že táto technológia by sa mohla rozšíriť aj do civilného letectva [7], [8]

5. Problémy so zavádzaním prediktívnej údržby do praxe

Napriek výhodám prediktívnej údržby stále nie je vo svete využívaná vo veľkom. Národný úrad pre letectvo a vesmír (NASA) skúmala, súčasné bariéry, ktoré bránia jej zavedeniu do praxe. Obrázok jedna zobrazuje identifikované bariéry.



Obrázok 1, Prekážky brániace úspešnému zavedeniu prediktívnej údržby, zdroj: [6]

5.1. Zložitosť predikcie

Prediktívna údržba je náročná na zavedenie kvôli zložitosti prognostiky a vzájomnej prepojenosti systémov lietadla. Prognostické modely často dobre fungujú v laboratórnych podmienkach, ale v reálnej prevádzke zlyhávajú, pretože degradácia komponentov závisí od prostredia, štýlu pilotáže a individuálneho opotrebovania súčiastok. Presnosť predikcií znižuje aj fakt, že po oprave alebo výmene sa komponenty správajú odlišne. Modelovanie a implementácia systémov navyše čelia problémom s neistotami v údajoch a vysokou výpočtovou náročnosťou, čo je problém najmä pri zložitých a prepojených systémoch. Logistické a zmluvné bariéry takisto komplikujú zavedenie prediktívnej údržby. Existujúce procesy a zmluvy často nepočítajú s dynamickými predikciami, čo sťažuje ich integráciu najmä na vzdialených letiskách. Veľkým problémom sú aj počiatočné investície – treba vyvíjať nové nástroje na modelovanie systémov, vytvárať presnejšie prediktívne algoritmy a riešiť problém výpočtovej náročnosti, napríklad použitím náhradných modelov alebo technológií ako neuromorfne či kvantové výpočty. Zároveň je kľúčová spolupráca odborníkov z technických aj dátových oblastí, modernizácia procesov logistiky a údržby, a zvyšovanie kvalifikácie pracovníkov prostredníctvom špecializovaného vzdelávania a výcviku [6].

5.2. Problémy s validáciou, zaistením bezpečnosti a reguláciou

Prediktívna údržba musí byť overená tak, aby neohrozila bezpečnosť leteckej dopravy a spĺňala požiadavky regulačných orgánov ako EASA či FAA. Je nevyhnutné preukázať, že nové systémy a prognostické modely nevedú k zvýšenému riziku zlyhania. Jednou z hlavných prekážok je chýbajúca štandardizácia metodík, postupov a noriem pre vývoj a certifikáciu prediktívnych systémov. Táto absencia vedie k nejednotnému hodnoteniu bezpečnosti a spomaľuje schvaľovacie procesy. Hoci EASA a FAA podnikli kroky vpred, implementácia prediktívnej údržby zostáva časovo náročná [6].

Ďalšie významné bariéry zahŕňajú:

- Validáciu algoritmov – nutnosť posudzovať kvalitu dát, robustnosť algoritmov a ich schopnosť zvládať zmeny v systémoch a prostredí

- Vzdelanie pracovníkov – inžinieri musia mať odborné znalosti o fungovaní systémov aj o rizikách prediktívnej údržby
- Kvalitu údajov – chybné senzory, neúplné alebo nekonzistentné dáta znižujú presnosť modelov a vyžadujú prísnejšie testovanie [6].

Na prekonanie týchto problémov je potrebné investovať do vývoja noriem a príručiek na validáciu prediktívnych systémov. Ďalej je potrebná investícia do validácie algoritmov, najmä tých založených na strojovom učení (napr. pomocou prognostických kariet z AI/ML komunity). Je potrebné investovať aj do modernizácie infraštruktúry, vrátane vysoko výkonných výpočtových systémov, správy veľkých dát a zabezpečených sietí. Ďalšie investície by sa mali zamerať na podporné technológie ako vizualizáciu kvality predpovedí, nástroje na automatickú validáciu dát a vývoj open-source riešení pre priemyselné použitie. Takéto nástroje môžu výrazne prispieť k bezpečnému a efektívnemu nasadeniu prediktívnej údržby v letectve [6].

5.3. Náklady na implementáciu prediktívnej údržby

Zavedenie prediktívnej údržby v letectve je finančne a časovo náročné, pričom práve vysoké počiatočné náklady brzdia jej širšie rozšírenie. Vývoj spoľahlivých modelov degradácie môže trvať niekoľko rokov. Náklady možno rozdeliť na implementačné a prevádzkové [6].

Implementačné náklady zahŕňajú vývoj výpočtových modelov, výrobu a obstaranie senzorov, integráciu technológie do existujúcich systémov a riešenie problémov so starším hardvérom a softvérom. Významnou položkou sú aj náklady na zber veľkého množstva kvalitných údajov vrátane inštalácie, kalibrácie snímačov a riešenia prenosu a ukladania dát [6].

Prevádzkové náklady tvoria mzdy vyškoleného personálu, údržba systémov, modernizácia infraštruktúry a integrácia nových systémov so staršími. Dôležité sú aj výdavky spojené s certifikáciou a validáciou systémov, aby bola zachovaná vysoká úroveň bezpečnosti [6].

Neúspešné predikcie môžu navyše viesť k neplánovaným prestojom lietadiel a zvýšeným nákladom. Na úspešné zavedenie prediktívnej údržby je potrebné investovať aj do vytvárania spoločných noriem, technologických platforiem a budovania základných softvérových balíkov, ktoré podpora vývoj a aplikáciu tejto stratégie [6].

5.4. Odhad očakávaných dopadov

Pri zavádzaní prediktívnej údržby je dôležité vykonať komplexnú analýzu nákladov a prínosov. Letecké spoločnosti, výrobcovia OEM a MRO musia posúdiť, či investícia do tejto technológie prinesie očakávané výhody. Odhad dopadov na civilné letectvo je však zložitý, keďže neexistujú štandardizované metodiky na modelovanie životného cyklu ani presné nástroje na predikciu nákladov a rizík. Väčšina spoločností, ktoré odkladá zavedenie prediktívnej údržby, uvádza práve neschopnosť kvantifikovať budúce prínosy ako hlavný dôvod. Modelovanie životného cyklu zahŕňa analýzu obstarávania, prevádzky, údržby a opráv, no presné hodnotenie dopadov prediktívnej údržby zatiaľ nie je

spoľahlivo dostupné. Modelovanie neistoty je ďalšou výzvou. Neistoty vznikajú buď z prirodzenej náhodnosti systémov, alebo z nedostatku znalostí, pričom ich správne riadenie je kľúčové pre budúce inovácie. Na trhu náhradných dielov existuje silná konkurencia medzi leteckými spoločnosťami, nezávislými MRO a výrobcami OEM. OEM výrobcovia majú výhodu v prístupe k originálnym údajom, zatiaľ čo ostatní musia spoliehať na reverzné inžinierstvo, čo zvyšuje náklady a komplikuje rozvoj prediktívnej údržby [6].

NASA navrhuje dve hlavné riešenia: vytvorenie štandardizovanej metodiky na simuláciu životného cyklu lietadiel, ktorá umožní izolovať a kvantifikovať prínosy prediktívnej údržby, a vypracovanie metodiky na zapracovanie neistôt do týchto odhadov. K tomu by sa mali využiť techniky ako analýza citlivosti či nepravdepodobnostné modelovanie, čo by mohlo zlepšiť presnosť a dôveryhodnosť predikcií pre rozhodovanie v praxi [6].

5.5. Dostupnosť a kvalita údajov

Technológie prediktívnej údržby sú silne závislé od dostupnosti, kvality a správneho spracovania údajov. Medzi hlavné problémy patrí obmedzený prístup k dátam, otázky ich vlastníctva, ochrany súkromia a technické prekážky pri zbere a prenose údajov [6].

Správnosť údajov je kritická – nie vždy sú dostupné snímače na sledovanie potrebných parametrov alebo sú náklady na ich implementáciu neprimerane vysoké. Okrem toho prenos údajov počas letu je často obmedzený kvôli technickým a finančným faktorom. Digitalizácia údržbových záznamov je nevyhnutná, keďže papierová dokumentácia stále prevažuje a komplikuje automatizované spracovanie údajov [6].

Vlastníctvo dát je ďalším problémom – OEM výrobcovia často obmedzujú prístup k prevádzkovým údajom, čo brzdí rozvoj prediktívnej údržby u MRO organizácií a leteckých spoločností [6].

Potrebné sú investície do nových technológií snímania, digitálneho prenosu údajov (napr. Gatelink cez satelity), digitalizácie záznamov a automatizácie inšpekcií. Kľúčové je tiež vytvorenie štandardizovaných formátov pre zber a zdieľanie údajov v spolupráci s organizáciami ako SAE, IEEE alebo IDCA. Podporované by malo byť aj vytváranie anonymizovaných dátových súborov na školenie a validáciu modelov prediktívnej údržby a rozvoj technológií na bezpečné zdieľanie údajov medzi organizáciami [6].

6. Súčasnosť a nové trendy aplikovania prediktívnej údržby

Aj napriek očividným výhodám prediktívnej údržby oproti ostatným stratégiám údržby, stále nie je aplikovaná a používaná celosvetovo. V iných oblastiach priemyslu (napríklad automobilový a výrobný priemysel) je táto stratégia úspešne využívaná a zaznamenáva úspech. Je to z toho dôvodu, že veľa ľudí a odborníkov stále neverí tejto stratégii. Jeden z najriešenejších faktorov v civilnom letectve je bezpečnosť a veľa odborníkov sa obáva, či prediktívna údržba, jej nástroje a softvéry budú schopné udržať sa nad prijateľnou hranicou bezpečnosti. Veľké letecké spoločnosti a výrobcovia však

investujú veľké peniaze do vývoja systémov prediktívnej údržby s vidinou veľkých časových a finančných úspor, ktoré nepochybne patria ku kľúčovým pozitívam stratégie prediktívnej údržby. Pravda je však taká, že na trhu ešte nie je žiadny iný systém alebo nástroj, ktorý by stopercentne dosahoval také výsledky ako prediktívna údržba [9].

6.1. Súčasne dostupné nástroje prediktívnej údržby

Nástroje a systémy prediktívnej údržby v súčasnosti ponúkajú niektoré väčšie letecké spoločnosti ako aj výrobcovia lietadiel. Spoločnosť Boeing ponúka Aircraft Health Management, konkurenčný Airbus má v ponuke systém Skywise. Spoločnosť Air France Industries a KLM Engineering & Maintenance ponúka svoj systém Prognos, Lufthansa Technik má zase systém Aviatar.

6.1.1. *Airplane Health Management – Boeing*

Airplane Health Management (AHM) od Boeingu monitoruje stav lietadla počas letu a v prípade poruchy odosiela údaje pozemnému personálu, ktorý sa môže pripraviť na potrebnú údržbu po pristátí. Hoci ide skôr o reaktívnu stratégiu, Boeing systém prezentuje aj ako nástroj na prediktívnu údržbu, ktorý pomáha znižovať meškania a náklady spojené s neplánovanou údržbou [10].

Systém pozostáva z troch hlavných modulov:

- Riadenie porúch v reálnom čase – diagnostikuje poruchy počas letu pomocou automatických alebo manuálnych prenosov dát
- Prispôsobiteľné oznámenia a analýzy – umožňujú identifikovať a riešiť problémy skôr, než sa prejavia vážnejšie
- Monitorovanie výkonnosti – sleduje spotrebu paliva a emisie na podporu efektívnej prevádzky [11].

AHM je dostupný cez platformu MyBoeingFleet.com a využíva ho viac ako 75 leteckých spoločností, pričom je kompatibilný s lietadlami Boeing 737NG, 737 MAX, 747-400, 747-8, 777 a 787 Dreamliner. Airplane Health Management (AHM) dnes predstavuje balík riešení na zamedzenie neplánovaným prestojom lietadiel. Obsahuje aj nástroj Insight Accelerator, ktorý od roku 2022 poskytuje pokročilú analýzu letových údajov (QAR/CPL) a umožňuje vytvárať prispôbené prediktívne upozornenia pre konkrétnu flotilu. Vylepšená verzia Insight Accelerator 2.0 pridáva podporu zoznamov minimálneho vybavenia (MEL), rozšírenú knižnicu funkcií, vylepšené prostredie a nové možnosti upozorňovania. Ďalším riešením je Boeing Maintenance Performance Toolbox, aplikácia na správu údržbových dokumentov a reportov, ktorá centralizuje informácie o celej flotile a umožňuje jednoduchý prístup k dokumentácii kedykoľvek a odkiaľkoľvek, čím zefektívňuje komunikáciu a plánovanie údržby [11], [12], [13], [14].

6.1.2. *Skywise – Airbus*

Skywise je digitálna platforma, ktorú vyvinul Airbus v spolupráci s Palantir Technologies na zber, integráciu a analýzu údajov z výroby, údržby a prevádzky lietadiel. Pôvodne slúžila ako úložisko dát, no neskôr sa vyvinula na komplexný nástroj na

podporu rozhodovania v letectve. Systém vznikol, keď Airbus v roku 2015 potreboval zrýchliť výrobu A350. Integrácia výrobných dát v reálnom čase vďaka platforme viedla k 33 % zrýchleniu dodávok [15], [16].

V roku 2022 bol predstavený Skywise Core [X], rozšírená verzia platformy, ktorá umožňuje simulácie "What-if" scenárov a prepája údaje v reálnom čase s inými systémami. Skywise Core [X] je dostupný v troch balíkoch, líšiacich sa rozšírením dátových služieb, analytických funkcií, možností spolupráce a výpočtového výkonu. Ďalším nástrojom je Skywise Fleet Performance +, ktorý využíva strojové učenie na predpovedanie systémových porúch, znižovanie neplánovaných prestojov a zvyšovanie spoľahlivosti flotily. Tento systém vznikol spoluprácou Airbusu a partnerov zo siete Digital Alliance (napr. Delta TechOps, GE Aerospace) [15], [17].

Pôvodne určená len pre Airbus flotily, dnes platformu Skywise využíva viac ako 48 000 používateľov po celom svete, vrátane leteckých spoločností, dodávateľov, MRO organizácií a regulačných úradov. K platforme je pripojených viac ako 11 900 lietadiel rôznych výrobcov a dostupných je vyše 30 aplikácií optimalizujúcich prevádzku [18], [19].

6.1.3. *Prognos – AirFrance Industries & KLM Maintenance & Engineering*

Prognos je súbor riešení prediktívnej údržby vyvinutý skupinou Air France-KLM, ktorý predpovedá poruchy ešte pred ich vznikom. Využíva rozsiahle technické znalosti a prácu s veľkými dátami, pričom kombinuje skúsenosti prevádzkovateľa a poskytovateľa MRO služieb. Prognos je rozdelený na štyri hlavné moduly: Aircraft, Engine, APU a Inventory [20].

Prognos for Aircraft zhromažďuje dáta z tisícok senzorov počas letu a na zemi a včas varuje pred možnými poruchami. Vysoká presnosť algoritmov potvrdila správnosť všetkých iniciovaných zásahov, pričom systém prispieva k výraznému zníženiu meškania a počtu pilotných hlásení [21].

Prognos for Engine ponúka trojstupňové monitorovanie motorov (krátkodobé, strednodobé a dlhodobé) a podporuje motory od výrobcov GE, CFM International a Rolls-Royce [22].

Prognos for APU, vyvinutý cez dcérsku spoločnosť EPCOR, monitoruje pomocné pohonné jednotky (APU) pomocou dát prenášaných počas prestávok na stojisku a včas predpovedá poruchy komponentov [23].

Prognos for Inventory optimalizuje zásoby náhradných dielov a riadenie dodávateľského reťazca pomocou pokročilej analýzy a simulácií, čím zvyšuje efektívnosť investícií a dostupnosť potrebných dielov [24].

6.1.4. *AVIATAR – Lufthansa Technik*

AVIATAR je otvorená digitálna platforma pre letecký priemysel, ktorá centralizuje širokú škálu aplikácií pre správu údržby, analýzu dát a prediktívnu údržbu. Vďaka cloudovej infraštruktúre spĺňajúcej najvyššie bezpečnostné štandardy umožňuje zber, analýzu a výmenu údajov v reálnom čase, pričom sa flexibilne prispôsobuje individuálnym potrebám používateľov bez závislosti od Lufthansa Technik či servisných zmlúv. AVIATAR obsahuje nástroje ako monitorovanie teploty

kabíny a využitia APU (s úsporami na údržbe a palive), systém monitorovania stavu lietadla s prepojením na manuály a reálnymi údajmi o flotile, optimalizáciu traťovej údržby podľa dostupných zdrojov a manažment MRO aktivít vrátane plánovania, zásobovania a fakturácie. Medzi ďalšie funkcie patrí prediktívna analýza stavu lietadiel, ktorá sleduje správanie komponentov, balík spoľahlivosti pre okamžité hodnotenie flotily a digitálny technický denník, ktorý nahrádza papierové záznamy a umožňuje efektívne hlásenie porúch cez mobilné zariadenia v reálnom čase [25], [26].

6.2. *Budúcnosť prediktívnej údržby*

Azda najväčším trendom a nepochybne aj budúcnosťou nielen letectva ale aj iných oblastí je umelá inteligencia. Dokazuje svoje benefity už dnes, či v bežnom živote alebo aj v komplikovaných matematických výpočtoch a predpovediach. Nakoniec aj vyššie zmienené súčasne dostupné nástroje prediktívnej údržby vo veľkom využívajú AI a ML. Pre mnohé tieto nástroje je to kľúčový prvok ich fungovania a schopnosti predpovedať budúci stav komponentu lietadla, na základe analýzy tisícok prípadov zlyhania daného komponentu a výpočtových modelov, ktoré sa snažia čo najpresnejšie predpovedať kritický moment stavu komponentu, kedy je potrebná jeho výmena.

EASA si uvedomuje rastúci význam umelej inteligencie (AI) v letectve. AI by mala pomáhať v oblastiach ako riadenie letu, predpoveď počasia, optimalizácia údržby, znižovanie uhlíkovej stopy a efektívnejšie riadenie letovej prevádzky či bezpečnosti na letiskách. Významnú úlohu zohrá aj pri integrácii dronov, autonómnych zariadení a v oblasti kybernetickej bezpečnosti. EASA už v roku 2020 vydala „Plán pre umelú inteligenciu“, aktualizovaný v roku 2023, ktorým sa snaží bezpečne začleniť AI do civilného letectva a prispôsobiť existujúce predpisy. Agentúra podporuje vývoj bezpečnostných štandardov a schvaľovanie systémov založených na strojovom učení (ML). AI aplikácie boli rozdelené do troch úrovní podľa miery autonómie: od asistencie človeku až po samostatné rozhodovanie systémov bez ľudského zásahu. Podrobnejšie sú tieto kategórie rozpísané v tabuľke 2. EASA zároveň reaguje na legislatívne zmeny v rámci pripravovaného európskeho nariadenia o AI, ktoré ovplyvní aj letectvo. Súčasný predpis sú otvorené zavádzaniu AI, no budú potrebné ich úpravy podľa špecifických oblastí využitia [27], [28], [29].

Tabuľka 5, Tri úrovne aplikácie strojového učenia, zdroj:[29]

Úroveň 1: Pomoc človeku	Úroveň 2: Spolupráca človeka a AI	Úroveň 3: Pokročilá automatizácia
Úroveň 1A: Rozšírenie pre človeka	Úroveň 2A: Spolupráca medzi človekom a systémom AI	Úroveň 3A: Systém AI prijíma rozhodnutie a vykoná činnosť, pod dohľadom človeka
Úroveň 1B: Kognitívna pomoc človeku pri rozhodovaní a výbere úkonu	Úroveň 2B: Kolaborácia medzi človekom a systémom AI	Úroveň 3B: Systém AI prijíma rozhodnutie a vykoná činnosť, bez dohľadu človeka

7. Výsledky analýzy

Na základe tejto analýzy vieme s určitosťou povedať, že prediktívna údržba je veľkým posunom v oblasti údržby lietadiel. Oproti tradičným prístupom k údržbe sú jednoznačne viditeľné pozitívne prínosy tejto stratégie údržby pre civilné letectvo. Prediktívna údržba umožňuje lepšie a efektívnejšie plánovanie údržby, minimalizuje prestoje lietadiel vplyvom neplánovanej údržby a pomáha premeniť neplánovanú údržbu na plánované vykonanie údržby. Súčasný stav prediktívnej údržby opäť dokazuje jej pozitívne prínosy pre údržbu. Na trhu sú dostupné nástroje prediktívnej údržby, ktoré využívajú nové technológie a zložité výpočty na predpovedanie stavu komponentu. Objavujú sa aj nástroje, ktoré vo veľkom využívajú umelú inteligenciu a strojové učenie a vďaka kombinácii týchto technológií a skúseností z údržby od MRO a leteckých spoločností sú schopné efektívne predpovedať a odporučiť vykonať údržbu na komponentoch a systémoch lietadiel. Väčšina týchto nástrojov navyše podporuje monitorovanie celej flotily, čiže užívateľ vie do systému nahráť všetky lietadlá vo svojej flotile a vie ich monitorovať a spravovať na jednom mieste. Tieto nástroje sú plne digitálne a vo väčšine prípadov sú dostupné na akomkoľvek digitálnom hardvéri, čo takisto prispieva k maximálnej efektívnosti, keďže užívateľ tak môže spravovať svoju flotilu kedykoľvek a odkiaľkoľvek. Napriek veľkým výhodám, boli identifikované aj bariéry, ktoré bránia úspešnému širšiemu rozvoju prediktívnej údržby v civilnom letectve. Jedná sa o problémy väčšinou spojené s limitáciami, či už získavania údajov, ale nie až v takej veľkej miere ako spracovanie a ukladanie získaných údajov. Získavanie údajov v dnešnej dobe nepredstavuje až taký veľký problém. V lietadlách sa totiž už v dnešnej dobe nachádza veľké množstvo snímačov, ktoré poskytujú užitočné údaje. Samozrejme pre potreby prediktívnej údržby by bolo vhodné implementovanie ešte väčšieho množstva snímačov za účelom získania kvalitnejších a presnejších dát. Ideálnym riešením tohto problému by bola implementácia týchto snímačov už pri výrobe systémov a komponentov, čo je viac menej len otázka dohody medzi prevádzkovateľmi, výrobcami lietadiel a OEM. Väčší problém však predstavuje spracovanie a ukladanie týchto údajov. Väčšina leteckých spoločností a MRO totiž nedisponuje potrebnou digitálnou infraštruktúrou pre vykonávanie takýchto činností. Údaje, ktoré sú potrebné pre úspešné používanie

prediktívnej údržby majú veľmi veľký objem a súčasná digitálna infraštruktúra leteckých spoločností a MRO nie je pripravená na takto rozsiahle digitálne procesy a preto predstavuje zásadnú limitáciu pri jej úspešnom zavádzaní do praxe. Poskytovatelia nástrojov pre prediktívnu údržbu sa to snažia vyriešiť cloudovým úložiskom alebo externými servermi, ktoré by boli schopné uschovať takto veľké dáta. Následné spracovanie týchto údajov riešia výpočtovými modelmi, umelou inteligenciou a strojovým učením. Vo veľkom sú takisto využívané skúsenosti z údržby ale aj nehôd a incidentov, pri ktorých hrala rolu napríklad únava materiálu. Tieto skúsenosti sú následne kombinované s výpočtovými modelmi a umelou inteligenciou pre dosiahnutie čo najpresnejšej predpovede degradácie komponentu. Aj napriek už spomínaným pokrokovým technológiám a pozitívnym prínosom prediktívnej údržby, stále veľa ľudí plne nedôveruje prediktívnej údržbe a veľa odborníkov a ľudí z radov leteckých spoločností a MRO tvrdí, že na trhu zatiaľ nie je nástroj, ktorý by naplno využíval potenciál a prinášal výhody prediktívnej údržby, ktoré boli prezentované. Aj veľa používateľov súčasných nástrojov prediktívnej údržby tvrdí to isté, nepochybujú však aj pozitívny prínos súčasných nástrojov. Civilnému letectvu to teda načrtáva aj obraz o budúcnosti prediktívnej údržby. Prediktívna údržba v budúcnosti bude nepochybne založená na umelej inteligencii a strojovom učení, keďže aktuálne nástroje ukazujú úspešnú využiteľnosť týchto technológií pre prediktívnu údržbu. V budúcnosti s vylepšenými verziami technológií umelej inteligencie, by tak využitie prediktívnej údržby mohlo priniesť očakávané výsledky a prínosy pre letectvo. Bude však potrebné myslieť aj na legislatívnu stránku veci. EASA aktívne skúma túto oblasť a vydáva odporúčania, aby bola zachovaná požadovaná miera bezpečnosti. Tento článok teda preukázal nepochybne pozitívne prínosy stratégie prediktívnej údržby pre letectvo, ale poukázal aj na bariéry pri jej zavádzaní, a že aj napriek prvým dostupným nástrojom, cesta za pravým potenciálom prediktívnej údržby bude ešte dlhá.

8. Záver

Prediktívna údržba v letectve predstavuje veľmi perspektívnu stratégiu údržby, ktorá má potenciál výrazne zmeniť a zefektívniť procesy spojené s údržbou a zvýšiť jej bezpečnosť, ako aj bezpečnosť leteckej dopravy. Na jej úspešné zavedenie je však potrebný komplexný prístup, či už z technického alebo legislatívneho hľadiska. Budúcnosť bude zohrávať kľúčovú úlohu pri preukazovaní výhod tejto stratégie údržby. Bude potrebná užšia spolupráca medzi zainteresovanými stranami. Letecké spoločnosti, MRO a OEM budú musieť spolupracovať na dohodách o implementácii dodatočných snímačov pri výrobe komponentov, pre presnejšie a efektívnejšie fungovanie prediktívnej údržby v budúcnosti. OEM bude musieť spolupracovať s leteckými spoločnosťami a MRO na dohodách o sprístupnení prevádzkových údajov, pre zabezpečenie dostatočnej transparentnosti a s tým súvisiacej efektívnejšej organizácii logistického reťazca a efektívnejšiemu využívaniu prediktívnej údržby. Rovnako bude potrebná užšia spolupráca medzi zainteresovanými stranami a regulačnými orgánmi, aby bola zabezpečená aj legislatívna stránka veci a bola zachovaná požadovaná miera bezpečnosti. Aj napriek bariéram brániacim využitiu stratégie prediktívnej údržby naplno, je prekonanie týchto bariér nevyhnutným krokom smerom k modernejším,

bezpečnejším, spoľahlivejším a efektívnejším stratégiám a postupom údržby v letectve.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

[1] "Nariadenie - 1321/2014 - SK - EUR-Lex". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1321/oj/slk>

[2] *L-8 Letová spôsobilosť lietadiel*. 2014. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://letectvo.nsat.sk/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/L-8-Letová-sposobilost-lietadiel1.pdf>

[3] *L-6 Prevádzka lietadiel, II. časť: Všeobecné letectvo - Letúny*. 2014. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: [https://letectvo.nsat.sk/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/L-6-Prevádzka-lietadiel-II.-časť-Všeobecné-letectvo-letúny1.pdf](https://letectvo.nsat.sk/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/L-6-Prevadzka-lietadiel-II.-cast-Vseobecne-letectvo-letuny1.pdf)

[4] "Continuing Airworthiness | EASA". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/regulations/continuing-airworthiness>

[5] J. Rostáš, "Technológia údržby lietadiel",

[6] C. Teubert, A. A. Pohya, a G. Gorospe, "An Analysis of Barriers Preventing the Widespread Adoption of Predictive and Prescriptive Maintenance in Aviation", NASA Ames Research Center, NASA/TM-20230000841, 2023. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230000841/downloads/Teubert_An%20Analysis%20of%20Barriers%20Preventing%20the%20Widespread%20Adoption%20of%20Predictive%20and%20Prescriptive%20Maintenance%20in%20Aviation%20\(1\).pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230000841/downloads/Teubert_An%20Analysis%20of%20Barriers%20Preventing%20the%20Widespread%20Adoption%20of%20Predictive%20and%20Prescriptive%20Maintenance%20in%20Aviation%20(1).pdf)

[7] I. Stanton, K. Munir, A. Ikram, a M. El-Bakry, "Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities", *Systems Engineering*, roč. 26, č. 2, s. 216–237, 2023, doi: 10.1002/sys.21651.

[8] "Airbus innovation for military aircraft inspection and maintenance | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2019-05-airbus-innovation-for-military-aircraft-inspection-and-maintenance>

[9] "Are Predictive Maintenance Tools Falling Short? | Aviation Week Network". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aviationweek.com/mro/emerging-technologies/are-predictive-maintenance-tools-falling-short>

[10] "Airplane Health Management (AHM) | Boeing Services". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/maintenance-engineering/maintenance-optimization/airplane-health-management-ahm>

[11] Boeing Commercial Aviation Services, "Airplane Health Management". The Boeing Company. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/services/assets/brochure/airplanehealthmanagement.pdf>

[12] "Insight Accelerator", Boeing Maintenance Engineering Services. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/maintenance-engineering/maintenance-optimization/insight-accelerator>

[13] "Insight Accelerator 2.0", Boeing Services - News. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/news/flight-data-analytics-news-2023-q1>

[14] "Maintenance Performance Toolbox", Boeing Maintenance Engineering Services. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://services.boeing.com/maintenance-engineering/maintenance-optimization/maintenance-performance-toolbox>

[15] "Skywise Core [X] | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/skywise-data-platform/skywise-core-x>

[16] "Impact | Airbus and Skywise", Palantir. Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://www.palantir.com/impact/airbus/>

[17] "S. Fleet Performance + | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/skywise-digital-solutions/skywise-fleet-performance>

[18] "Airbus launches new Skywise eXperience to further extend digital platform | Airbus". Cit: 22. apríl 2025. [Online]. Available at: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-launches-new-skywise-experience-to-further-extend-digital>

- [19] “Skywise graphic guidelines | Airbus”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://brand.airbus.com/en/guidelines/sub-identities/skywise>
- [20] “The MRO Lab - PROGNOS® - Predictive Maintenance”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/about-prognos>
- [21] “The MRO Lab - PROGNOS® for Aircraft”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-aircraft>
- [22] “The MRO Lab - Prognos® for Engine”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-engine>
- [23] “The MRO Lab - Prognos® for APU”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-apu>
- [24] “The MRO Lab - Prognos® for Inventory”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.afiklmem.com/www.taag.com/solutions/prognos-for-inventory>
- [25] “AVIATAR”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.lufthansa-technik.com/en/aviatar>
- [26] “Welcome to AVIATAR”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.aviatar.com/en>
- [27] “Artificial Intelligence and Aviation | EASA”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/artificial-intelligence-and-aviation-0>
- [28] “EASA Artificial Intelligence Concept Paper Issue 2 - Guidance for Level 1 & 2 machine-learning applications | EASA”. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-concept-paper-issue-2>
- [29] *Artificial Intelligence Roadmap: A human-centric approach to AI in aviation*. 2020. Cit: 22. april 2025. [Online]. Available at: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-AI-Roadmap-v1.0.pdf>