



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Katedra letecké dopravy

Bc. Bo Stloukal

**Využití ADS-B ke zpřesnění výpočtů emisí letadel na
letištích**

Diplomová práce

Praha 2024



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Bo Stloukal

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterské – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Využití ADS-B ke zpřesnění výpočtů emisí letadel na letištích**

Název tématu (anglicky): Using ADS-B To Improve Calculations Of Aircraft Emissions At Airports

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je shrnutí problematiky emisí letadel na letištích a jejich výpočtů na základě LTO cyklu definovaného ICAO a vlastní návrh metodiky zpřesnění LTO cyklu s využitím ADS-B zpráv z provozu.
- Shrňte problematiku emisí letadel na letištích.
- Analyzujte současné možnosti výpočtů emisí letištních pohybů.
- Navrhněte postup zpracování ADS-B zpráv od letištních pohybů pro další využití v rámci navrhované metodiky zpřesnění LTO cyklu.
- Navrhněte postup analýzy zpracovaných ADS-B zpráv, vedoucí ke zpřesnění časů jednotlivých provozních režimů LTO cyklu.
- Ověřte navrženou metodiku zpřesnění LTO cyklu s využitím reálných ADS-B zpráv z provozu.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO Doc 9924: Aeronautical Surveillance Manual, 2nd edition, 2017
ICAO Doc 9889: Airport Air Quality Manual, 2nd edition, 2020
Sun, J.: The 1090 Megahertz Riddle – A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals, 2021

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2023**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2024**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Bo Stloukal
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 15. července 2023



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Využití ADS-B ke zpřesnění výpočtů emisí letadel na letištích

Diplomová práce

Květen 2024

Bc. Bo Stloukal

Abstrakt

V současné době je často používaným nástrojem pro výpočet emisí letištních pohybů tzv. referenční emisní cyklus přistání a vzletu (LTO cyklus), který byl původně definovaný ICAO pro účely emisní certifikace letadlových proudových pohonných jednotek. Tento model popisuje idealizovaným způsobem jejich provoz na letišti a v jeho blízkém okolí, přičemž rozlišuje čtyři základní provozní režimy (volnoběh, vzlet, stoupání a přiblížení). Pro každý z těchto režimů následně udává dobu trvání, která však platí všeobecně, což ve výsledku snižuje přesnost výpočtů emisí pohybů na konkrétním letišti. Teoretická část práce shrnuje problematiku emisí letadel na letištích včetně přehledu současného stavu řešení jejich výpočtů. Praktická část práce se zabývá návrhem metodiky zpřesnění LTO cyklu s využitím ADS-B zpráv vysílaných letištními pohyby. Navrhovaná metodika je následně ověřena s využitím reálných ADS-B dat z letištního provozu.

Klíčová slova

Letiště, LTO cyklus, emise, letadla, ADS-B, ASTERIX



CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

Using ADS-B to Improve Calculations of Aircraft Emissions at Airports

Master's thesis

May 2024

Bc. Bo Stloukal

Abstract

Currently, the so-called reference emissions landing and take-off (LTO) cycle, originally defined by ICAO for the purposes of emissions certification of aircraft jet engines, is frequently used to calculate the emissions of airport movements. This model describes their operation at and near the airport in an idealized way, recognizing four basic operating modes (idle, take-off, climb, approach), for each of which a time duration value is given. This value, however, is generalized, which reduces the accuracy of the emissions calculations of the movements at the given airport. The theoretical part of this thesis sums up the topic of aircraft emissions at airports, including an overview of the current state of the art regarding their calculations. The practical part of this thesis focuses on the development of a methodology for refining the LTO cycle using ADS-B messages from airport movements. The proposed methodology is then tested using real ADS-B data from airport traffic.

Keywords

Airports, LTO cycle, emissions, aircraft, ADS-B, ASTERIX



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli veškeré potřebné podklady pro vypracování této diplomové práce. Především děkuji svému vedoucímu práce, panu doc. Ing. Bc. Jakubu Hospodkovi, Ph.D., za odborné a trpělivé vedení a za všechny cenné rady a připomínky poskytnuté v průběhu psaní této práce. Dále děkuji svým vyučujícím, kteří pro mě byli zdrojem inspirace. Děkuji také svým spolužákům, díky nimž bylo studium na fakultě o poznání příjemnější. Na závěr bych chtěl touto cestou vyjádřit hlubokou vděčnost svým rodičům za veškerou materiální i morální podporu, které se mi od nich dostávalo v průběhu mých vysokoškolských studií.



Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu.

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

V Praze dne 15. května 2024

.....*Mloukal*.....

Podpis



Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Úvod	12
1 Teoretické základy práce	13
1.1 Emise letadlových motorů.....	13
1.1.1 Produkty dokonalého spalování paliva.....	14
1.1.2 Produkty nedokonalého spalování paliva.....	17
1.2 Regulace emisí motorů letadel.....	22
1.2.1 Rámec emisní certifikace motorů letadel	22
1.2.2 Principy emisní certifikace motorů letadel	22
1.3 LTO cyklus dle ICAO	25
1.3.1 Limitace LTO cyklu	26
1.3.2 Možnosti zpřesnění LTO cyklu.....	29
1.4 Výpočty emisí letištních pohybů.....	31
1.4.1 Klasifikace metodik výpočtů emisí dle IPCC	32
1.4.2 Výpočetní přístupy dle ICAO.....	33
1.4.3 Výpočetní přístupy dle EEA	36
1.5 Nástroje pro modelování emisí letištních pohybů.....	38
1.6 Problematika směšovací výšky.....	42
1.7 Technologie ADS-B	43
1.7.1 Technologie ADS-B v kontextu CNS systémů.....	43
1.7.2 Výhody ADS-B.....	44
1.7.3 Časový vývoj implementace ADS-B v Evropě a ve světě.....	45
1.7.4 Předchozí využití ADS-B v problematice emisí letadel.....	48
1.8 Datový formát ASTERIX	51
1.8.1 Úvod do distribuce přehledových dat prostřednictvím formátu ASTERIX	51
1.8.2 Struktura dat ve formátu ASTERIX	52
2 Metodika řešení.....	55
2.1 Dekódování dat ve formátu ASTERIX.....	55
2.1.1 Prvotní načtení dat	55
2.1.2 Kontrola datových bloků	56
2.1.3 Dekódování datových bloků.....	57
2.2 Zpracování dekodovaných ADS-B zpráv	62
2.2.1 Filtrace relevantních ADS-B zpráv	62
2.2.2 Identifikace jednotlivých pohybů v datech.....	66
2.2.3 Kontrola správnosti identifikace pohybů.....	76



2.2.4	Kontrola indikátorů kvality dat	82
2.2.5	Kompletace dat pro analýzu	85
2.3	Analýza zpracovaných ADS-B zpráv	86
2.3.1	Určení typu pohybu.....	86
2.3.2	Určení dob trvání provozních režimů – přílet	89
2.3.3	Určení dob trvání provozních režimů – odlet.....	96
2.3.4	Doplňující parametry pro statistickou analýzu	103
2.4	Postup statistické analýzy výsledků	105
2.4.1	Základní úroveň analýzy.....	105
2.4.2	Pokročilá úroveň analýzy.....	107
3	Výsledky aplikace metodiky.....	111
3.1	Základní úroveň analýzy	111
3.2	Pokročilá úroveň analýzy	121
3.2.1	Provozní režim „Přiblížení“	121
3.2.2	Provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	124
3.2.3	Provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	127
3.2.4	Provozní režim „Vzlet“	130
3.2.5	Provozní režim „Stoupání“	131
4	Diskuze výsledků.....	134
5	Závěr.....	144
	Seznam použitých zdrojů.....	145
	Seznam použitých obrázků.....	153
	Seznam použitých tabulek	155
	Přílohy	i
	Příloha č. 1: Počty 24bitových adres a identifikovaných pohybů v průběhu zpracování ADS-B zpráv	i
	Příloha č. 2: Denní počty odletů a příletů zahrnutých v práci a podle statistik EUROCONTROL	ii



Seznam použitých zkratek

Zkratka	Český význam	Anglický význam
ACARS	–	Aircraft Communications, Addressing and Reporting System
ADMS	–	Atmospheric Dispersion Modelling System
ADS-B	Automatický závislý přehledový systém – vysílání	Automatic Dependent Surveillance–Broadcast
AEDT	–	Aviation Environmental Design Tool
AEM	–	Advanced Emission Model
AMDAR	Přenos meteorologických dat z letadel	Aircraft Meteorological Data Relay
AMG	–	ASTERIX Maintenance Group
AMSL	Nad mořem	Above mean sea level
ANP	–	Aircraft Noise and Performance [database]
ANSP	Poskytovatel letových navigačních služeb	Air navigation service provider
APU	Pomocná energetická jednotka	Auxiliary power unit
ARP	Vztažný bod letiště	Aerodrome reference point
A-SMGCS	–	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ASTERIX	–	All-purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange
B	Soukromá letadla (business jety)	–
BADA	–	Base of Aircraft Data
BC	Černý uhlík	Black carbon
BFFM2	–	Boeing Fuel Flow Method 2
BTEX	Benzen, toluen, etylbenzen, xylen	Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene
CAEE	–	Committee on Aircraft Engine Emissions
CAEP	Výbor pro ochranu životního prostředí v letectví	Committee on Aviation Environmental Protection
CAN	–	Committee on Aircraft Noise
CCD	Stoupání, let v cestovní hladině a klesání	Climb, cruise and descent
CNS	Komunikační, navigační a přehledové [systémy]	Communication, navigation and surveillance [systems]
CO	Oxid uhelnatý	Carbon monoxide
CO ₂	Oxid uhličitý	Carbon dioxide
DBSCAN	–	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DF	Formát sestupného spoje	Downlink format
EASA	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví	European Union Aviation Safety Agency
EC	Elementární uhlík	Elemental carbon
EEA	Evropská agentura pro životní prostředí	European Environment Agency
EMEP	Program spolupráce při monitorování a vyhodnocování	European Monitoring and Evaluation of Pollutants



	dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě	
EUROCONTROL	Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	Federální letecký úřad	Federal Aviation Administration
FDR	Zapisovač letových údajů	Flight data recorder
FRN	–	Field Reference Number
FSPEC	–	Field Specification
FX	–	Field Extension Indicator
GA	Letadla všeobecného letectví	–
GIS	Geografické informační systémy	Geographic information systems
GVA	–	Geometric Vertical Accuracy
H ₂ O	Vodní pára	Water vapor
H ₂ SO ₄	Kyselina sírová	Sulfuric acid
HC	Uhlovodíky	Hydrocarbons
HFOM	–	Horizontal Figure of Merit
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví	International Civil Aviation Organization
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů	Instrument flight rules
IPCC	Mezivládní panel pro změnu klimatu	Intergovernmental Panel on Climate Change
IQR	Mezikvartilové rozpětí	Interquartile range
ISA	Mezinárodní standardní atmosféra	International Standard Atmosphere
LASAT	–	Lagrangian Simulation of Aerosol Transport
LASPORT	–	LASAT for Airports
LKPR	Letiště Václava Havla Praha	Václav Havel Airport Prague
LTO	[Referenční emisní cyklus] přistání a vzletu	Landing and take-off [cycle]
MLAT	Multilaterace	Multilateration
MOPS	Standardy minimální provozní výkonnosti	Minimum operational performance standards
MTOM	Maximální vzletová hmotnost	Maximum take-off mass
N ₂ O	Oxid dusný	Nitrous oxide
NACp	–	Navigation Accuracy Category – position
NaN	Nečíslo	Not a Number
NB	Úzkotrupá proudová dopravní/nákladní letadla	–
NM	Síťový manažer	Network Manager
NO	Oxid dusnatý	Nitrogen monoxide
NO ₂	Oxid dusičitý	Nitrogen dioxide
NO _x	Oxidy dusíku	Nitrogen oxides
nvPM	Netěkavé pevné částice	Non-volatile particulate matter
Open-ALAQS	–	Open-Airport Local Air Quality Studies
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky	Polycyclic aromatic hydrocarbons
PDF	Hustota pravděpodobnosti	Probability density function
PM	Pevné částice	Particulate matter
PM ₁₀	Hrubé pevné částice s průměrem do 10 μm	Coarse particles with a diameter of less than 10 μm
PM _{2,5}	Jemné pevné částice s průměrem do 2,5 μm	Fine particles with a diameter of less than 2,5 μm



PNC	Počet částic	Particle number count
ppm	Částic na milion	Parts per million
PSR	Primární přehledový radar	Primary surveillance radar
QAR	Provozní zapisovač letových údajů	Quick access recorder
RE	Vyhrazené rozšiřující datové pole	Reserved Expansion Data Field
RWY	Dráha	Runway
ŘLP ČR	Řízení letového provozu České republiky	Air Navigation Services of the Czech Republic
SES	Jednotné evropské nebe	Single European Sky
SESAR	Výzkum ATM jednotného evropského nebe	Single European Sky ATM Research
SN	Kouřové číslo	Smoke number
SO ₂	Oxid siřičitý	Sulfur dioxide
SO _x	Oxidy síry	Sulfur oxides
SP	Datové pole pro speciální účely	Special Purpose Data Field
SSR	Sekundární přehledový radar	Secondary surveillance radar
T	Turbovrtulová dopravní/nákladní letadla	–
TIM	Doba trvání provozního režimu	Time-in-mode
TMA	Koncová řízená oblast	Terminal control area
UAP	–	User Application Profile
ÚCL	Úřad pro civilní letectví	Civil Aviation Authority of the Czech Republic
UF	Formát vzestupného spoje	Uplink format
UFP	Ultrajemné částice	Ultrafine particles
UHC	Nespálené uhlovodíky	Unburned hydrocarbons
UNEP	Program OSN pro životní prostředí	United Nations Environment Programme
VFOM	–	Vertical Figure of Merit
VFR	Pravidla pro let za viditelnosti	Visual flight rules
VOC	Těkavé organické látky	Volatile organic compounds
vPM	Těkavé pevné částice	Volatile particulate matter
WB	Širokotrupá proudová dopravní/nákladní letadla	–
WMO	Světová meteorologická organizace	World Meteorological Organization



Úvod

V současnosti je otázce emisí z letecké dopravy věnována stále větší pozornost. Doposud byl důraz kladen především na emise oxidu uhličitého, jenž je kvůli své roli v rámci globální změny klimatu považován za vůbec nejvýznamnější skleníkový plyn. Existují snahy o snižování těchto emisí, například prostřednictvím obchodování s emisními povolenkami, vývoje moderních a účinnějších technologií či zavádění provozních opatření zaměřených na optimalizaci spotřeby paliva. V poslední době se však stále více diskutuje také o dalších látkách, které mají v mnoha případech škodlivé účinky na místní populace, především v blízkosti letišť. Zatímco tyto látky již v současnosti podléhají regulaci v rámci procesu emisní certifikace motorů, v budoucnu je očekávána také povinnost sledování a pravidelného vykazování jejich vypouštěného množství, stejně jako tomu je v současnosti v případě oxidu uhličitého. Je tedy zřejmé, že pro tyto účely bude zapotřebí mít k dispozici účinné nástroje, jež umožní splnění všech platných požadavků v této oblasti.

Emise letadel se typicky sledují zvláště pod výškou 3 000 stop nad zemí a nad touto výškou, což vychází především z výše zmíněného regulačního rámce. Zatímco nad touto výškou se v současnosti sledují především emise oxidu uhličitého, jejichž množství je přímo úměrné spotřebě paliva, pod touto výškou jsou relevantní i ostatní látky, a to včetně škodlivin, které negativně ovlivňují kvalitu ovzduší, zejména v okolí letišť. Právě tyto látky jsou předmětem regulace v rámci procesu emisní certifikace motorů, přičemž za tímto účelem byl původně definován tzv. referenční emisní cyklus přistání a vzletu (LTO cyklus), který slouží ke zjednodušenému odhadu emisí vypuštěných v rámci příletu letadla na letiště a jeho následného odletu, jež mají vliv na místní kvalitu ovzduší. V rámci něj jsou definovány celkem čtyři provozní režimy s obecně danou dobou trvání. Tento nástroj je v současnosti kromě certifikace mnohdy také používán pro inventarizaci letištních emisí, přičemž jsou s ním spojené určité limitace, a to především z pohledu definice provozních režimů a jejich dob trvání, jež negativně ovlivňují přesnost emisních výpočtů pro tento účel.

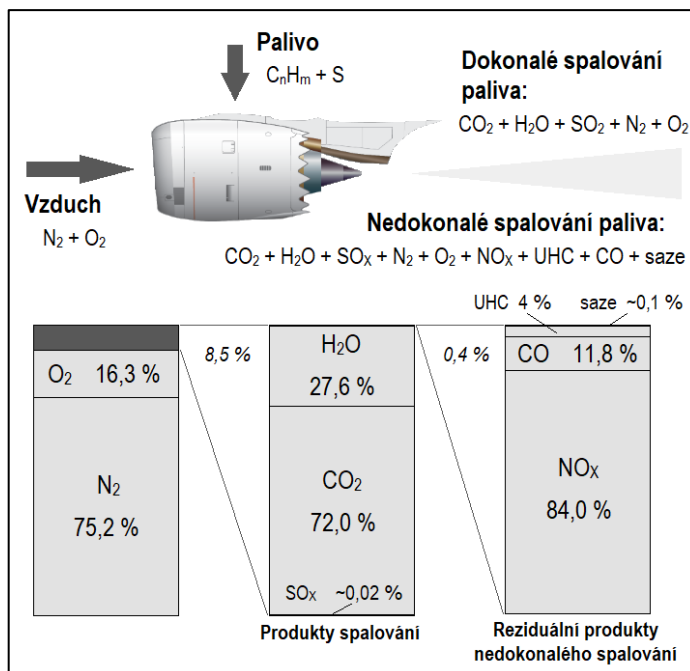
Cílem této práce je kromě představení veškeré relevantní teorie návrh postupu využití přehledových dat, konkrétně technologie ADS-B, ke zpřesnění výpočtů emisí letadel na letištích, a to skrze určení přesnějších dob trvání jednotlivých provozních režimů LTO cyklu. Přehledová data umožňují sledovat jednotlivé letištní pohyby, přičemž záměrem je v rámci nich identifikovat jednotlivé provozní režimy LTO cyklu, vyhodnotit jejich dobu trvání a následně agregovat tyto hodnoty do souhrnných statistik, jež budou prezentovány. V současnosti je ADS-B považováno za jeden z klíčových zdrojů přehledových dat; otázce jejich propojení s emisními výpočty je dnes již v rámci vědeckého výzkumu věnována pozornost, přičemž v budoucnu lze očekávat další zájem o tuto problematiku.

1 Teoretické základy práce

V této kapitole bude postupně představena veškerá teorie relevantní k této práci. Nejprve budou ve stručnosti představeny nejdůležitější emise letadlových motorů v kontextu letištního prostředí, následně bude představen rámec jejich regulace, a to včetně tzv. LTO cyklu definovaného ICAO. Dále bude věnován prostor představení problematiky sledování emisí, respektive hlavních výpočetních přístupů a dostupných softwarových modelovacích nástrojů, a uvedení problematiky směšovací výšky. Poslední část kapitoly bude věnována relevantní teorii týkající se technologie ADS-B, a to z hlediska jejího významu pro účely této práce.

1.1 Emise letadlových motorů

Letecký provoz je zdrojem emisí celé řady látek, jimž je v současné době věnována značná pozornost. Některé tyto látky jsou relevantní v kontextu provozu letiště, neboť mohou ovlivnit místní kvalitu ovzduší, a tedy zdraví místních obyvatel. Mnoho těchto látek má rovněž v různé míře dopad na životní prostředí. Naprostá většina emisí spojených s leteckým provozem vzniká během spalování leteckého paliva v motorech. Spalování paliva je exotermický chemický děj tvořený řadou reakcí zahrnujících palivo. [1] Přehled těchto emisí z pohledu jejich vzniku a zastoupení ve výtokových plynech (respektive proudu spalin) je na obr. 1.



Obrázek 1: Emise letadlových motorů (překresleno z [2])

V současnosti se v letectví používají paliva na bázi uhlovodíků, a to kvůli jejich vysoké energetické hustotě. Tato paliva kromě uhlíku a vodíku rovněž často obsahují síru v rámci různých příměsí. Při spalování těchto paliv za přítomnosti kyslíku vzniká řada látek; některé



z nich patří mezi produkty dokonalého spalování, jejichž množství je přímo závislé na množství spotřebovaného paliva, zatímco některé jsou produkty nedokonalého spalování, přičemž jejich množství závisí na podmínkách spalování. [3] V následujících oddílech budou tyto látky postupně představeny, a to s důrazem na popis jejich vzniku i významu z hlediska dopadů na životní prostředí či lidské zdraví, mj. v kontextu letištního provozu.

1.1.1 Produkty dokonalého spalování paliva

Mezi produkty dokonalého spalování uhlíkatých paliv v letadlových motorech patří oxid uhličitý, vodní pára; v malé míře také oxidy síry, jež vznikají v důsledku přítomnosti látek na bázi síry v leteckém palivu. Těmto látkám se věnuje tento oddíl.

Oxid uhličitý

Oxid uhličitý (CO_2) je jedním z primárních produktů spalování leteckého paliva. Podle jedné studie představuje zhruba 70 % všech výsledných produktů spalování paliva, přičemž jeho množství je přímo úměrné množství spotřebovaného paliva. [3] [4] Hodnota emisního indexu CO_2 je podle Tait et al. [3] zhruba 3 149 g/kilogram paliva, přičemž toto číslo je průměrnou hodnotou vycházející z různých zdrojů. Metodika od Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO, z angl. *International Civil Aviation Organization*) pracuje s hodnotou 3 160 g/kg [5]. V případě vyššího poměru vodíku vůči uhlíku v palivu je emisní index CO_2 nižší, byť pouze nepatrně [6]. Stejně tak může jeho hodnota mírně poklesnout při nižším nastavení tahu, kdy je spalování paliva méně účinné, přičemž naopak roste množství oxidu uhelnatého či různých uhlovodíků [4]. Podle studie od Jakovljeviće et al. [7] může v důsledku degradace motorů letadla či aerodynamických vlastností letadlové konstrukce narůst spotřeba paliva až o 10 %, což má vliv i na emise CO_2 . Letectví je každoročně zodpovědné za zhruba 2 % z celkových antropogenních emisí CO_2 , přičemž v rámci odvětví dopravy má podíl kolem 12 % [8]. Například v roce 2018 byla globální osobní a nákladní letecká doprava dohromady zodpovědná za zhruba 1,04 miliardy tun emisí CO_2 , což odpovídalo zhruba 2,5 % veškerých emisí CO_2 za tento rok [9]. Odhadem zhruba 0,5 % všech antropogenních emisí CO_2 z období mezi lety 1751 až 2006 bylo spojeno s letectvím [10]. Jak bude zmíněno v podkapitole 1.2, emise CO_2 jsou v současnosti regulovány certifikačními standardy ICAO, přičemž princip jejich regulace se liší oproti jiným regulovaným emisím.

Oxid uhličitý je považován za hlavní skleníkový plyn s primární rolí v globálním oteplování, přičemž jeho hlavním antropogenním zdrojem je spalování fosilních paliv, kam spadají i paliva v současnosti používaná v letectví [4] [11]. Přítomnost CO_2 v atmosféře ovlivňuje její radiační bilanci. V souvislosti s tímto se hovoří o tzv. radiačním působení, jež posiluje jinak přirozený skleníkový efekt, který v zemské atmosféře probíhá již po miliardy let. [6] Důvodem je, že



molekula CO_2 má příznivé absorpční vlastnosti v pásmu infračervených vlnových délek (kolem $15 \mu\text{m}$) [10]. Díky tomu dobře absorbuje infračervené záření vyzářené zemským povrchem, čímž dochází k ohřevu stratosféry. K jeho eliminaci dochází zpravidla prostřednictvím výměny s biosférou či oceány v rámci globálního koloběhu uhlíku. Proto je například odlesňování v tomto ohledu závažným problémem. [10] [11] [12] Emise CO_2 mají díky své stabilitě v atmosféře životnost více než 100 let, čímž dochází k jejich postupné kumulaci. Z toho důvodu by růst jeho koncentrací v atmosféře pokračoval ještě dlouho poté, co by se podařilo zastavit další růst jeho ročních emisí. [6] Emise CO_2 přispívají ke globální klimatické změně bez ohledu na výšku, ve které jsou vypouštěné do ovzduší; z toho důvodu je podstatné řešit tyto emise i na letištích [1]. Nutno však dodat, že CO_2 není znečišťující látkou, tudíž není podstatné jej řešit z hlediska kvality ovzduší. Z pohledu celkového dopadu letectví na klima jsou emise CO_2 zodpovědné za zhruba třetinu tohoto vlivu [3].

Vodní pára

Kromě CO_2 je dalším významným emisním produktem spalování uhlíkatých leteckých paliv vodní pára (H_2O), jejíž emise představují necelých 30 % všech produktů spalování paliva. Množství vzniklých emisí H_2O je přímo úměrné množství spotřebovaného paliva; emisní index H_2O tedy během letu zůstává víceméně konstantní. V literatuře se udává jeho hodnota kolem $1\,230 \pm 20 \text{ g/kg}$ paliva, přičemž se může měnit v závislosti na poměru uhlíku vůči vodíku v palivu. [4] [10] [11] Stejně jako CO_2 je H_2O skleníkovým plynem, tudíž se skrze radiační působení rovněž podílí na přirozeném skleníkovém efektu, a tedy ohřevu zemského povrchu, byť méně významně než předchozí jmenovaný plyn. Množství vodní páry v atmosféře je primárně řízeno teplotou, přičemž kvůli rostoucím globálním průměrným teplotám se postupně zvyšuje. Naprostá většina emisí H_2O je dnes uvolňovaná podzvukovými letadly v troposféře, v níž typicky setrvávají po dobu 1-2 týdnů, než v důsledku vodního cyklu mizí ve formě srážek. Obecně tedy zůstávají koncentrované spíše v blízkosti letových tratí, což může způsobovat drobnější rozdíly v lokálním radiačním působení atmosféry. [6] [10] [11] Stejně jako v případě CO_2 se ani H_2O neřeší v kontextu znečištění ovzduší, neboť její přítomnost v ovzduší nemá žádné negativní účinky na lidské zdraví [4].

Emise H_2O jsou podstatné především z pohledu tvorby ledových oblaků, známých jako kondenzační stopy (*contrails*), za letadly letícími v cestovní hladině, kde panují velmi nízké teploty (typicky pod $-40 \text{ }^\circ\text{C}$). Vodní pára obsažená v proudu spalin se rychle ochlazuje, načež kondenzuje a posléze zamrzá na přítomných sazích, částicích kyseliny sírové (H_2SO_4) či sulfátech. Takto vzniklé ledové krystalky na sebe následně „nabalují“ další vodní páru z okolní atmosféry (jejíž koncentrace se tak lokálně snižuje), čímž vzniká kondenzační stopa. Její další vývoj, například z pohledu životnosti, závisí na místních atmosférických podmínkách. [3] [6]



[11] Kondenzační stopy, respektive oblaky typu cirrus vzniklé v horní troposféře, mají skrze radiační působení určitý, byť méně významný podíl na ohřevu zemského povrchu [4]. Díky svým termodynamickým vlastnostem se emise H_2O rovněž účastní většiny procesů spojených s tvorbou aerosolů v proudu spalin za motorem; představují tedy jeden z klíčových aerosolových prekurzorů. Například spolu s H_2SO_4 kondenzují na pevných částicích, zpravidla sazí, čímž vznikají sulfátové aerosoly. [6] [10]

Oxidy síry

Letecké palivo kromě vodíku a uhlíku obsahuje rovněž malé množství síry. Během jeho spalování tak dochází i ke vzniku emisí oxidů síry (SO_x). Mezi látky přítomné v palivu, které obsahují síru, patří například různé sulfidy, disulfidy, benzothiofen či merkaptany, které se pro své korozivní vlastnosti z paliva odstraňují. Množství těchto látek v palivu závisí na lokalitě, kde byla vytěžena ropa použitá při výrobě paliva. [1] [13] Naprostá většina emisí SO_x je tvořena oxidem siřičitým (SO_2). Řádově několik procent obsahu síry v palivu však skončí jako H_2SO_4 , která se podílí na tvorbě sulfátových aerosolů; dále například karbonylsulfid, sirouhlík či dimethylsulfid. [4] V současnosti bývá u leteckých paliv požadováno, aby obsah síry v palivu nepřekročil 0,3 %; reálně se tento pohybuje kolem 0,1 % (dle různých studií zhruba v rozmezí 200 až 1 200 ppm). [1] [6] Ponechání určitého obsahu síry v palivu je výhodné z pohledu zachování jeho mazivosti, která je žádoucí kvůli nutnosti promazávat pohyblivé části palivového systému (např. v pumpách) [13]. Na obsahu síry v palivu závisí množství vzniklých emisí SO_x , respektive tedy jejich emisní index. Například při hodnotě 400 ppm je jeho hodnota přibližně 0,8 g/kg paliva, při hodnotě 1 150 ppm se jedná o zhruba 2,5 g/kg paliva a u paliv s nízkým obsahem síry (kolem 10 ppm) se uvádí hodnota až 0,01 g/kg paliva [4] [6]. Pro účely emisních výpočtů lze pracovat se zaokrouhlenou hodnotou 1 g/kg paliva [10]. Jak je tedy vidět, množství těchto emisí ve srovnání s ostatními látkami je minimální.

Oxid siřičitý je zdraví škodlivý a jeho zvýšené koncentrace v ovzduší mohou představovat zvýšené riziko zejména pro osoby s astmatem či chronickým onemocněním plic. S jeho zvýšenými koncentracemi je spojená vyšší úmrtnost, například v důsledku vzniklých kardiovaskulárních potíží. V souvislosti s kvalitou ovzduší se tedy jedná o jeden z klíčových sledovaných polutantů. [1] [4] [11] Vzniklá H_2SO_4 se spolu s různými organickými sloučeninami podílí na tvorbě těkavých pevných částic. Buďto H_2SO_4 kondenzuje spolu s vodní párou, čímž vznikají sulfátové aerosoly (nové částice), nebo dochází k její kondenzaci na sazí (zvětšení existujících částic). [1] [3] [11] Zatímco sulfátové aerosoly odrážejí část příchozího slunečního záření zpět do vesmíru, tudíž mají ochlazující efekt a záporné radiační působení, aerosoly na bázi sazí mají kladné radiační působení, které má naopak oteplovací efekt. Nicméně je nutno doplnit, že ve srovnání s jinými emisemi jsou tyto účinky méně významné. [3] [6] [10] Aerosoly



mohou mít dále vliv na snižování koncentrací oxidů dusíku, čímž dochází k omezení tvorby ozonu, která je jejich přítomností v atmosféře podporována. Na povrchích aerosolů se mohou rovněž odehrávat různé další chemické reakce s vlivem na okolní atmosféru. [6] [10]

1.1.2 Produkty nedokonalého spalování paliva

Dokonalé spalování leteckého paliva, s nímž jsou spojeny pouze emise popsané výše, je čistě teoretickou záležitostí. Ve skutečnosti často v důsledku různých okolností probíhá neúčinně, tedy nedokonale. V důsledku toho vzniká celá řada dalších látek, kterým se věnuje tento oddíl.

Oxid uhelnatý

Emise oxidu uhelnatého (CO) mají původ v nedokonalém spalování paliva v motoru letadla. Tyto emise tedy převládají při nižším nastavení tahu, kdy ve spalovací komoře panuje nižší teplota i tlak, přičemž spalování paliva je méně účinné (respektive dílčí procesy kolem tohoto probíhají méně účinně). Roli zde hraje také promíchávání paliva se vzduchem, konkrétní typ motoru či okolní atmosférické podmínky. Nejvíce emisí CO tedy bývá vypouštěno během pojíždění letadla na zemi, kdy je nastavení tahu nejnižší. Zatímco při volnoběhu představují tyto emise zhruba 1 % veškerých emisí na bázi uhlíku, za letu v cestovní hladině je to až desetkrát méně. Emisní index CO je tedy nepřímo úměrný nastavení tahu. [3] [4] [6] Emise CO jsou regulované ICAO; aby tedy konkrétní motor získal emisní způsobilost, musí jeho výrobce prokázat splnění všech platných požadavků, které se týkají i CO. [6] [10] Emise CO mají spíše minimální podíl na celkových emisích z motorů; například v porovnání s emisemi CO₂ je jejich množství až o tři řády menší [10] [11]. Nicméně, i tak jsou podstatné, jelikož CO je pro člověka vysoce toxický, neboť se velmi snadno váže na hemoglobin, čímž výrazně snižuje schopnost krve transportovat kyslík, což může mít pro organismus fatální důsledky. Proto patří CO mezi klíčové sledované polutanty, přičemž jeho koncentrace v ovzduší bývají stejně jako u jiných škodlivin monitorovány. Samotné emise CO z letectví však nejsou významné a není s nimi tedy spojené zásadní riziko. Nicméně, v kontextu problematiky letištních emisí jsou i tak relevantní, neboť řada studií prokázala určitou míru jejich podílu na místních koncentracích CO v ovzduší. [4] [11]

Životnost emisí CO v atmosféře bývá zpravidla v rozmezí jednoho až tří měsíců. Jeho účinky v atmosféře jsou spíše méně významné; například se v omezené míře za přítomnosti oxidů dusíku podílí na produkci troposférického ozonu. [4] [6] Jak již bylo řečeno, emise CO jsou důsledkem nedokonalého (dle literatury někdy také nekompletního) spalování paliva. Letecké palivo bývá tvořeno stovkami různých uhlovodíků (typicky s počtem atomů uhlíku mezi 10-14), patřících typicky mezi tzv. parafíny. Toto palivo bývá spalováno za vysokých teplot (obecně nad 900 °C), přičemž dochází k sérii chemických reakcí, kdy v konečném důsledku vzniká



CO₂. V rámci těchto reakcí vzniká a posléze je spotřebován (v případě dokonalého spalování paliva kompletně) CO. Účinnost spalování zvyšuje například vyšší tlak, jenž ovlivňuje reakční kinetiku, urychluje oxidaci uhlovodíkových paliv, a tedy obecně i míru tvorby CO₂ z CO. [1] Během posledních desetiletí v souvislosti s technologickým pokrokem došlo k poklesu úrovně emisí CO; zásadní byl v tomto ohledu vývoj moderních motorů s vysokým obtokovým poměrem. Tyto motory mají vyšší palivovou účinnost, tlakové poměry i teplotu ve spalovací komoře, což pomáhá omezovat emise CO. [4] [6] K úplné eliminaci emisí CO či jiných látek pak může vést například využití vodíku jakožto alternativního paliva [10].

Oxidy dusíku

Oxidy dusíku se souhrnně označují jako NO_x. Do této skupiny se řadí především oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂), ačkoli v kontextu emisí z letadel lze zmínit také například oxid dusný (N₂O). V proudu spalin se mohou vyskytovat i další látky na bázi dusíku, například kyselina dusitá, kyselina dusičná či různé organické látky vzniklé v důsledku reakcí mezi uhlovodíky a NO_x. [4] [3] [11] Existuje několik hlavních cest, jak NO_x vznikají, přičemž většina dusíku pro vznik těchto emisí pochází z okolního vzduchu, který je vsáván do motoru. Tato problematika je poměrně obsáhlá, a proto zde nebude dále rozváděna; dobrým zdrojem pro její podrobnější studium je například [1]. V průběhu již zmíněného technologického pokroku, při němž se zvýšila palivová účinnost motorů a vzrostl výkon v důsledku vyšších tlakových poměrů a vyšších teplot ve spalovací komoře, sice došlo k redukci emisí některých látek (například CO₂ či CO), ovšem v případě NO_x byl efekt opačný. [1] [6] S rostoucí teplotou a tlakem ve spalovací komoře se totiž zintenzivňují různé termické reakce, při nichž vznikají NO_x. Emisní index NO_x, který se typicky uvádí jako ekvivalent NO₂ (NO se hmotnostně přepočítává na NO₂), tedy roste s nastavením tahu. [3] [4] [11] Pro člověka je nebezpečný zejména NO₂, jenž může způsobovat zánět dýchacích cest, ovlivnit funkci plic a u citlivějších jedinců zesilovat alergické reakce. Dále bývá spojený s kardiovaskulárními potížemi a při vysokých koncentracích i se zvýšenou úmrtností. [4] [10] [11] Kromě toho NO_x způsobují kyselé deště nebo poškozují tkáně vegetace, čímž snižují tempo jejich růstu [11]. Proto jsou emise NO_x regulované ICAO, přičemž v čase se příslušné certifikační požadavky postupně zpřísňují [4] [6].

Vysoké koncentrace NO_x (zejména NO₂) v okolí letišť bývají většinou důsledkem společné aktivity více zdrojů; kromě samotných letadel tedy např. silničního provozu v blízkosti letiště či provozu pozemních vozidel na pohybové ploše letiště. Až 20 % emisí NO_x na letištích pochází z tzv. pomocných energetických jednotek (APU, z angl. *auxiliary power unit*), které oproti motorům letadel nepodléhají emisní certifikaci. [4] Řada studií prokázala zvýšené koncentrace NO₂ v okolí letišť, a to až ve vzdálenosti 12 km [14]. Kromě dopadů na místní kvalitu ovzduší



mají emise NO_x dva zásadní vlivy na atmosféru – podporují vznik troposférického ozonu a destrukci metanu. V obou případech se jedná o skleníkové plyny, tudíž zde lze hovořit o nepřímém radiačním působení emisí NO_x (větší pozitivní v případě tvorby ozonu, menší negativní v případě destrukce metanu, který je zhruba 25krát silnější skleníkový plyn než CO_2). Samotné NO_x nejsou radiačně aktivní, ale díky své chemické nestabilitě se po rozptýlení v atmosféře podílejí na řadě reakcí, především fotochemických. [3] [6] [10] [11] Na celkovém radiačním působení letectví mají emise NO_x podíl zhruba 15 % [8]. Otázka snižování emisí NO_x je oproti ostatním regulovaným emisím složitější. Často je totiž redukce těchto emisí dosažená na úkor nárůstu jiných emisí; například CO_2 , CO či uhlovodíků. Klíčem je současné zvyšování palivové účinnosti (tedy redukce emisí CO_2) doplněné technologickým pokrokem v oblasti vývoje spalovacích komor. [6] [10] [11] Určitou úsporu emisí NO_x může rovněž přinést provozní optimalizace, k čemuž je zapotřebí adekvátní CNS/ATM infrastruktura a postupy [6]. Potenciál pro redukci emisí NO_x nabízí rovněž využití alternativních paliv v letectví [15].

Uhlovodíky

Mezi další produkty nedokonalého spalování paliva v motorech letadel patří uhlovodíky (HC). Tento pojem zahrnuje široké spektrum různých látek; od lehkých až po různé těžké molekuly, s alifatickými i aromatickými strukturami. Mnoho z nich jsou tzv. těkavé organické látky (VOC, z angl. *volatile organic compounds*), jež mnohdy vznikají jako vedlejší produkty v důsledku nedokonalého spalování paliva. Část emisí HC dále tvoří tzv. nespálené uhlovodíky (UHC, z angl. *unburned hydrocarbons*), přičemž se jedná o původní molekuly paliva, které unikly oxidaci ve spalovací komoře. [1] [4] Složení či množství HC závisí na faktorech jako je typ, stáří či stupeň využití motoru, historie údržby motoru či složení použitého paliva (například z hlediska obsahu síry či dusíku) [4] [16]. Emise HC obecně vznikají v důsledku nedokonalého, respektive nekompletního spalování paliva, k čemuž dochází především při nízkém nastavení tahu, kdy je teplota spalování nižší [1] [4] [6]. Podobně jako u CO tedy emisní index HC obecně klesá s rostoucím nastavením tahu, respektive rostoucí účinností spalování paliva [3] [11]. K obecnému poklesu emisních indexů HC došlo během posledních několika desetiletí v důsledku pokroku ve vývoji motorů, respektive technologie spalování paliva. Emise HC jsou regulované, přičemž ICAO nerozlišuje jednotlivé látky, které patří pod tuto skupinu. [1] [4] [6]

Mezi emise HC z letadel patří různé alkany (např. ethan, propan či v minimálním množství methan), alkeny (např. ethen, propen, buten, isopren či isobuten) či alkyny (ethyn atd.). Některé těžké alkany (s vyšším počtem atomů uhlíku) se vyskytují pouze v emisích z letadel, nikoli automobilů, což je patrně dáno rozdílným složením použitých paliv. [6] [4] [11] [16] Další velice významnou skupinou látek jsou tzv. karbonyly, kam patří především aldehydy (formaldehyd, acetaldehyd, akrolein, propionaldehyd atd.) a ketony (převážně aceton) [1] [6]



[14]. Dále mezi emise HC patří různé aromatické sloučeniny. Sem patří kromě jiného tzv. BTEX (benzen, toluen, etylbenzen a xylen), dále například fenol či styren. [4] [16] Důležitou skupinou látek jsou tzv. polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH, z angl. *polycyclic aromatic hydrocarbons*), mezi něž patří například pyren, benzo[a]pyren, naftalen, fenanthren, fluoranthen, acenaften či chrysen [1] [4] [10] [14] [17]. V malém množství a při nižším nastavení tahu mohou být součástí emisí HC také různé organické látky na bázi síry (např. karbonylsulfid) či dusíku (např. methylnitrát) [4].

V troposféře se mohou HC v malé míře podílet na vzniku ozonu, respektive fotochemického smogu. Kromě toho se některé z těchto látek (převážně těžší uhlovodíky) mohou v rámci proudu spalin kondenzací na pevných částicích podílet na tvorbě různých aerosolů, především těch těkavých. [1] [4] [6] [11] Jak již bylo řečeno, emise HC jsou nejvýznamnější při nízkém nastavení tahu, nejvíce těchto emisí je tedy vypouštěno na letištích, kde byly řadou studií skutečně prokázány mírně zvýšené koncentrace těchto látek. Emise HC tedy mohou ovlivňovat letištní zaměstnance (především personál na odbavovací ploše), ale i místní obyvatele žijící v blízkosti letiště. Jedna studie například našla korelaci mezi počtem pohybů na letišti a koncentrací lehkých aldehydů a ketonů v technické místnosti letištní řídicí věže. [4] [14] [16] [17] Ačkoli je podle obr. 1 jejich zastoupení v proudu spalin velmi malé, i tak je emisím HC nutné věnovat pozornost kvůli jejich negativním účinkům na lidské zdraví. Řada těchto látek (např. acetaldehyd, formaldehyd, BTEX či PAH) má totiž toxické, případně i potvrzené či předpokládané karcinogenní účinky na lidský organismus. [1] [4] [10] [11]

Pevné částice

Poslední významnou skupinou emisí, která je spojená s leteckým provozem, jsou tzv. pevné částice (PM, z angl. *particulate matter*). Tento pojem reprezentuje celé spektrum látek, které vznikají přímo v důsledku spalování paliva, či nepřímo v důsledku různých chemických procesů probíhajících v proudu spalin. Tyto látky mají různorodé chemické složení i fyzikální vlastnosti. [4] [10] [11] Hlavní rozdělení PM je na netěkavé PM (nvPM, z angl. *non-volatile particulate matter*) a těkavé PM (vPM, z angl. *volatile particulate matter*) [3] [4] [18]. Částice z motorů mohou dosahovat rozměrů od tisícín po jednotky μm , proto se PM typicky dělí podle rozměru na hrubé PM s průměrem do $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) a jemné PM s průměrem do $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) [11] [17]. Další významnou skupinou jsou ultrajemné PM (UFP, z angl. *ultrafine particles*), které mají průměr do $0,1 \mu\text{m}$ [14] [17] [18]. V kontextu emisí z letadlových motorů jsou relevantní zejména jemnější částice ($\text{PM}_{2,5}$ a UFP). Jejich zvýšené koncentrace v ovzduší, respektive vyšší počet částic (PNC, z angl. *particle number count*) na letištích i v jejich okolí prokázala řada studií; některé z nich našly přímou úměru mezi PNC a počtem letištních pohybů. Obecně však nebývají tyto koncentrace vyšší než v jiných částech města či například



u významných komunikací. [4] [11] [14] [17] Emise PM byly dlouho regulované ICAO pouze z pohledu jejich viditelnosti (prostřednictvím tzv. kouřového čísla SN; z angl. *smoke number*), nicméně od ledna 2023 platí nové standardy, které regulují nvPM [3] [18].

Mezi nvPM se typicky řadí saze, jež jsou na bázi uhlíku a vznikají v důsledku nedokonalého spalování paliva. Pro saze se někdy také používají anglická označení *black carbon* (BC; černý uhlík) či *elemental carbon* (EC; elementární uhlík). Tyto rozdíly v terminologii patrně plynou z různých metod jejich měření; pro účely této práce stačí souhrnný pojem saze. Saze typicky dosahují aerodynamického průměru v řádu desítek nanometrů; patří tedy mezi UFP. Dále mezi nvPM patří i různé kovové částice, které mohou být například důsledkem nečistot v palivu či opotřebování mechanických částí motoru. Podle řady studií je emisní index sazí přímo úměrný nastavení tahu, přičemž s výškou klesá. [1] [4] [6] [8] [11] [18] Zatímco nvPM vznikají okamžitě v rámci spalování paliva a představují veškeré emise PM na výstupu ze spalovací komory, vPM vznikají až později; typicky od 15 m za motorem dále [3] [4]. Jakmile proud spalin opustí motor, začíná se postupně rozpínat a ochlazovat, mj. v důsledku směšování s okolním vzduchem. Tím dochází ke kondenzaci některých produktů spalování; nejčastěji látek na bázi síry (zejména H_2SO_4) či různých VOC. [1] [3] [4] [6] [18] Vodní pára spolu s H_2SO_4 může kondenzovat společně, čímž vznikají zárodky nových částic, na nichž dále kondenzuje vodní pára či jiné aerosolové prekurzory. Kromě toho mohou různé látky kondenzovat i na existujících částicích, typicky sazích. [1] [4] [6] [10] [14] Měření či kvantifikace vPM je o poznání složitější než u nvPM; typicky se tedy nvPM i vPM měří společně, bez rozlišení [4] [18].

V atmosféře mají vypuštěné PM přímé účinky v podobě radiačního působení. Saze mají pozitivní radiační působení, a tedy tendenci ohřívat atmosféru; sulfáty mají naopak negativní radiační působení, tudíž mají ochlazovací účinek. Nicméně účinky PM z letadel jsou v tomto ohledu méně významné; např. saze z letadel tvoří pouze několikaprocentní podíl z veškerých sazí v atmosféře. Kromě toho PM v atmosféře podporují tvorbu kondenzačních stop, jež mají rovněž pozitivní radiační působení; i touto cestou tak PM přispívají k ohřevu atmosféry. [3] [4] [6] [10] [11] V kontextu problematiky kvality ovzduší na letištích i v jejich okolí jsou PM jedním z hlavních předmětů zájmu. Většina emisí PM z letadel jsou $PM_{2,5}$ a UFP, přičemž právě jemné částice mají závažnější účinky na lidské zdraví. Proto se na ně velmi často zaměřuje legislativní regulace. [1] [10] [11] [18] Se zvýšenými koncentracemi PM v ovzduší je spojená zvýšená úmrtnost; odhaduje se, že emise $PM_{2,5}$ z letecké dopravy jsou každý rok celosvětově zodpovědné za zhruba 14 000 předčasných úmrtí [4]. Jemné částice mohou díky svému menšímu rozměru pronikat hlouběji do plic; do plicních tkání se tak mohou dostávat i různé toxické či karcinogenní látky (např. různé kovy či PAH). Zároveň zde mohou tyto částice narušovat důležité procesy kolem výměny plynů. [1] [4] [10] [17] Jemné a ultrajemné částice



mohou zhoršovat existující srdeční či dýchací obtíže (například astma). Podle řady studií mohou vyvolávat zánětlivé reakce, což může např. právě pro astmatiky představovat problém. [10] [11] [14] [17]

1.2 Regulace emisí motorů letadel

Jak již bylo naznačeno v první podkapitole, emise některých látek mají negativní účinky na životní prostředí či lidské zdraví. Z těchto důvodů existuje regulační rámec pro emisní certifikaci letadlových motorů, za nějž je zodpovědná organizace ICAO. Předmětem této podkapitoly je popis principů regulace emisí motorů letadel.

1.2.1 Rámec emisní certifikace motorů letadel

Za tvorbu globálních emisních standardů v letectví je zodpovědná ICAO. Činí tak skrze svůj Výbor pro ochranu životního prostředí v letectví (CAEP, z angl. *Committee on Aviation Environmental Protection*), který je společným nástupcem výborů CAEE (*Committee on Aircraft Engine Emissions*) a CAN (*Committee on Aircraft Noise*). [1] [19] Tento technický výbor podřízený Radě ICAO byl založen v roce 1983, přičemž jeho hlavní úlohou je odborná podpora Rady v tvorbě nových a úpravě stávajících standardů a doporučených postupů týkajících se především problematiky hluku, škodlivých emisí v okolí letišť a globálních emisí CO₂. Tyto standardy mají význam pro všechny členské státy ICAO. [19] Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA, z angl. *European Union Aviation Safety Agency*) aktivně spolupracuje s Evropskou komisí v otázce jejich začlenění do legislativy EU. Ustanovení těchto standardů jsou například obsažena v certifikačních specifikacích CS-34 či CS-36 nebo v nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139. [20] Ke květnu roku 2023 bylo součástí CAEP celkem 31 členských a 7 pozorovatelských států a 15 organizací (např. IATA, ACI, ICCAIA či WMO). Na aktivitách CAEP se podílí více než 1 200 odborníků z celého světa, kteří jsou rozděleni do celkem 11 odborných skupin věnujících se například záležitostem kolem hluku, emisí, paliv či ekonomických analýz. Schůze CAEP probíhají jednou za tři roky. S CAEP, respektive jeho předchůdcem je spojen vznik druhého svazku Annexu 16 v roce 1981, který se věnuje emisní certifikaci motorů letadel. V České republice platí jeho překlad v podobě předpisu L16/II – Ochrana životního prostředí – Emise letadlových motorů. [19] [21]

1.2.2 Principy emisní certifikace motorů letadel

Emisní certifikační standardy definované ICAO v Annexu 16/II, respektive předpisu L16/II, se v případě plyných emisí týkají proudových motorů s tahem větším než 26,7 kilonewtonů (kN) [22]. Ostatní motory, tedy motory pístové, turbovrtulové, turbohřídelové či proudové s tahem menším než 26,7 kN, nejsou těmito standardy pokryty. V praxi to znamená, že plyné emise

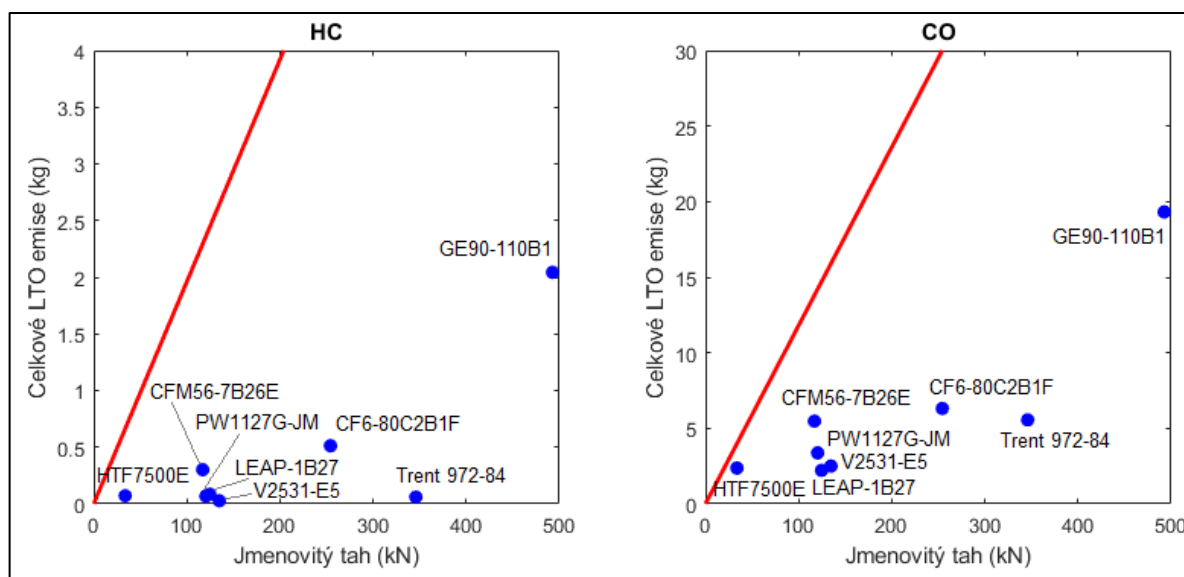


mj. vrtulníků, letounů všeobecného letectví či malých soukromých proudových letounů nejsou regulované. Nicméně, tato letadla nejsou významným zdrojem emisí, tudíž by omezování jejich emisí skrze různá technologická řešení nebylo nákladově efektivní. [1] Stejně tak však nejsou zohledněny ani emise z APU, přestože se v rámci letiště jedná o významný zdroj emisí některých látek (především NO_x či VOC). Standardy ICAO cílí na omezení emisí, které vznikají na letištích a v jejich okolí. Pro tyto účely definuje tzv. referenční emisní cyklus přistání a vzletu (LTO cyklus). Tento cyklus slouží k reprezentaci jednoho letištního pohybu a blíže bude popsán v následující podkapitole. Veškerá měření související s emisní certifikací probíhají v kontrolovaném laboratorním prostředí, přičemž naměřené hodnoty jsou vztažené na referenční podmínky dle Mezinárodní standardní atmosféry (ISA, z angl. *International Standard Atmosphere*). Podle ustanovení předpisu L16/II je za udělení osvědčení emisní způsobilosti daného motoru v ČR zodpovědný Úřad pro civilní letectví (ÚCL). Ten může uznat odpovídající osvědčení vystavené v jiném smluvním státě, pokud požadavky, které motor splňuje, odpovídají ustanovením předpisu L16/II. [21] [22]

V současnosti jsou regulovány především emise vzniklé v důsledku nedokonalého spalování paliva. Jak již bylo zmíněno, ke snížení emisí SO_x je smysluplnější regulovat obsah síry v použitém palivu, přičemž emise H_2O a CO_2 jsou nevyhnutelným důsledkem jeho spalování. Nicméně v otázce emisí CO_2 je nutné doplnit, že s ohledem na jejich globální význam vznikly v posledních letech certifikační standardy i pro ně. Na osmé schůzi CAEP v únoru 2010 byl odsouhlasen jejich vývoj, jenž byl o tři měsíce později schválen Radou ICAO. Na desáté schůzi CAEP v únoru 2016 byl poprvé představen třetí svazek Annexu 16, zaměřený na certifikaci motorů z hlediska emisí CO_2 . Jeho ustanovení se týkají podzvukových proudových letadel s maximální vzletovou hmotností (MTOM) nad 5 700 kg a vrtulových letadel s MTOM nad 8 618 kg. [23] V českém prostředí existuje jeho obdoba v podobě předpisu L16/III – Ochrana životního prostředí – Emise CO_2 letounů [24]. Z produktů nedokonalého spalování jsou v rámci předpisu L16/II (respektive Annexu 16/II) regulovány emise CO, NO_x a HC. Na desáté schůzi CAEP v roce 2016 bylo rozhodnuto o standardizaci požadavků na nvPM, jejíž podoba byla odsouhlasena na další schůzi o tři roky později. [18] [22] Standardy týkající se emisí NO_x se od 80. let postupně zpřísňují, díky čemuž jsou jejich limity v současnosti až o 50 % nižší než původně, přičemž CAEP očekává v tomto ohledu další zpřísňování [21] [22]. Emisní standardy pro CO a HC se od 80. let nezměnily [22].

Při ověřování emisní způsobilosti se motory rozlišují podle toho, zda jsou určeny pro pohon podzvukových či nadzvukových letounů. V případě motorů pro pohon podzvukových letounů se regulují plynné emise nespálených uhlovodíků, CO a NO_x . Nespálené uhlovodíky předpis L16/II definuje jako „součet všech uhlovodíkových sloučenin všech druhů a všech

molekulárních hmotností, které jsou obsaženy ve vzorku plynů a se kterými se počítá tak, jako by byly ve formě metanu“ [22]. Oxidy dusíku jsou předpisem definovány jako „součet množství oxidu dusnatého a oxidu dusičitého obsaženého ve vzorku plynu, se kterým se počítá tak, jakoby oxid dusnatý byl ve formě oxidu dusičitého“ [22]. Pro HC a CO se sleduje jejich celková hmotnost (D_p) vypuštěná v rámci referenčního LTO cyklu. Ta se následně dělí jmenovitým tahem motoru (F_{00}), jenž odpovídá maximálnímu schválenému vzletovému tahu (bez vstříku vody), přičemž předpis stanovuje limitní hodnotu tohoto poměru. [22] Je zřejmé, že s rostoucím jmenovitým tahem motoru lineárně roste maximální přípustné celkové množství emisí vypuštěných motorem během LTO cyklu. Grafy na obr. 2 ukazují toto limitní množství (červená čára) ve vztahu k vybraným současně používaným motorům (modré tečky). Jak lze vidět, zejména motory s vyšším jmenovitým tahem (obecně nad 100 kN) splňují limity pocházející z 80. let minulého století s výraznou rezervou.



Obrázek 2: Celkové LTO emise HC a CO vybraných motorů včetně předpisových limitů (limity z [22], data z [25])

Pro NO_x je situace složitější; pro ně platí různé limitní hodnoty poměru D_p/F_{00} v závislosti na datumu výroby motoru, přičemž se zde navíc zohledňuje i referenční poměr stlačení (poměr tlaků na výstupu a vstupu do kompresoru při vzletovém tahu). Předpisem L16/II i původním Annexem 16/II jsou poměrně odnědávná (s platností od 1. 1. 2023) regulovány i emise nvPM. Podle předpisu L16/II se jedná o „vypouštěné částice, které se nacházejí v rovině výfuku trysky výstupních plynů turbínového motoru, které se při ohřátí na teplotu 350 °C neodpařují“ [22]. V případě nvPM se sleduje jednak celková hmotnost vypuštěných částic a jednak počet těchto částic. Limity pro nvPM se stanovují podobně jako pro plynné emise, tj. na základě poměru těchto veličin a jmenovitého tahu, jenž nesmí překonat určitou maximální hodnotu. [22] Dříve byly PM regulovány skrze kouřové číslo (SN). Toto bezrozměrné číslo může dosahovat hodnoty od 0 do 100, přičemž je hodnocena viditelnost, respektive matnost kouřové stopy za



motorem, způsobená přítomností pevných částic v proudu spalin. Hodnota konkrétně udává procentuální změnu absolutní odrazivosti filtračního papíru vystaveného předepsanému objemu proudu spalin. Tento parametr však nevypovídá o počtu částic či jejich hmotnosti, navíc jemnější částice mohou filtrem projít, aniž by na něm ulpěly. Podle předpisu L16/II se v současnosti regulace SN vztahuje pouze na motory vyrobené před 1. 1. 2023 a na motory vyrobené po tomto datu, které mají maximální jmenovitý tah menší než 26,7 kN. [1] [4] [22] Předpis L16/II (respektive Annex 16/II) rovněž popisuje metody měření sledovaných emisí v rámci certifikačního procesu, nicméně tyto zde nebudou dále rozebírány.

V rámci ověřování emisní způsobilosti motoru se vyhodnocují nejrůznější údaje. Mezi ně patří například informace o palivu (poměr vodíku a uhlíku a další specifikace), identifikace motoru, hodnoty D_p a F_{00} či postup, jak byly tyto hodnoty získány. Podle ustanovení předpisu mají být dále zaznamenány údaje o spotřebě paliva, respektive palivovém toku v kilogramech za sekundu, a emisní index v gramech na kilogram spáleného paliva. V případě nvPM se jedná o emisní indexy zvlášť z hlediska hmotnosti a počtu částic. Pro tyto emise se zároveň uvádí údaje o výhřevnosti paliva a obsahu síry a aromatických látek v palivu. Tyto údaje mají být zaznamenány pro každý provozní režim v rámci LTO cyklu. Právě tato data umožňují výpočet emisí v rámci celého LTO cyklu i dílčích provozních režimů. V neposlední řadě mají být rovněž k dispozici různé odvozené informace, tj. informace vycházející z jednotlivých naměřených hodnot, a to jak pro plynné látky, tak nvPM. [22] Všechny tyto hodnoty jsou volně dostupné v emisní databance (tzv. ICAO Engine Emissions Databank), která je dostupná na webových stránkách EASA [25]. Databanka obsahuje zmiňované hodnoty emisních a palivových charakteristik všech motorů, na které se vztahují ustanovení ohledně certifikace emisní způsobilosti, a to i v případě vyřazených či již nevyráběných typů motorů. Tyto hodnoty bývají typicky naměřeny v rámci procesu certifikace, avšak v některých případech jsou doplňovány také o aktuálnější hodnoty, pořízené například v rámci dodatečných zkoušek či různých výzkumů. Databanka je průběžně doplňovaná o nová či revidovaná data (v rámci nově certifikovaných motorů či průkazu splnění nových standardů), a to zhruba jednou ročně. [26] Pomocí této databanky byly vypočítány celkové LTO emise motorů zahrnutých v rámci obr. 2.

1.3 LTO cyklus dle ICAO

Jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, za účelem emisní certifikace letadlových motorů definovala ICAO tzv. LTO cyklus. Tento cyklus zjednodušeným způsobem popisuje pobyt letadla na letišti, respektive pod výškou 3 000 ft (914 m) nad úrovní vztažného bodu letiště, přičemž jej dělí na různé fáze (provozní režimy) podle činnosti motorů. Tato výška odpovídá průměrné výšce směšovací vrstvy (respektive směšovací výšce) atmosféry, o níž krátce pojednává podkapitola 1.6. Emise z letadel vypuštěné pod ní přispívají k místní kvalitě



ovzduší; proto se na ně ICAO zaměřila v rámci emisní certifikace motorů letadel. [21] [22] Tabulka 1 uvádí jednotlivé původně definované provozní režimy LTO cyklu včetně jejich příslušné doby trvání (TIM, z angl. *time-in-mode*) a uvažovaného nastavení tahu motorů. Uvedené hodnoty jsou platné pro podzvuková letadla; pro nadzvuková letadla existuje mírně odlišný LTO cyklus, nicméně ten zde nebude dále rozebírán. [22] Podle dokumentu ICAO Air Quality Manual (Doc 9889) se provozní režim pojíždění může dále dělit na taxi-in (pojíždění po přistání) a taxi-out (pojíždění před vzletem), jenž trvá 7, respektive 19 minut [21].

Tabulka 1: LTO cyklus původně definovaný ICAO pro podzvuková letadla [22]

Provozní režim	Doba trvání (TIM) (min)	Nastavení tahu (% F_{00})
Vzlet	0,7	100
Stoupání	2,2	85
Přiblížení	4,0	30
Pojíždění a volnoběh na zemi	26,0	7

Hodnoty TIM uvedené v tabulce pocházejí ze 70. let minulého století; jedná se tedy o takřka 50 let starou metodiku, čímž je zanedbána nemalá část historie civilního letectví, během níž došlo k výraznému pokroku v tomto odvětví, a to jak z hlediska technologií, tak provozních řešení. Letadla, která byla v tehdejší době v provozu, měla v mnoha ohledech jiné charakteristiky; zejména z hlediska výkonnosti. Díky pokroku ve vývoji výkonnějších motorů za posledních 50 let jsou v současnosti letadla po vzletu například schopna stoupat rychleji (což má vliv na hodnotu TIM pro provozní režim „Stoupání“), a to mnohdy i při nižším nastavení tahu (např. v případě existence protihlukových postupů na daném letišti). Hodnoty TIM navíc nepocházejí z průměrné, ale spíše špičkové provozní situace, což může mít vliv na TIM pro pojíždění. [1] [21] Výhodou LTO cyklu je, že se jedná o univerzálně použitelný nástroj srovnání jednotlivých motorů z pohledu jejich emisní zátěže; pro tyto účely je osvědčený a vhodně nastavený [21]. Nicméně, jak bude popsáno dále, s LTO cyklem se pojí také řada nevýhod, plynoucích zejména ze značné míry zobecnění, které jej v jeho původní podobě činí nepraktickým pro přesnější výpočty emisí letištních pohybů.

1.3.1 Limitace LTO cyklu

Jak již bylo řečeno, LTO cyklus obecným způsobem popisuje pobyt letadla na letišti. Opírá se o dva základní předpoklady, a sice že všechna letadla tráví v rámci jednotlivých provozních režimů pokaždé stejný čas, a že nastavení tahu motorů zůstává v rámci provozních režimů konstantní a při stanovené hodnotě. Je zřejmé, že tyto dva předpoklady ve skutečnosti neplatí.



V důsledku toho je LTO cyklus ve své původní podobě nepraktický pro přesnější výpočty emisí letištních pohybů. [21]

Skutečné hodnoty TIM bývají ovlivněné řadou faktorů, proto jsou pro takřka každé letiště odlišné, přičemž ani v rámci konkrétního letiště nezůstávají konstantní. Stejně tak se může v rámci jednotlivých provozních režimů měnit i skutečné nastavení tahu. V rámci původní definice LTO cyklu je například uvažováno, že nastavení tahu je redukováno okamžitě po vzletu, načež zůstává konstantní až do dosažení výšky 3 000 ft nad zemí; k této redukci tahu reálně dochází až po překonání určité výšky. Kromě toho mnohdy vzletový tah reálně nedosahuje hodnoty 100 %, typicky z důvodů nákladové efektivity, prodloužení životnosti částí motoru či dodržení místních protihlukových postupů. Během pojíždění jsou letadla často nucená opakovaně zastavit či zpomalit (typicky kvůli jiným letadlům či před zabočením), přičemž s následným rozjezdem je spojené mírné navýšení tahu. Podle některých studií bývá často skutečné nastavení tahu během pojíždění nižší než 7 %, jak udává ICAO. Roli na úpravě nastavení tahu může hrát rovněž hmotnost letadla. [4] [21] Podle několika studií neodpovídá skutečný palivový tok tomu, co je uvedeno v emisní databance, přičemž tato zjištění vyplývají z analýzy letových dat. Tyto rozdíly jsou obzvláště patrné pro přiblížení a do určité míry také pro vzlet; obecně jsou hodnoty ICAO nadhodnocené oproti realitě. Naopak v případě pojíždění jsou tyto rozdíly spíše minimální. [27] [28] [29] [30] Určitý vliv na nepřesnost LTO cyklu z pohledu spotřeby paliva má patrně také degradace motorů, která není v rámci procesu emisní certifikace zohledněna, neboť sbíraná data pocházejí z nově vyrobených motorů neovlivněných degradací. Ta v důsledku zvyšuje spotřebu paliva, což má vliv na výsledné celkové emise v rámci LTO cyklu. [31]

Obzvláště velká neurčitost panuje kolem doby pojíždění, přičemž právě pojíždění letadel představuje velmi významný zdroj letištních emisí, tudíž je pochopitelně žádoucí, aby tyto emise byly adekvátně sledovány. Doba pojíždění letadel je ovlivněna celou řadou faktorů, a to jak pro pojíždění po přistání, které bývá zpravidla kratší, tak pro pojíždění před vzletem. Podle nedávné studie autorů Park a Kim [32] zkoumajících dvě jihokorejská letiště patří mezi tyto faktory meteorologická situace (rychlost větru, srážková činnost či dohlednost na provozní ploše letiště), provozní situace (počet pohybů za hodinu, počet letadel na provozní ploše v daný okamžik, doba obsazenosti dráhy (RWY, z angl. *runway*) letadlem po přistání a během vzletu atd.) či návrh letiště (uspořádání systému pojezdových drah, vzdálenost k terminálu atd.). Problematice rozdílů mezi skutečnými časy TIM a standardními hodnotami TIM dle ICAO se již věnovala řada studií. O tom, že tyto časy mohou být pro některé provozní režimy značně rozdílné, svědčí výsledky těchto studií, které jsou shrnuté v tab. 2 níže.



Tabulka 2: Výsledky vybraných studií a prací odhadujících reálné hodnoty TIM v rámci LTO cyklu

Zdroj	Zdroj dat	TIM „Vzlet“ (min)	TIM „Stoupání“ (min)	TIM „Přiblížení“ (min)	TIM „Volnoběh“ celkem (min)
ICAO [22]	-	0,70	2,20	4,00	26,00
Głowacki et al. [31]	FDR ¹	0,72	1,27	4,45	19,15
Turgut et al. [29]	FDR	0,70	1,18	4,15	18,00
Dissanayaka et al. [33]	ANSP ²	-	2,14	5,56	15,22
Xu et al. [28]	ACARS ³	-	-	-	21,16
Weijun et al. [27]	QAR ⁴	0,64	2,03	4,51	19,23
Nowak et al. [34]	Simulace	0,67	1,88	5,00	9,90
Jungmann [35]	Různé	0,65	1,01	4,67	16,10
Jungmann [36]	Různé	0,65	1,01	4,68	16,13

Jak je vidět, hodnoty TIM pro režim „Vzlet“ se mezi studiemi i od standardní hodnoty dle ICAO prakticky neliší, avšak pro ostatní provozní režimy jsou již rozdíly oproti standardním hodnotám více či méně patrné. Je vhodné doplnit, že uvedené hodnoty v tabulce jsou průměrné hodnoty. Studie od Turgut et al. [29] sledovala směrodatné odchylky zjištěných hodnot TIM, přičemž zaznamenala vysokou hodnotu pro dobu pojiždění, zejména pro pojiždění před vzletem, což svědčí o výše zmíněné neurčitosti ovlivněné řadou faktorů. Směrodatné odchylky pro TIM režimů „Vzlet“ a „Stoupání“ byly velmi nízké, přičemž směrodatná odchylka pro přiblížení byla o něco větší (avšak stále nižší než směrodatná odchylka pro pojiždění). Řada těchto studií potvrdila, že hodnoty TIM pro pojiždění po přistání jsou kratší než před vzletem, a že se obecně více blíží původním hodnotám dle ICAO, zatímco odhadovaná doba pojiždění před vzletem je ICAO značně nadhodnocená [28] [29].

Studie od Zhou et al. [37] zkoumala hodnoty TIM pro provozní režimy „Přiblížení“ a „Stoupání“ v závislosti na směšovací výšce. Jak již bylo řečeno, LTO cyklus zohledňuje emise vzniklé pod touto výškou, jejíž hodnota je pevně stanovená dle ICAO. Podle této studie byla její skutečná hodnota nižší mezi listopadem a březnem, což ovlivnilo zkoumané hodnoty TIM. Zatímco reálná průměrná hodnota TIM pro režim „Přiblížení“ vyšla ve srovnání se standardní hodnotou dle ICAO po většinu roku kolem 400 s (oproti 240 s dle ICAO), průměrná hodnota TIM pro režim „Stoupání“ se s výjimkou zimních měsíců takřka shodovala s hodnotou dle ICAO. To, že

¹ FDR = zapisovač letových údajů (z angl. *flight data recorder*)

² ANSP = poskytovatel letových navigačních služeb (z angl. *air navigation service provider*)

³ ACARS = Aircraft Communications, Addressing and Reporting System

⁴ QAR = provozní zapisovač letových údajů (z angl. *quick access recorder*)

je doba stoupání dle ICAO naopak nadhodnocená, naznačuje studie od Patterson et al. [30], která zkoumala letová data pro několik typů letadel (se zohledněním standardní směšovací výšky). V případě režimu „Přiblížení“ byla touto studií pro většinu zkoumaných typů potvrzena poměrně značná podobnost se standardní hodnotou TIM.

Na základě tohoto oddílu je tedy zřejmé, že LTO cyklus ve své původní podobě není dostatečně adekvátním nástrojem pro přesné výpočty emisí letištních pohybů, neboť s ním je v některých ohledech spojená značná nejistota. Aby jej pro tyto účely bylo možné použít, je nezbytné jeho zpřesnění.

1.3.2 Možnosti zpřesnění LTO cyklu

S ohledem na limitace původně definovaného LTO cyklu diskutované v předchozím oddílu je zcela zřejmé, že jeho zpřesnění může přinést podstatné výhody z pohledu spolehlivějších výpočtů emisí letištních pohybů. V tomto ohledu existují dva hlavní směry, jak původní LTO cyklus upravit, respektive zpřesnit.

První možností je zvýšit počet uvažovaných provozních režimů. To v důsledku odstraní část existujícího zobecnění a zvýší podrobnost výpočtů. Dokument Air Quality Manual od ICAO v této souvislosti zmiňuje tzv. provozní letový cyklus, který se skládá z celkem deseti provozních režimů, přičemž popisuje pobyt letadla na letišti podrobněji než LTO cyklus dle standardní definice. Jsou zde například více zohledněny dílčí změny nastavení tahu. Tento cyklus je schematicky popsán níže na obr. 3, přičemž jsou rozlišeny provozní režimy odpovídající příletu a navazujícímu odletu. [21]



Obrázek 3: Podrobnější provozní letový cyklus dle manuálu ICAO [21]

Příkladem rozdílu mezi výše popsáním provozním letovým cyklem a původním LTO cyklem dle ICAO je například skutečnost, že zatímco LTO cyklus uvažuje snížení nastavení tahu ihned po vzletu, zde dochází ke snížení tahu až po dosažení určité výšky nad zemí [21]. Toto rozdělení na více provozních režimů může zároveň pomoci zpřesnit celkovou dobu pobytu letadla na letišti. V případě špičkového provozu lze například zohlednit čas vyčkávání letadla na pojezdové dráze. Podobnému zpřesnění LTO cyklu skrze definování dalších provozních



režimů se věnovala studie od Stettler et al. [38], která se zaměřila na prostředí londýnského letiště Heathrow, přičemž definovala celkem dvanáct provozních režimů, pro které zároveň určila i průměrnou hodnotu TIM a příslušné nastavení tahu motoru. Tabulka 3 uvádí provozní režimy tohoto rozšířeného LTO cyklu spolu s příslušnými hodnotami TIM, kdy má být podle autorů dále uvažován interval nejistoty $\pm 10\%$. Dále je zde uvedené příslušné rozmezí nastavení tahu.

Tabulka 3: Rozšířený LTO cyklus podle studie Stettler et al. [38]

Provozní režim	Průměrná TIM (s)	Rozmezí nastavení tahu (% F_{00})
Přiblížení	286	21–30
Dojezd na dráze	46	4–7
Zpětný tah po přistání	15	30
Pojíždění po přistání (taxi-in)	371	4–7
Zrychlování během pojíždění (taxi-in)	10	7–17
Provoz APU	900	-
Pojíždění před vzletem (taxi-out)	780	4–7
Zrychlování během pojíždění (taxi-out)	10-20	7–17
Vyčkávání u dráhy	341	4–7
Vzlet	29	75–100
Počáteční stoupání	38	75–100
Stoupání	61	75–85

Lze si povšimnout, že provozní režimy této varianty LTO cyklu jsou velmi podobné provoznímu letovému cyklu definovanému ICAO výše. Výjimku tvoří provozní režimy zohledňující změnu nastavení tahu v souvislosti se změnou rychlosti během pojíždění, například po dočasném zastavení. Dále je zde zohledněn zpětný tah po přistání i chod APU, která typicky bývá zapnutá v době, kdy jsou vypnuté motory letadla (případně ještě před příjezdem na stání). [21] [38] Podmínkou pro použitelnost takto zpřesněného LTO cyklu je, aby byly k dispozici všechny potřebné hodnoty palivového toku i emisních indexů, neboť řada hodnot nastavení tahu uvedených v tab. 3 neodpovídá standardním hodnotám dle ICAO, pro které existují data naměřená v rámci emisní certifikace motorů. Tyto hodnoty lze sice získat přepočtem z existujících hodnot, avšak dle studie je s tím spojená nejistota v řádu až desítek procent, což pro tento přístup představuje zásadní nevýhodu. [38]

Druhou, méně pokročilou možností zpřesnění LTO cyklu, je ponechání jeho stávající podoby (tj. čtyři provozní režimy) se snahou o maximální zpřesnění jeho dílčích parametrů. Jak bylo



zmíněno, získat pomocí interpolace či extrapolace data k palivovým tokům a emisním indexům pro jiné než standardizované hodnoty nastavení tahu znamená vnést do následných výpočtů výraznou nejistotu, přičemž alternativou jsou nákladné a náročné experimenty na specializované zkušebně s motorem. Proto je zřejmé, že nejpraktičtější možností je nalezení přesnějších hodnot TIM, které budou v rámci následných výpočtů emisí letištních pohybů představovat určitou přidanou hodnotu oproti původnímu LTO cyklu. Aby byla reflektována specifika konkrétního letiště, je zřejmé, že pro tyto účely je nutné využít reálná data z provozu. Možností, odkud tato data mohou pocházet, je hned několik, přičemž některé z nich jsou uvedeny v tab. 2.

První z nich spočívá ve využití dat z palubních zapisovačů letadel; především z provozního zapisovače letových údajů (QAR, z angl. *quick access recorder*). Z těchto dat lze například získat informace o skutečné spotřebě paliva v rámci sledovaného úseku letu, respektive během jednotlivých fází LTO cyklu. Tyto údaje lze využít pro výpočet emisí, jejichž množství přímo závisí na spotřebě paliva, tedy například emisí CO₂. Analýzou vývoje hodnot palivového toku v čase lze v některých případech (tam, kde je jasně patrná změna tahu po vzletu, a tedy také spotřeby paliva) získat odhad hodnot TIM provozních režimů „Vzlet“ či „Stoupání“. Tyto časy lze rovněž odvodit prostřednictvím analýzy dat o trajektorii a poloze. [30] [39] Vzhledem k tomu, že získání těchto dat je podmíněno spoluprací s konkrétním leteckým dopravcem, je pokrytí významnější části letištního provozu touto cestou značně složité. V tomto ohledu tedy může být žádoucí spolupráce s provozovatelem letiště či místním poskytovatelem letových navigačních služeb, kteří typicky vlastní přehledová data z různých systémů či různá neveřejná provozní data. Ke zjištění doby poježdění jednotlivých pohybů, která je největším zdrojem nejistoty ve výpočtech emisí, lze například využít data ze systému A-SMGCS (Advanced Surface Movement Guidance and Control System), který sleduje provoz na provozní ploše letiště. Velmi silným nástrojem pak mohou být data ze systému ADS-B. [39] Tato data obsahují mj. údaje o rychlosti, výšce či poloze letadla, z nichž lze rekonstruovat trajektorii a časový průběh různých kinematických charakteristik pro daný let [40]. Využití dat z tohoto systému pro odhad časů TIM jednotlivých provozních režimů LTO cyklu je zároveň předmětem této práce.

1.4 Výpočty emisí letištních pohybů

V literatuře existuje celá řada popsaných postupů a metod, jak počítat emise letištních pohybů; od jednoduchých až po komplexní. Hlavní výpočetní přístupy, které zde budou blíže popsány, definovala samotná ICAO. Kromě toho existují i různé další přístupy, které jsou výsledky prací různých autorských týmů; tyto pokrývají přehledové články od Dissanayaka et al. [41] či Kurniawan a Khardi [42].



1.4.1 Klasifikace metodik výpočtů emisí dle IPCC

Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPCC, z angl. *Intergovernmental Panel on Climate Change*) byl založen v roce 1988 Světovou meteorologickou organizací (WMO, z angl. *World Meteorological Organization*) a Programem OSN pro životní prostředí (UNEP, z angl. *United Nations Environment Programme*). V současnosti má 195 členů z řad vlád členských států OSN či WMO. Jeho cílem je vědecky zkoumat změnu klimatu včetně jejich předpokládaných budoucích důsledků a možností, jak je zmírňovat. V rámci své činnosti pravidelně vydává reporty, které vznikají na základě podrobné analýzy vývoje stavu poznání v problematice změny klimatu a všech souvisejících otázek. Tyto reporty slouží mj. jako podklady pro různá mezinárodní jednání, a to i na nejvyšších úrovních. Světovým vládám poskytuje IPCC všechny potřebné informace v této oblasti, které jim mohou pomoci rozvíjet relevantní klimatickou politiku. V rámci IPCC působí tisíce odborníků z celého světa, kteří jsou rozděleni mezi čtyři pracovní skupiny, z nichž se jedna věnuje rozvoji metodiky výpočtů a ohlašování národních emisí skleníkových plynů. [43]

V rámci své činnosti se IPCC zaměřuje na emise skleníkových plynů, které mají vliv na změnu klimatu. Pro tyto účely rozlišuje celkem tři úrovně složitosti metodik výpočtů těchto emisí. Ačkoli je tato klasifikace definovaná pro metodiky výpočtů emisí skleníkových plynů, lze ji principálně aplikovat i na výpočetní metodiky pro ostatní emise, včetně emisí z letadel. [41] [44] Metodiky spadající pod Úroveň 1 počítají emise na základě znalosti celkové spotřeby paliva a příslušných emisních indexů. Na této základní úrovni lze poměrně spolehlivě vypočítat emise CO₂ či H₂O, jelikož jejich emisní indexy jsou prakticky konstantní. Pro látky, jejichž emisní indexy mohou být značně proměnlivé (např. CO či NO_x), je však tento přístup nepraktický, neboť přináší velkou nejistotu. V rámci Úrovně 2 dochází k jistému zpřesnění, a to prostřednictvím využití místních emisních indexů. Tyto místní indexy jsou dány například konkrétním typem paliva či zvolenou technologií spalování. V případě emisí z letadel je v tomto případě známý počet LTO cyklů a celkové dodané (nikoli však spotřebované) palivo. Metodiky spadající pod Úroveň 3 jsou vůbec nejsložitější, přičemž typicky zahrnují podrobné emisní modely či důkladná měření na úrovni jednotlivých zdrojů emisí. Součástí naměřených dat bývají zpravidla údaje o aktuálním palivovém toku, které by měly být doplněny o příslušné emisní indexy. V kontextu výpočtů emisí z letadel to znamená, že jsou k dispozici detailní provozní data pro každý jednotlivý let, přičemž zde již dochází k rozlišení jednotlivých provozních režimů. [41] [44] Tato úroveň se dále dělí na Úroveň 3A a Úroveň 3B. Zatímco první jmenovaná úroveň vychází z původní Úrovně 3, přičemž zahrnuje obecné, průměrné hodnoty (TIM, spotřeba paliva atd.), Úroveň 3B zpravidla využívá pokročilé modelovací nástroje a reálná data například ohledně spotřeby paliva či trajektorie letadla, na jejímž základě lze odhadnout přesnější hodnoty TIM. [41]



1.4.2 Výpočetní přístupy dle ICAO

V rámci dokumentu Air Quality Manual (Doc 9889) od ICAO jsou definovány tři možné metodické přístupy, jak počítat emise letištních pohybů. Tyto přístupy se liší podle složitosti, přičemž je zřejmé, že sofistikovanější přístupy mohou přinést přesnější odhady těchto emisí, byť na úkor mnohdy náročných požadavků na dostupnost dat a vyšší výpočetní náročnosti. Je nutné dodat, že v některých případech lze kombinovat prvky či myšlenky jednotlivých přístupů, a to na základě potřeby či dostupnosti konkrétních dat. [21]

Simplexní přístup

Simplexní přístup dle ICAO je nejméně složitý a nejméně náročný z hlediska potřebných dat či informací. Jediné potřebné údaje pro výpočet emisí dle tohoto přístupu zahrnují počet pohybů, respektive vykonaných LTO cyklů v rámci zkoumaného období, a příslušné typy letadel. V rámci tohoto přístupu se typy letadel často zobecňují, přičemž se využívají předem vypočítané hodnoty emisí dostupné v tabulkách. Pochopitelně se s tímto přístupem pojí největší nejistota, která může vést k podhodnocení či naopak nadhodnocení emisí letištních pohybů. Dokument Air Quality Manual rozlišuje dvě varianty tohoto přístupu. [21]

V rámci první varianty („Simplexní A“) se místo emisních indexů pracuje s emisními faktory pro jednotlivé typy letadel, které představují celkové emise za kompletní LTO cyklus. Celkové emise E_i letištních pohybů pro látku i za sledované období, bez rozlišení dílčích provozních režimů či různých typů motorů pro jeden konkrétní typ letadla, se počítají pomocí následujícího vzorce:

$$E_i = \sum_j n_{LTO,j} \cdot EF_{i,j}, \quad (1.1)$$

kde $n_{LTO,j}$ je počet LTO cyklů pro typ letadla j a $EF_{i,j}$ je tabulková hodnota emisního faktoru pro látku i a typ letadla j . Pokud je zapotřebí vypočítat celkovou spotřebu paliva (např. pro odhad emisí CO_2), lze emisní faktor ve vzorci (1.1) nahradit dostupnou tabulkovou hodnotou faktoru celkové spotřeby paliva v rámci LTO cyklu pro daný typ letadla. [21]

Druhá varianta („Simplexní B“) je složitější, neboť oproti předchozí variantě již pracuje s dílčími provozními režimy a emisními indexy pro konkrétní typy motorů. Pro každý pohyb v rámci sledovaného období je nutné mít k dispozici informaci o konkrétním typu letadla včetně případného upřesnění výrobní varianty (např. Boeing 737-500 a Boeing 737-800 jsou výrobní varianty typu Boeing 737). Takto je možné ke každému pohybu přiřadit jednak příslušný počet motorů a jednak konkrétní typ motoru, k němuž jsou v emisní databance od ICAO dostupné všechny potřebné charakteristiky pro výpočet popsány níže. Výpočet celkových emisí $E_{i,j}$ v rámci jednoho LTO cyklu pro látku i a typ letadla j se provádí podle vzorce:



$$E_{i,j} = n_{m,j} \cdot \left(\sum_k t_{TIM,k} \cdot \varphi_{j,k} \cdot \varepsilon_{i,j,k} \right), \quad (1.2)$$

kde $n_{m,j}$ je počet motorů pro daný typ letadla j , $t_{TIM,k}$ je hodnota TIM pro provozní režim k , kde $k = \{1,2,3,4\}$; $\varphi_{j,k}$ je palivový tok pro daný typ letadla j a provozní režim k a $\varepsilon_{i,j,k}$ je emisní index pro látku i , typ letadla j a provozní režim k . Pokud nejsou k dispozici přesnější hodnoty TIM, používají se standardizované hodnoty v rámci původní definice LTO cyklu. Pro získání celkových emisí letištních pohybů se takto vypočítané emise následně vynásobí příslušným počtem pohybů, respektive LTO cyklů, pro každý sledovaný typ letadla. [21] Použití této varianty simplexního přístupu je preferované, přičemž v literatuře se vyskytuje v určitém omezeném množství [41].

Pokročilý přístup

Pokročilý přístup podle ICAO představuje další stupeň metodické složitosti; od simplexního přístupu se liší především větší podrobností použitých dat a o to menší výslednou nejistotou. Získání těchto dat však může být složitější a může být podmíněno spoluprací s různými subjekty (např. vlastníky různých provozních databází či ANSP). Nicméně zde zůstává stejný princip výpočtu emisí jako u simplexního přístupu, tj. na základě výpočtu emisí pro jednotlivé provozní režimy LTO cyklu a jejich součtu pro všechny typy letadel (viz vzorec (1.2)). Rozdíl spočívá v tom, že v rámci tohoto přístupu se již nepracuje s obecnými hodnotami (například standardními hodnotami TIM dle ICAO), jelikož jsou zohledněna místní letištní specifika, což vede k použití přesnějších hodnot. V rámci tohoto přístupu se pro jeden typ letadla rozeznává více možných typů motorů, přičemž se sleduje jejich procentuální zastoupení. Výpočty emisí již nejsou založeny na jednoduchých principech, jako v případě předchozího simplexního přístupu (resp. jeho varianty „B“), ale na základě různých konkrétních parametrů; například rychlosti či výšky. Zároveň se zde mohou zohledňovat emise vzniklé během spouštění motorů před zahájením pojiždění. I pro tento přístup existují dvě varianty. [21] V rámci klasifikace dle IPCC odpovídají metodiky založené na tomto přístupu Úrovni 3A, přičemž se v literatuře jedná o nejvíce zastoupený přístup [41].

V rámci první varianty („Pokročilý A“) se pracuje s upravenými hodnotami nastavení tahu, TIM, palivových toků a emisních indexů pro jednotlivé provozní režimy LTO cyklu. Tyto hodnoty jsou upraveny tak, aby více refletovaly místní podmínky – to se týká zejména hodnot TIM, které se, jak bylo ukázáno výše, mohou pro jednotlivá letiště podstatným způsobem lišit (zejména doba pojiždění). Stejně tak mohou být použity jiné hodnoty nastavení tahu; například pro provozní režim „Vzlet“ tak může být reflektováno použití sníženého vzletového tahu v důsledku protihlukových postupů. V případě palivového toku jsou jeho hodnoty odpovídající jiným než standardním hodnotám nastavení tahu (tj. 7 %, 30 %, 85 %, 100 %) vypočítány na základě



kvadratické interpolace z existujících hodnot, kdy se předpokládá, že palivový tok je funkcí nastavení tahu. Na základě takto získaných hodnot se následně pomocí lineární interpolace na zlogaritmovaném grafu závislosti emisního indexu na palivovém toku získá upravený emisní index. Budťo lze pro každý tento parametr stanovit jedinou hodnotu zahrnující veškerý letištní provoz, nebo lze letištní pohyby rozdělit do skupin a pro každou skupinu vypočítat dílčí hodnoty. Pro tuto variantu je typické, že jsou všechny tyto parametry zpřesněné na základě skutečných dat, která mohou být výsledkem vlastního měření či mohou být poskytnuta některým z leteckých dopravců využívajících letiště. Nevýhodou této varianty je, že v případě značného rozdílu mezi standardními podmínkami dle ISA a skutečnými okolními podmínkami (danými např. nadmořskou výškou) mohou být korekce těchto parametrů obtížné. [21] [41]

Druhá varianta („Pokročilý B“) využívá ke zpřesnění jednotlivých zmíněných parametrů výkonnostní modely; jedná se tedy o mírně pokročilejší variantu. Tyto modely pracují na základě vstupních dat, kdy se typicky jedná o různé údaje o daném typu letadla či informace o místních podmínkách (návrh letiště, meteorologické podmínky atd.), které rovněž umožňují korekci sledovaných parametrů, která, jak bylo zmíněno výše, může být v některých případech zapotřebí. S využitím takovýchto modelů lze například modelovat časy TIM pro všechny provozní režimy, zatímco v rámci předchozí varianty se často měří pouze doba poježdění. Dále lze touto cestou získat odhad spotřeby paliva, respektive palivového toku pro různé provozní režimy LTO cyklu. Některé modely v rámci toho zohledňují faktory jako je dopředná rychlost letadla či různé okolní podmínky. Upravené emisní indexy se získávají stejným principem, jako u předchozí varianty, jen jsou využity hodnoty palivového toku získané prostřednictvím modelu. [21]

Sofistikovaný přístup

Tento přístup je z hlediska výpočtů emisí letištních pohybů nejpřesnější. Jeho volba je však podmíněna přístupem k obrovskému množství různých dat. V rámci tohoto přístupu jsou sledovány individuální letištní pohyby, přičemž součástí dat o každém pohybu je například výrobní číslo letadla a jeho motorů či rejstříková značka daného letadla. Dále jsou využita různá skutečná data týkající se výkonnosti motorů či samotného letadla, například ohledně okamžitého nastavení tahu, okamžité spotřeby paliva (resp. palivového toku) či jiných relevantních dat. Jedná se tedy o hodnoty proměnlivé v čase, nikoli konstanty, což zvyšuje náročnost výpočtů. Dále jsou pro každý pohyb stanoveny jeho individuální hodnoty TIM. Pro každý pohyb se zároveň často sleduje i využití reverzu tahu během přistání, s nímž je spojené určité dočasné zvýšení tahu, a tedy i určité množství emisí navíc. V rámci tohoto přístupu se dokonce sledují i motorové zkoušky probíhající na letišti, které jsou rovněž zdrojem emisí. Dopravci mohou rovněž poskytnout informace o tom, zda na daném letišti aplikují alternativní



metody pojiždění, například pojiždění pouze na jeden motor. V rámci komplexního přístupu již nejsou využity původní emisní indexy uvedené v emisní databance od ICAO, ale jejich hodnoty jsou přepočítány na základě skutečných výkonostních a provozních dat s využitím různých metod, které zde nebudou dále popsány. [21] V principu lze tedy výpočty emisí $E_{i,j}$ látky i a pohybu j v rámci tohoto přístupu vyjádřit pomocí následujícího vzorce:

$$E_{i,j} = n_{m,j} \cdot \sum_k \left[\int_0^{TIM_{j,k}} \varphi_{j,k}(t) \cdot \varepsilon_{i,j,k}(t) dt \right], \quad (1.3)$$

kde $n_{m,j}$ je počet motorů pro daný pohyb j , $TIM_{j,k}$ je hodnota TIM pro provozní režim k pro pohyb j , $\varphi_{j,k}(t)$ je funkce palivového toku pro pohyb j a provozní režim k v čase a $\varepsilon_{i,j,k}(t)$ je funkce emisního indexu pro látku i , typ letadla j a provozní režim k v čase. Lze si povšimnout, že tento vzorec je spojitou obdobou vzorce (1.2) ze simplexního přístupu (var. „B“), která reflektuje využití skutečných dat s časově proměnlivými hodnotami. Vzhledem k tomu, že s tímto přístupem je spojená poměrně značná výpočetní náročnost, bývají zde často využívány různé počítačové výpočetní nástroje. V rámci tohoto přístupu se totiž pracuje i s celou řadou parametrů jako jsou meteorologické podmínky, které mohou mít vliv na výkonost letadel či jejich motorů, nebo infrastruktura letiště zahrnující mj. délku vzletové a přistávací dráhy. [21] V rámci klasifikace dle IPCC odpovídají metodiky založené na tomto přístupu Úrovni 3B [41].

1.4.3 Výpočetní přístupy dle EEA

V kontextu evropského prostředí je vhodné zmínit společný dokument Evropské agentury pro životní prostředí (EEA, z angl. *European Environment Agency*) a Programu spolupráce při monitorování a vyhodnocování dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě (EMEP, z angl. *European Monitoring and Evaluation of Pollutants*) Air pollutant emission inventory guidebook z roku 2023 [45], který slouží jako obecná příručka pro inventarizaci emisí, přičemž její část 1.A.3.a se věnuje metodikám inventarizace emisí z letecké dopravy. Celkově jsou zde rozlišeny tři hlavní výpočetní přístupy, které jsou kategorizovány v souladu s klasifikací dle IPCC. Jelikož jsou tyto přístupy v mnoha rysech podobné přístupům definovaným ICAO, nebudou zde popsány natolik podrobně; dodatečný popis bude zaměřený primárně na civilní lety podle pravidel pro let podle přístrojů (IFR, z angl. *instrument flight rules*) v rámci LTO cyklu. Příručka řeší výpočty emisí i spotřeby paliva pro všechny fáze letu, tj. kromě LTO cyklu i v rámci stoupání, letu v cestovní hladině a klesání (CCD, z angl. *climb, cruise and descent*). [45]

První přístup, označovaný v souladu s klasifikací IPCC jako Úroveň 1, pracuje se souhrnnými daty ohledně množství prodaného paliva (které uvažuje jako shodné s množstvím spotřebovaného paliva), s počtem LTO cyklů a se základními informacemi o zastoupených



typech letadel. Údaje o celkové spotřebě paliva v tomto případě zpravidla vycházejí z národních statistik, které typicky uvádějí roční hodnoty. Toto celkové množství se následně rozdělí mezi spotřebu paliva v rámci LTO cyklu, vypočítanou podle postupu uvedeného níže, a zbytek, který odpovídá ostatním fázím letu mimo LTO cyklus (tj. CCD). Tyto ostatní fáze letu nejsou předmětem této práce, nicméně příručka od EEA je uvažuje, neboť řeší celkové emise z letecké dopravy. Příručka rovněž z důvodů souvisejících s postupy hlášení emisí řeší dílčí dělení na vnitrostátní a mezinárodní lety, avšak to zde není potřebné. Celková spotřeba paliva v rámci LTO cyklu se počítá na základě součinu známého počtu LTO cyklů a průměrné spotřeby paliva během jednoho LTO cyklu pro reprezentativní typ letadla (pakliže nejsou dostupná podrobnější data o typech letadel). Celkové LTO emise jsou počítány obdobně; a to vynásobením počtu LTO cyklů příslušným emisním faktorem, který opět vychází ze zvoleného reprezentativního typu letadla, jenž představuje průměr napříč sledovaným provozem. [45]

Druhý přístup (Úroveň 2) používá stejně jako předchozí přístup data o prodaném palivu, což umožňuje odhadnout spotřebu paliva v rámci LTO a CCD fází letu; přičemž z hlediska dat týkajících se provozu jsou zde již rozlišeny jednotlivé typy letadel. Právě znalost počtu LTO cyklů pro jednotlivé typy letadel je tedy podmínkou pro volbu tohoto přístupu. Díky tomu je možné pro výpočty emisí použít konkrétní emisní faktory (emise za celý LTO cyklus). Součástí příručky od EEA jsou mimo jiné pomocné sešity v tabulkovém procesoru Microsoft Excel, které obsahují tyto emisní faktory pro mnoho různých typů letadel. Data obsažená v těchto sešitech pocházejí od Evropské organizace pro bezpečnost leteckého provozu (EUROCONTROL), přičemž pro výpočet LTO emisních faktorů byly použity hodnoty průměrné doby poježdění na evropských letištích. K těmto faktorům je nutné doplnit, že se jedná o namodelované odhadované hodnoty, tudíž je nelze použít k přímému porovnání emisních charakteristik jednotlivých typů letadel. Princip výpočtu emisí zůstává stejný, jako u přístupu Úroveň 1, tedy násobení emisních faktorů počtem LTO cyklů; rozdíl zde však je v tom, že se tyto součiny následně sčítají pro všechny uvažované typy letadel. V rámci tohoto přístupu jsou v příručce řešena i vojenská letadla, pro které jsou poskytnuty obecné emisní faktory. [45]

Třetí přístup (Úroveň 3) pracuje s reálnými daty na úrovni individuálních letů (např. od místního ANSP či provozovatele letiště), přičemž se dělí na Úroveň 3A a Úroveň 3B. U obou variant je nutná znalost typu letadla. V rámci první jmenované varianty se pracuje s daty o letišti odletu a destinaci, z čehož vychází uletěná vzdálenost; v rámci druhé, pokročilejší varianty se pracuje s celkovými daty o trajektorii letu. Jak bylo řečeno, Úroveň 3B je pokročilejší, přičemž spotřebu paliva i emise počítá podél celkové trajektorie letu na základě výkonostních i jiných charakteristik specifických pro daný typ letadla. Pro tyto výpočty se typicky využívají různé softwarové nástroje zpracovávající vstupy v podobě dat z provozu. O některých těchto



nástrojích je blíže pojednáno dále; zde tedy nebudou více rozebírány. V rámci Úrovně 3A se pro výpočet některých emisí (např. CO₂ či SO₂) používá vypočítaná spotřeba paliva, pro ostatní emise se používají emisní faktory dostupné v již zmíněných pomocných sešitech, které jsou součástí příručky. Všechna data použitá v rámci výpočtů pocházejí od organizace EUROCONTROL a jsou výsledkem výpočtů modelovacích softwarů IMPACT a AEM, o nichž bude blíže pojednáno v následující podkapitole. Jelikož se počítají emise i během traťového letu, je zde nutné upřesnit jeho délku v námořních mílích. Dále příručka poskytuje emisní faktory pro výpočet emisí u letů všeobecného letectví, vojenských letů a letů vrtulníků. V rámci výpočtů emisí odpovídajících LTO fázi letu lze v sešitech upravovat jednotlivé hodnoty TIM, například na základě expertní znalosti místních podmínek. [45]

1.5 Nástroje pro modelování emisí letištních pohybů

Využití softwarových modelovacích nástrojů je tím nejsložitějším přístupem z hlediska sledování emisí letištních pohybů. Tyto nástroje, s využitím celé řady vstupních dat, mnohdy kromě výpočtů emisí rovněž umožňují vyhodnocení jejich vlivu na místní kvalitu ovzduší, například skrze modelování jejich rozptylu. V této podkapitole budou v základním rozsahu představeni nejznámější zástupci těchto nástrojů.

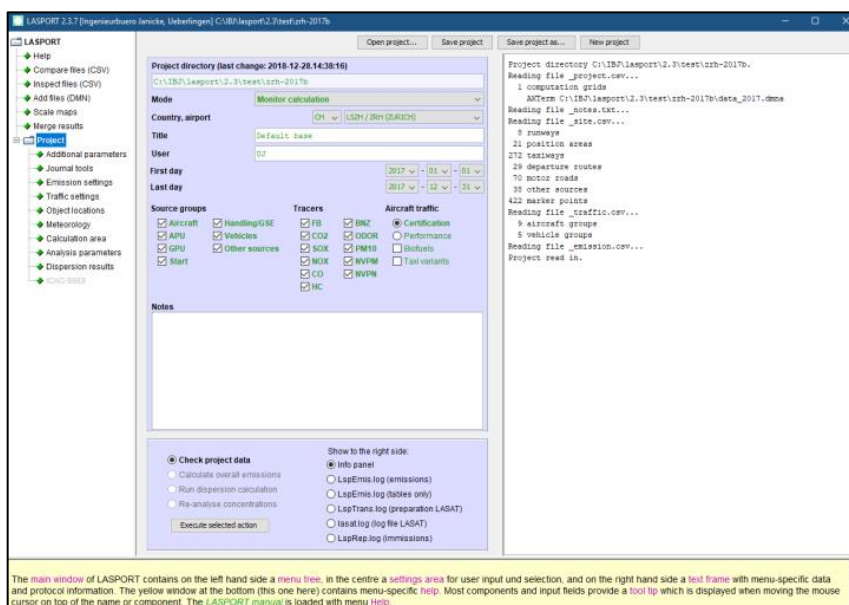
AEDT

Aviation Environmental Design Tool (AEDT) je modelovací software vyvinutý americkým Federálním leteckým úřadem (FAA, z angl. *Federal Aviation Administration*) ve spolupráci s řadou dalších subjektů (např. NASA či MIT) za účelem modelování dopadů letectví na životní prostředí, přičemž kromě emisí a související spotřeby paliva řeší také problematiku hluku. Software je schopen pracovat na úrovni jednotlivých letů i v globálním měřítku. V rámci modelování jsou využita data od evropské organizace EUROCONTROL, konkrétně data z její výkonnostní databáze BADA (Base of Aircraft Data). Pomocí BADA je například modelována spotřeba paliva; databáze obecně slouží jako základ pro tvorbu kinematických a jiných výkonnostních modelů letadel. Pro výpočty emisí využívá AEDT data z emisní databanky od ICAO, která dále zpracovává s použitím různých výpočetních metod. Kromě emisí z motorů letadel sleduje software také emise z APU letadel, emise vzniklé v rámci pozemního odbavení letadel či emise z různých stacionárních zdrojů v rámci letiště (např. požárních zkoušek, generátorů, úkonů odmrazování atd.). Mezi potřebná vstupní data pro výpočet emisí letadel patří informace o letišti (především z hlediska konfigurace dráhového systému, systému pojezdových drah či umístění stání), dále provozní informace o letech (datum a čas, typ letadla, typ motoru, trajektorie atd.) a pro účely modelování rozptylu emisí také aktuální meteorologické

údaje (směr a rychlost větru, relativní vlhkost, teplota, tlak na úrovni moře). Software rovněž využívá data z geografických informačních systémů (GIS). [46]

LASPORT

Modelovací software LASPORT (LASAT for Airports) byl vyvinut německou společností Janicke Consulting v roce 2002 s využitím poznatků z předchozího vyvinutého softwaru LASAT (Lagrangian Simulation of Aerosol Transport) z počátku 90. let minulého století. Jedná se o komerční software, který se zaměřuje na výpočty emisí letištních pohybů a jejich následný rozptyl v ovzduší. Skrze spolupráci se subjekty jako EUROCONTROL či CAEP byl LASPORT postupně uveden do souladu se všemi platnými standardy, přičemž v roce 2010 ICAO oficiálně schválilo jeho používání. Kromě předdefinovaných skupin zdrojů emisí (letadla, APU, emise z pozemního odbavení, emise ze silničního provozu atd.) lze definovat i různé vlastní zdroje emisí. Ukázka uživatelského rozhraní softwaru je zobrazená na obr. 4. [47]



Obrázek 4: Ukázka uživatelského rozhraní softwaru LASPORT [47]

Software může pracovat s obecnými informacemi o letištním provozu (typicky v rámci různých prognóz), ale také s konkrétními daty o jednotlivých pohybech. Pro výpočet emisí lze použít výchozí hodnoty z emisní databanky ICAO, ale také vlastní definované hodnoty či hodnoty vypočítané výkonnostním modelem, který je součástí softwaru. Následný 3D rozptyl emisí je vypočítán na základě vstupních meteorologických dat zahrnujících mj. směr a rychlost větru, přičemž se zpravidla používají hodinové naměřené hodnoty. V rámci těchto výpočtů lze zohlednit i okolní terén či různé překážky (např. budovy). [47]



ADMS-Airport

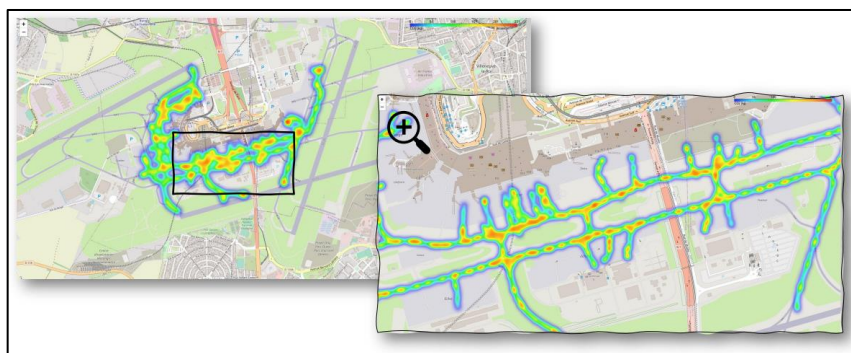
ADMS-Airport je modelovací software vyvinutý britskou organizací CERC a jeden z produktů řady ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System). Jeho použití je schválené výborem CAEP. Stejně jako u předchozích zmiňovaných softwarů jsou zde zohledněny hlavní letištní zdroje emisí, tj. motory letadel, jejich APU, procesy pozemního odbavení či okolní silniční provoz. V rámci výpočtů dokáže v jeden okamžik pracovat s emisemi až z 8 000 různých zdrojů. Pro výpočty emisí těchto zdrojů jsou v softwaru zabudovány emisní faktory celé řady pozemních vozidel, ale i průmyslových procesů. Pro výpočty emisí letadel využívá data z několika různých databank, díky čemuž umí pracovat i s letadly s turbovrtulovými a pístovými motory. Pro modelování jsou vyžadována vstupní data v podobě informací o pohybech letadel (typ letadla, typ a počet motorů, trajektorie a rychlostní profil) či například provozu na okolních pozemních komunikacích. Pro výpočet rozptylu emisí pracuje software s aktuálními meteorologickými údaji jako je rychlost a směr větru, teplota či oblačnost, které mj. využívá k odhadu směšovací výšky, která je klíčová v otázce rozptylu emisí. Kromě toho jsou rovněž zohledněny i různé chemické procesy v atmosféře; například kolem ozonu či vzniku sulfátových aerosolů. [48]

AEM

Advanced Emission Model (AEM) je jedním ze softwarových nástrojů vyvinutých organizací EUROCONTROL s cílem poskytnout účinné prostředky k posuzování současných i budoucích dopadů letecké dopravy na životní prostředí. Mezi tyto nástroje patří kromě AEM také Open-ALAQS a IMPACT, o nichž bude pojednáno dále, přičemž všechny jsou osvědčené výborem CAEP a zároveň jsou doporučenými nástroji pro projekty SESAR (Výzkum ATM jednotného evropského nebe; z angl. *Single European Sky ATM Research*). Na základě vstupních dat (např. radarové tracky, data z multilaterace (MLAT) či ADS-B nebo výstupy simulací) AEM odhaduje pro konkrétní 4D trajektorii letadla spotřebu paliva a množství emisí celkem 24 látek, a to včetně CO₂, H₂O, NO_x, CO či VOC. Výpočty emisí a spotřeby paliva pod 3 000 ft jsou založené na LTO cyklu podle ICAO, přičemž jsou využita data z několika emisních databank (od ICAO pro proudové motory, FOCA pro pístové motory a FOI pro turbvrtulové motory). Jednotlivé provozní režimy LTO cyklu mohou vycházet ze standardu ICAO, případně mohou být definovány uživatelem. Nad 3 000 ft je spotřeba paliva vypočítána pomocí databáze BADA, přičemž emisní indexy a palivové toky v emisních databankách jsou přepočítány na danou výšku. Pořízení softwaru je možné na základě podané žádosti; mezi jeho uživatele patří například univerzity, výrobci techniky či výzkumná pracoviště. [49] [50]

Open-ALAQS

Druhým modelovacím nástrojem vyvinutým organizací EUROCONTROL je Open-ALAQS (Open-Airport Local Air Quality Studies), jehož první verze byla zveřejněna v roce 2014. Tento software se primárně zaměřuje na problematiku dopadů letištních aktivit na místní kvalitu ovzduší; původně vznikl pro účely projektů SESAR spadajících pod tuto oblast. Software nejprve odhaduje veškeré emise vzniklé na letišti, ať už ze samotných letadel či různých dalších zdrojů v rámci letiště či jeho okolí. Emise z motorů letadel jsou počítány stejným způsobem, jako v případě AEM, tj. s využitím dostupných údajů o palivovém toku a emisních indexech uvedených v jednotlivých emisních databankách (viz výše). V rámci výpočtů emisí jednotlivých látek jsou využity různé metody doporučené dokumentem ICAO Doc 9889, např. Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM2). Pro výpočty emisí pozemních vozidel jsou využita data ze softwaru COPERT. Výsledky těchto výpočtů jsou pro ilustraci ukázány na obr. 5; konkrétně se jedná o emise CO₂ na pařížském letišti Orly. [51] [52]



Obrázek 5: Vizualizace výsledků výpočtů emisí CO₂ na letišti Paříž-Orly, software Open-ALAQS [52]

Druhý krok spočívá v modelování rozptylu těchto emisí a odhadu výsledných koncentrací sledovaných látek v okolí letiště; za tímto účelem je Open-ALAQS propojen s německým modelovacím softwarem AUSTAL2000. Ten využívá řadu vstupních dat, zahrnujících mj. data ohledně aktuální meteorologické situace. Dále je software schopen pracovat s terénními daty z GIS, díky čemuž lze definovat polohu jednotlivých zdrojů emisí na letišti i v jeho okolí; zároveň je tím zpřesněno modelování rozptylu emisí. [51] [52]

IMPACT

IMPACT je posledním z trojice modelovacích softwarových nástrojů vyvinutých organizací EUROCONTROL pro účely zkoumání dopadů letectví na životní prostředí. Tento software propojuje problematiku spotřeby paliva a emisí s problematikou hluku. Na základě definované trajektorie letadla (skutečné či simulované) je umožněn jednak výpočet spotřeby paliva či vzniklých emisí a jednak vizualizace zasažení okolních oblastí hlukem, včetně odhadu počtu dotčených obyvatel. Díky tomu lze provádět různé studie, řešící např. dopady zavedení nových



odletových či příletových tratí nebo změn letových postupů v rámci koncové řízené oblasti (TMA, z angl. *terminal control area*), čímž lze minimalizovat emisní i hlukovou zátěž v okolí letiště. V rámci softwaru se lze zaměřit na konkrétní letiště a jeho okolí, ale i na celý let mezi dvěma letišti. Pro výpočty využívá IMPACT data z několika databází, např. BADA, Aircraft Noise and Performance (ANP) databáze či emisní databanky od ICAO; dále v rámci různých výpočtů pracuje i s terénními daty. Software na základě těchto dat a s využitím řady kinematických modelů (např. dle BADA) dokáže mj. určit trajektorii letadla, jeho rychlostní profil i průběžné nastavení tahu a spotřebu paliva. Hlukovým výpočtům se věnují dokumenty ICAO Doc 9911 a ECAC Doc 29, přičemž IMPACT využívá postupy v nich obsažené. V rámci řešení emisních výpočtů je tento software rovněž propojen s AEM. [53] [54]

1.6 Problematika směšovací výšky

Jak již bylo řečeno, v rámci LTO cyklu jsou sledovány emise vypuštěné pod tzv. směšovací výškou (angl. *mixing height*). ICAO uvažuje její průměrnou hodnotu 3 000 ft (914 m) nad vztažným bodem letiště (ARP, z angl. *aerodrome reference point*); podle ní jsou zároveň určeny standardní časové hodnoty TIM pro režimy „Stoupání“ a „Přiblížení“. [21] Například studie od Wang et al. [55] upravila pro účely výpočtů emisí letištních pohybů hodnoty těchto dvou režimů na základě skutečné směšovací výšky. I s uvážením standardní směšovací výšky dle ICAO platí ve skutečnosti podle Dalkirana [56] pro každé letiště různé časové hodnoty TIM.

Podle elektronického meteorologického slovníku České meteorologické společnosti je směšovací výška označením pro tloušťku tzv. směšovací vrstvy (angl. *mixing layer*). Ta je slovníkem definovaná jako „*vrstva ovzduší mezi zemským povrchem a spodní hranicí nejnižší zadržující teplotní vrstvy*“, přičemž „*příměsi emitované do [ní] se rozptylují v celém jejím rozsahu*“. [57] K promíchávání vzduchu v rámci této vrstvy dochází díky turbulencím, což zároveň umožňuje vertikální rozptyl emisí. Je zřejmé, že v případě nižší směšovací výšky budou emitované škodliviny setrávat v blízkosti zemského povrchu, což bude mít negativní důsledky na místní kvalitu ovzduší. [58] [59] Kromě směšovací vrstvy existuje ještě pojem mezní vrstva atmosféry (angl. *planetary boundary layer*). Mezní vrstva atmosféry je spodní vrstva atmosféry (respektive troposféry), která je ovlivněná zemským povrchem, o nějž se tře proudící vzduch. Během dne se její tloušťka zpravidla pohybuje mezi jedním a dvěma až třemi kilometry, v noci dosahuje pouze několika stovek metrů. [59] [60] Její tloušťka závisí na tom, do jaké výšky je vzduch tzv. nestabilní. Pro nestabilitu je typické zvýšené vertikální promíchávání vzduchu, k němuž zpravidla dochází během dne, kdy je vzduch poblíž zemského povrchu ohříván, čímž získává tendenci stoupat oproti okolnímu, chladnějšímu vzduchu – právě proto je výška denní mezní vrstvy (kdy se jedná o tzv. konvektivní mezní vrstvu) větší než v noci. Ve směšovací výšce dochází k vyrovnání teplot, tudíž vzduch přestává



stoupat, čímž je zároveň ohraničena možnost vertikálního rozptylu emisí. Mezní a směšovací vrstva jsou ve většině případů ekvivalentní; tyto dva pojmy se tedy v literatuře často překrývají, byť pro úplnost je žádoucí jejich rozlišení. [59] [61]

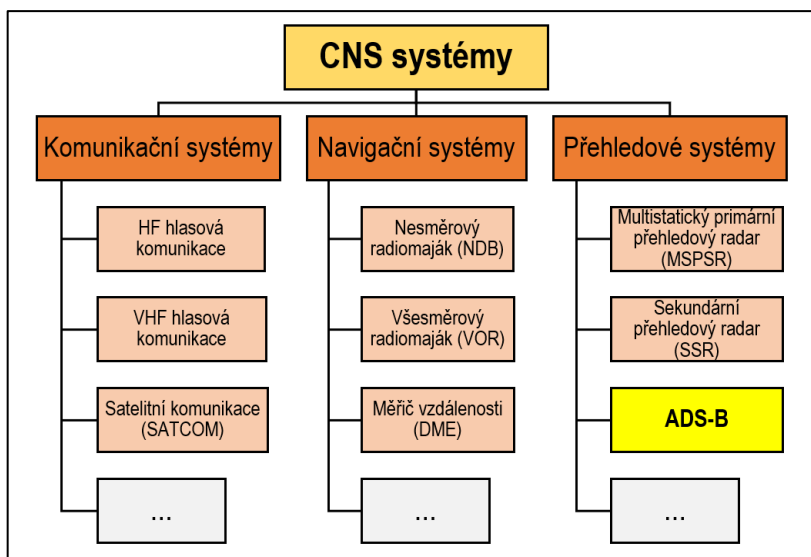
Problematika určování směšovací výšky je sice v kontextu zpřesnění LTO cyklu relevantní, nicméně nad rámec této práce; proto zde nebude podrobněji rozebírána. Ve stručnosti lze říci, že její hodnotu lze určovat například pomocí *in situ* měření, typicky tzv. Holzworthovou metodou. [62] [63] Kromě radiosondážních měření sledujících vertikální teplotní profil atmosféry lze jako alternativní zdroj dat využít například systém AMDAR (Přenos meteorologických dat z letadel, angl. *Aircraft Meteorological Data Relay*) [64]. Druhý přístup odhadování směšovací výšky spočívá v dálkovém snímání (angl. *remote sensing*) atmosféry; tuto problematiku shrnuje například přehledový článek od Kotthaus et al. [65].

1.7 Technologie ADS-B

Cílem této podkapitoly je představit technologii ADS-B (Automatický závislý přehledový systém – vysílání; z angl. *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast*) v kontextu tématu této práce. Technologie bude nejprve uvedena do širších souvislostí letecké zabezpečovací techniky, načež budou představeny její výhody. Následně bude věnována pozornost popisu vývoje její implementace v provozu. Poté bude představen současný stav využití této technologie pro výpočty emisí letadel v rámci odborné literatury.

1.7.1 Technologie ADS-B v kontextu CNS systémů

V současnosti je v civilním letectví používána celá řada systémů, které přispívají k vyšší efektivitě, pružnosti a bezpečnosti jeho provozu. Pro tyto systémy se používá souhrnné označení – komunikační, navigační a přehledové (CNS; z angl. *communication, navigation and surveillance*) systémy. [66] Základní schéma rozdělení CNS systémů včetně vybraných příkladů a zvýraznění technologie ADS-B je na obr. 6.



Obrázek 6: Základní rozdělení CNS systémů včetně vybraných příkladů, se zvýrazněním technologie ADS-B

V kontextu této práce je relevantní poslední ze tří uvedených domén, tj. doména přehledová, která slouží především orgánům řízení letového provozu, ale i jiným subjektům, k získávání informací, respektive přehledu o aktuálním leteckém provozu. Pro tyto účely byl nejprve využíván tzv. primární přehledový radar (PSR, z angl. *primary surveillance radar*), založený na jednoduchém principu odrazu vyslaných elektromagnetických vln od cíle. Tento typ radaru umožňoval určení šikmé (nikoli však horizontální) vzdálenosti a zaměření cíle od zařízení. Technologický posun představoval tzv. sekundární přehledový radar (SSR, z angl. *secondary surveillance radar*), jehož princip spočívá ve vysílání dotazů letadlu pozemní stanicí na frekvenci 1 030 MHz s následným vysíláním odpovědí palubním odpovídačem na frekvenci 1 090 MHz. Nejprve se touto cestou vysílala pouze identifikace letadla ve formě čtyřmístného kódu (tzv. „squawk“) a jeho tlaková výška, a to prostřednictvím tzv. módu A, respektive módu C. Během 70. a 80. let 20. století vznikl protokol pro vysílání mnohem většího množství letových údajů, tzv. mód S. Tento protokol umožňoval selektivní dotazování konkrétních letadel pozemní stanicí, což přispělo k uvolnění dříve zahlcených radiofrekvenčních kanálů. V rámci módu S existují různé formáty zpráv, které určují strukturu vysílaných dat. Pro většinu formátů platí, že vysílání odpovědí palubním odpovídačem v konkrétním formátu sestupného spoje (DF, z angl. *downlink format*) je podmíněno přijetím dotazu od pozemní stanice v odpovídajícím formátu vzestupného spoje (UF, z angl. *uplink format*). Malá část těchto formátů však umožňuje automatické vysílání nevyžádaných odpovědí módu S (tzv. „squitter“). Na základě formátu DF 17 funguje technologie ADS-B. [66] [67] [68]

1.7.2 Výhody ADS-B

Mezi významné výhody ADS-B patří nízké náklady spojené s touto technologií, zejména ve srovnání se stávající infrastrukturou SSR. Jak bude blíže popsáno níže, díky tomu je



rozšiřování infrastruktury v podobě sítí ADS-B přijímačů poměrně snadné. Kromě řízení letového provozu mohou přehled o provozu prostřednictvím ADS-B IN získávat také letové posádky, což má nesporný pozitivní efekt v podobě zvýšení jejich situačního povědomí, a tedy zároveň celkové bezpečnosti (ADS-B IN je využíváno mj. v rámci tzv. hybridního sledování palubního protisrážkového systému ACAS). Toto získávání přehledu o okolních letadlech je navíc nezávislé na pozemním vybavení, tudíž může probíhat i nad odlehlými oblastmi, což je další výhodou této technologie. Jelikož ADS-B umožňuje snadno získat poměrně velký objem dat o letovém provozu, existuje zde rovněž značný potenciál využití těchto dat pro různé výzkumné účely. Přehled tohoto využití v rámci odborné literatury, konkrétně z pohledu problematiky emisí letadel, nabízí oddíl 1.7.4. Díky výše uvedeným výhodám je technologie ADS-B v současné době stále více prosazována v rámci různých států či regionů jakožto součást přehledové infrastruktury, jak blíže vysvětluje následující oddíl. [66] [67] [69]

Je zřejmé, že pro plné využití potenciálu ADS-B v podobě plošného přehledu o leteckém provozu a pro realizaci ostatních výše zmíněných výhod je zapotřebí mít adekvátní síť pozemních přijímačů. Pokrytí rozsáhlých odlehlých oblastí či oceánů těmito přijímači je problematické; jako efektivní řešení se ukazují konstelace vesmírných satelitů (např. firmy Aireon), které jsou schopny zajistit globální pokrytí ADS-B. Využití satelitů pro příjem ADS-B zpráv od letadel v současnosti využívá například Kanada. [67] [70] Zařízení schopná přijímat ADS-B zprávy jsou v současné době poměrně levná a snadno dostupná, díky čemuž může vlastní ADS-B přijímač v případě zájmu provozovat doma prakticky kdokoli. V současnosti existuje několik významných komerčních i neziskových organizací, které skrze dobrovolníky z řad uživatelů provozují vlastní globální síť ADS-B přijímačů, čítajících tisíce, ne-li desítky tisíc zařízení. Typicky má veřejnost na jejich webových stránkách možnost sledovat na mapě aktuální letový provoz, v některých případech je za určitých podmínek možné rovněž stahovat data, mj. pro výzkumné účely. Mezi nejznámější příklady těchto organizací patří FlightRadar24, FlightAware či OpenSky Network. [67]

1.7.3 Časový vývoj implementace ADS-B v Evropě a ve světě

Pro plnou realizaci výhod spojených s technologií ADS-B je zřejmá nutnost její plošné implementace v provozu. Ta je zajištěna prostřednictvím různých předpisových požadavků či mandátů vydávaných místními regulačními orgány. Zde bude ve stručnosti představen vývoj implementace ADS-B v Evropě a ve zbytku světa, kdy bude pozornost věnována zejména asijskému a americkému kontinentu.

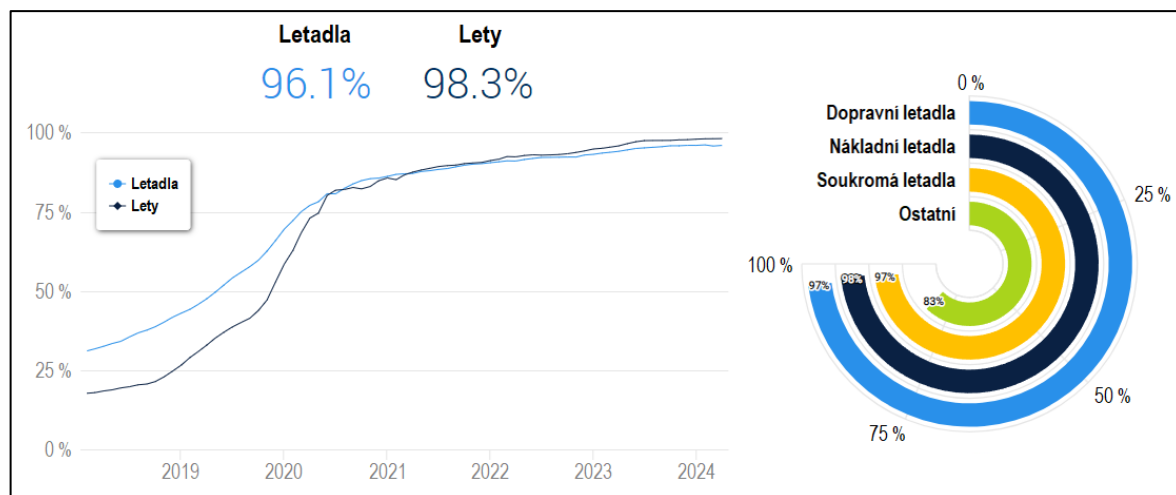


Implementace ADS-B v Evropě

Mandát na implementaci ADS-B v Evropě byl původně definován prováděcím nařízením Komise (EU) č. 1207/2011 ze dne 22. listopadu 2011, kterým se stanoví požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledu v jednotném evropském nebi. Toto prováděcí nařízení vzniklo mj. v souvislosti s iniciativou Jednotné evropské nebe (SES, z angl. *Single European Sky*) ve snaze dosáhnout maximální interoperability a výkonnosti v rámci evropského ATM. Předpis kromě jiného stanovil požadavek, aby všechna letadla s osvědčením letové způsobilosti poprvé vydaným dne 8. ledna 2015 či později, která provádějí IFR lety v rámci vzdušného prostoru, kde jsou členskými státy EU poskytovány letové provozní služby, byla vybavena odpovídačem SSR pracujícím s ICAO 24bitovou adresou letadla. Tyto odpovídače v případě letadel s MTOM nad 5 700 kg či s maximální cestovní pravou vzdušnou rychlostí nad 250 uzlů měly mít navíc schopnost vysílat data prostřednictvím technologie ADS-B (respektive ADS-B OUT). Letadla s datem prvního vydání osvědčení letové způsobilosti před 8. lednem 2015 měla po dodatečné zástavbě zařízení tyto požadavky splňovat do 7. prosince 2017. V případě některých požadavků bylo možné u určitých typů letadel udělit výjimky. [71]

Původní lhůty pro vybavenost technologií ADS-B OUT byly následně několikrát z různých důvodů posunuty. Například prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1028/2014 posunulo z technických důvodů lhůtu pro dovybavení letadel odpovídačem SSR se schopností ADS-B OUT ze 7. prosince 2017 na 7. červen 2020 [72]. Tuto lhůtu posunulo prováděcí nařízení Komise (EU) 2020/587 z důvodu pandemie COVID-19 o další půlrok, tedy na 7. prosince 2020, přičemž povinnost vybavení technologií ADS-B OUT se nyní týkala všech letadel s datem prvního vydání osvědčení letové způsobilosti 7. června 1995 a později. Výjimku měla tvořit pouze letadla letící za účelem provedení údržby či vývozu a letadla, jejichž provoz bude ukončen ke 31. říjnu 2025. V případě letadel s datem prvního vydání osvědčení letové způsobilosti před 7. prosincem 2020 byl za určitých podmínek umožněn odklad splnění této povinnosti, a to do 7. června 2023. [73] Původní prováděcí nařízení z roku 2011 včetně několika dalších bylo v roce 2023 zrušeno prováděcím nařízením Komise (EU) 2023/1770. Do tohoto nového prováděcího nařízení byly převzaty stávající požadavky ze zmíněných zrušených předpisů, přičemž z hlediska požadavků na vybavenost ADS-B OUT nedošlo k žádným změnám. [74]

Obrázek 7 ukazuje časový vývoj implementace technologie ADS-B verze 2 (standard EUROCAE ED-102A/RTCA DO-260B) v rámci oblasti spravované síťovým manažerem (NM, z angl. *Network Manager*), a to jednak z hlediska podílu provozovaných letadel (registrovaných v Evropě i jinde) a vykonávaných letů s touto technologií a jednak z pohledu aktuálního rozšíření technologie u jednotlivých kategorií letadel (stav k dubnu 2024).



Obrázek 7: Časový vývoj vybavenosti ADS-B v2 v rámci oblasti spravované NM (vlevo) a aktuální rozšíření technologie u jednotlivých kategorií letadel (vpravo) (stav k dubnu 2024) (upraveno z [75])

Jak bylo zmíněno výše, do konce října 2025 budou z provozu vyřazena letadla, která byla vyjmuta z aktuálních požadavků na implementaci ADS-B OUT. V té době bude zároveň stáří letadel, kterých se zmiňované požadavky netýkají (jejichž osvědčení letové způsobilosti bylo prvně uděleno před 7. červnem 1995), přesahovat 30 let. I u těchto letadel lze tedy výhledově očekávat jejich vyřazení z provozu, čímž bude v zásadě dokončena implementace technologie ADS-B OUT v rámci IFR provozu v Evropě.

Implementace ADS-B ve světě

Implementace technologie ADS-B není omezená pouze na Evropu; v současné době platí povinnost vybavení ADS-B OUT i v řadě dalších regionů světa, byť s různou mírou rozšíření. Například v USA platí povinnost vybavenosti technologií ADS-B OUT od 1. ledna 2020, přičemž se týká především vzdušného prostoru nad 18 000 ft nad mořem (AMSL, z angl. *above mean sea level*) (někde již nad 10 000 ft AMSL) či v okolí letišť (do 10 000 ft AMSL). V americké legislativě je tato povinnost stanovena federálním předpisem 14 CFR 91.225. Kromě vysílání prostřednictvím globálně používané technologie 1090 MHz ES umožňuje tento předpis pro lety pod 18 000 ft AMSL také vysílání 978 MHz UAT, nicméně tato technologie není jinde ve světě rozšířená. [76] [77] V sousední Kanadě je technologie ADS-B OUT povinná v rámci řízeného vzdušného prostoru nad 18 000 ft AMSL, a to od 10. srpna 2023. Od 16. května 2024 bude tato povinnost platit již od 12 500 ft AMSL. V řízených okrcích, koncových řízených oblastech letišť a v řízeném prostoru pod 12 500 ft AMSL je implementace ADS-B OUT aktuálně očekávaná až po roce 2028. Stejně jako v USA je v Kanadě platným standardem RTCA DO-260B, respektive technologie 1090 MHz ES. [70]

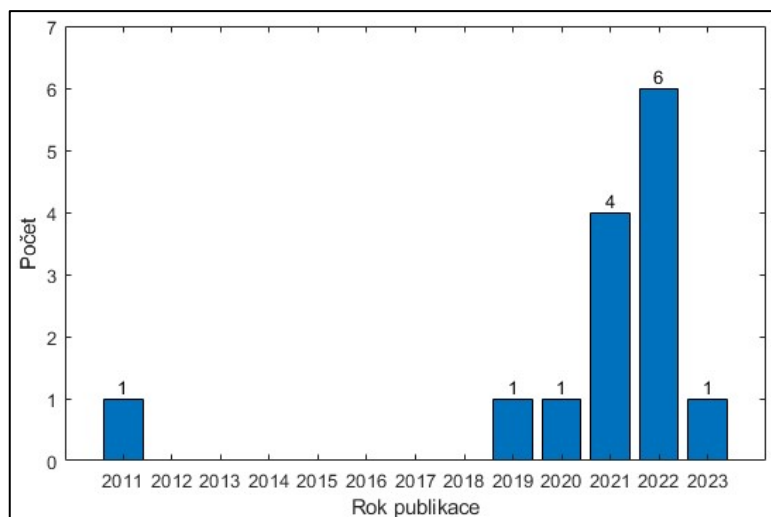
Kromě Evropy či Severní Ameriky je v současnosti ADS-B OUT vyžadováno také ve značné části Oceánie. Například na Novém Zélandě platí mandát ADS-B OUT od 1. ledna 2023 pro



celý řízený vzdušný prostor [78]. V Austrálii je technologie ADS-B OUT povinná pro veškerý IFR provoz již od roku 2017. Pro provoz dle pravidel pro let za viditelnosti (VFR, z angl. *visual flight rules*) sice není povinná, nicméně australský úřad pro civilní letectví ji pro tento druh provozu doporučuje. [79] Od 13. července 2023 platí mandát ADS-B OUT také v rámci Fidži [80]. Z asijských států platí plošný mandát ADS-B OUT například ve Spojených arabských emirátech, kde nařízení CAR-OPS 1.867 ADS-B (OUT and IN) ukládá povinnost vybavení touto technologií od 1. ledna 2020, a to v rámci celého vzdušného prostoru [81]. Také jinde v rámci tohoto kontinentu platí v současné době mandáty ADS-B OUT, tyto se však v mnoha případech týkají pouze traťového provozu nad určitou výškou, či pouze určených letových tratí. Jako příklad lze uvést Singapur, kde je tato technologie s výjimkou několika tratí povinná od 26. ledna 2023 ve vzdušném prostoru nad letovou hladinou FL290 [82]. Podobně například v Indii platí v současnosti mandát ADS-B OUT 1090 MHz ES na specifikovaných letových tratích nad letovou hladinou FL290, přičemž příslušné vybavení má splňovat požadavky stanovené EASA a FAA [83]. V jiných částech světa, především v Africe či Jižní Americe, v současnosti není až na některé výjimky technologie ADS-B OUT požadována. Nicméně je pravděpodobné, že mj. s ohledem na významné provozní výhody spojené s touto technologií lze i v těchto regionech v budoucnu očekávat její rozšíření a zavedení podobných mandátů.

1.7.4 Předchozí využití ADS-B v problematice emisí letadel

Jelikož se tato práce zabývá využitím technologie ADS-B pro zpřesnění výpočtů emisí letištních pohybů, byla provedena rešerše zaměřená na předchozí využití této technologie v rámci problematiky emisí letadel obecně. Vyhledávanými hesly bylo „ADS-B“ AND „emissions“. Pro rešerši byly využity citační databáze Scopus (53 výsledků) a Web of Science (29 výsledků). Z celkových 82 výsledků vyhledávání bylo nejprve odstraněno 27 duplicitních výsledků. Ze zbývajících 55 výsledků bylo následně 41 na základě názvu či abstraktu vyhodnoceno jako nevyhovující; ve výsledku tedy bylo nalezeno 14 relevantních článků. Jak ukazuje obr. 8, všechny byly s jednou výjimkou publikovány v roce 2019 či později, což svědčí o aktuálnosti zkoumané problematiky.



Obrázek 8: Počet nalezených článků zaměřených na ADS-B a emise podle roku publikace

Řada nalezených článků se zabývá obecným postupem využití ADS-B dat pro emisní výpočty. Wang et al. [84] ve své studii vytvořili metodiku výpočtu spotřeby paliva a emisí na základě ADS-B dat a historické databáze letů. V rámci LTO fáze letu pracovali s emisní databankou od ICAO, zatímco v rámci fáze CCD využili výkonnostní databázi BADA a výpočetní metodu BFFM2 od firmy Boeing; tyto byly použity i v řadě dalších zkoumaných článků. Časy jednotlivých provozních režimů v rámci LTO fáze letu byly zpřesněny s pomocí výše uvedených vstupních dat. Autoři zmínili některé limitace metodiky, například absenci některých důležitých parametrů v datech (především hmotnost letadla a konfigurace). Ve studii od Filippone et al. [85] se autoři zaměřili na postup sledování emisí vzniklých nad 3 000 ft, tedy mimo LTO cyklus. V rámci validace metodiky byla využita volně dostupná ADS-B data od neziskové organizace OpenSky Network odpovídající zhruba 2 500 letům čtyř různých typů letadel. Na tuto studii navázali Filippone a Parkes [86], kteří se zaměřili na emise vzniklé na krátkých linkách (méně než 300 námořních mil) v Evropě. Autoři zde vytvořili výpočetní model odhadující emise, a to i u typů letadel, jejichž motory nepodléhají emisní certifikaci (což je mnohdy případem letadel nasazovaných na tyto linky). Studie od Sun a Dedoussi [87] se zaměřila na postup využití ADS-B dat z OpenSky Network pro výpočty emisí letadel, přičemž byla využita data z Evropy za první čtyři měsíce roku 2020. Kromě toho se autoři zaměřili také na odhad environmentálních nákladů těchto emisí, a to z pohledu dopadů na klima a místní kvalitu ovzduší. Tyto náklady byly například rozděleny mezi jednotlivé letecké společnosti či letové informační oblasti. Filippone et al. [88] se ve své studii zabývali využitím ADS-B dat pro výpočty emisí u několika kategorií letadel (úzkotrupá a širokotrupá letadla, soukromá letadla, vrtulníky). Autoři se detailně zaměřili mj. na popis postupu zpracování ADS-B dat (resampling, filtrace, odstranění neplatných hodnot atd.) před jejich dalším použitím.



Část nalezených článků se zabývá problematikou využití ADS-B pro účely emisní inventarizace. V případě zohlednění jednotlivých letů se jedná o tzv. „bottom-up“ přístup tvorby emisních inventářů, které jsou sice přesnější, avšak náročnější na vytvoření. Například Quadros et al. [89] vytvořili v rámci své studie globální inventář emisí CO₂ a dalších látek za období 2017-2020 s využitím ADS-B dat ze dvou on-line zdrojů (konkrétně OpenSky Network a FlightRadar24) a historických dat od firmy OAG. Podle autorů spočívá výhoda ve využití ADS-B dat v tom, že jsou jimi pokryty také nepravidelné nákladní, vojenské či soukromé lety, které nejsou uvedeny v letových řádech. Ve studii od Klenner et al. [90] byl autory vytvořen emisní inventář civilního letectví v Norsku za rok 2019. V rámci studie bylo identifikováno několik klíčových vnitrostátních linek z hlediska podílu na celkové spotřebě paliva. Ve studii od Zhang et al. [91] se autoři věnovali tvorbě emisního inventáře civilního letectví v Číně za rok 2018. Kromě samotných emisí bylo sledováno také vertikální rozložení jednotlivých látek v atmosféře (v závislosti na výšce vypuštění). Výhoda využití ADS-B je dle autorů zejména znatelná v případě krátkých letů, kdy se může na výsledných emisních odhadech významněji projevit rozdíl mezi skutečně uletěnou a ortodromickou vzdáleností, která se pro zjednodušení standardně používá v modelech. Studie od Zhang et al. [92] se zabývala tvorbou emisního inventáře částic BC na letišti v Curychu. Sledované trajektorie dle ADS-B dat z OpenSky Network byly rozděleny do jednotlivých fází, přičemž byl kladen důraz na přesnější určení doby pojíždění jakožto fáze klíčové pro vznik těchto emisí. Následně byl autory modelován rozptyl těchto emisí v okruhu několika kilometrů kolem letiště.

Kromě emisní inventarizace byla technologie ADS-B v nalezených člancích využita i pro různé další účely. Například ve studii od Olive et al. [93] byla autory využita ADS-B data z OpenSky Network za dva podzimní měsíce roku 2019 k vyhodnocení efektivity různých postupů sekvencování přilétajících letadel (point merge, holding atd.) v rámci TMA na pěti evropských letištích. K jednotlivým trajektoriím byly přiřazeny odhady spotřeby paliva a emisí různých látek, přičemž výsledky pro jednotlivá letiště byly porovnány mezi sebou. Tait et al. [94] ve své studii využili ADS-B data z OpenSky Network k identifikování lokalit s vysokou hustotou provozu, kde následně modelovali kumulaci proudu spalín (angl. *aircraft plume*). Ta může mít dle autorů pozitivní klimatické dopady, například snížením potenciálu tvorby kondenzačních stop s delší životností. Ve studii od Xue et al. [95] se autoři zaměřili na linky mezi čtyřmi letišti v Číně, na nichž s pomocí ADS-B dat sledovali vývoj provozu v období let 2019 a 2020, tedy před a během pandemie COVID-19. Kromě objemu provozu se zaměřili také na spotřebu paliva a s tím související vzniklé emise. Autoři rovněž sledovali změny v typech letadel nasazovaných na linky v reakci na pokles poptávky po letecké dopravě. Hilpert et al. [96] ve své studii navrhli systém monitoringu emisí v rámci nákladní letecké dopravy. V navrhované architektuře systému využili ADS-B data doplněná o další data od amerického úřadu FAA,



obsahující bližší časové údaje o sledovaných letech, a databázi emisních charakteristik pro jednotlivé typy letadel. Vypočítané emise za daný let byly následně rozpočítány mezi jednotlivé přepravované zásilky. Sun et al. [97] se zaměřili na emise zhruba 250 soukromých letadel sledovaných prostřednictvím dostupných ADS-B dat z OpenSky Network po dobu necelých čtyř let. Podle autorů byla těmto emisím doposud věnována spíše pouze okrajová pozornost, ačkoli se jedná o značně neekologickou formu cestování z pohledu emisí přepočtených na cestující, kteří, jak bylo ukázáno, navíc mnohdy létají i několikrát týdně.

1.8 Datový formát ASTERIX

Závěrem první kapitoly této práce bude představen princip datového formátu ASTERIX, který byl vyvinut organizací EUROCONTROL a v současnosti je využíván pro přenos přehledových dat. Po krátkém obecném úvodu bude následovat popis struktury dat přenášených v rámci tohoto formátu, jež byla využita i v této práci.

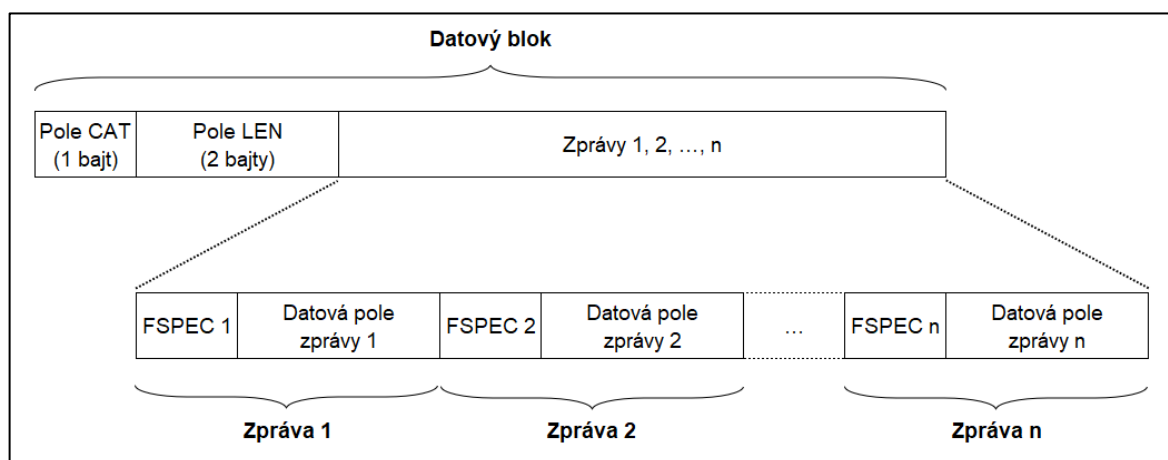
1.8.1 Úvod do distribuce přehledových dat prostřednictvím formátu ASTERIX

Vzhledem k mezinárodní povaze letectví je pro zajištění vysoké efektivity a bezpečnosti řízení letového provozu v rámci daného regionu důležité sdílení celé řady přehledových dat napříč systémy spadajícími pod ANSP jednotlivých zúčastněných států. Za účelem harmonizace tohoto sdílení vznikly v Evropě ve druhé polovině 80. let 20. století specifikace datového formátu ASTERIX (All-purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange). [69] [98] Tyto specifikace určují strukturu a uspořádání sdílených dat, a to na úrovni jednotlivých posílaných bitů. V současnosti je za vývoj nových verzí formátu a údržbu platné dokumentace zodpovědná skupina ASTERIX Maintenance Group (AMG), která spadá pod organizaci EUROCONTROL. Jelikož formát ASTERIX pokrývá širokou škálu přehledových dat, jsou tato data uspořádána do tzv. datových kategorií. Těch může být současně definováno až 256, přičemž v rámci každé datové kategorie (označované jako CAT 000 až 255) jsou specifikována data, která mají být jejím prostřednictvím přenášena. [69] [98] [99] Například kategorie CAT 004 je věnována datům týkajícím se tzv. safety net systémů, zatímco kategorie CAT 019 a 020 se využívají pro přenos dat týkajících se MLAT. Pro účely této práce je podstatná kategorie CAT 021, obsahující informace získané z ADS-B zpráv přijatých pozemními stanicemi. [69] [98] Specifikace jednotlivých datových kategorií bývají v čase aktualizované prostřednictvím tzv. edicí; data poskytnutá pro účely této práce v rámci kategorie CAT 021 odpovídala konkrétně edici 2.1.

1.8.2 Struktura dat ve formátu ASTERIX

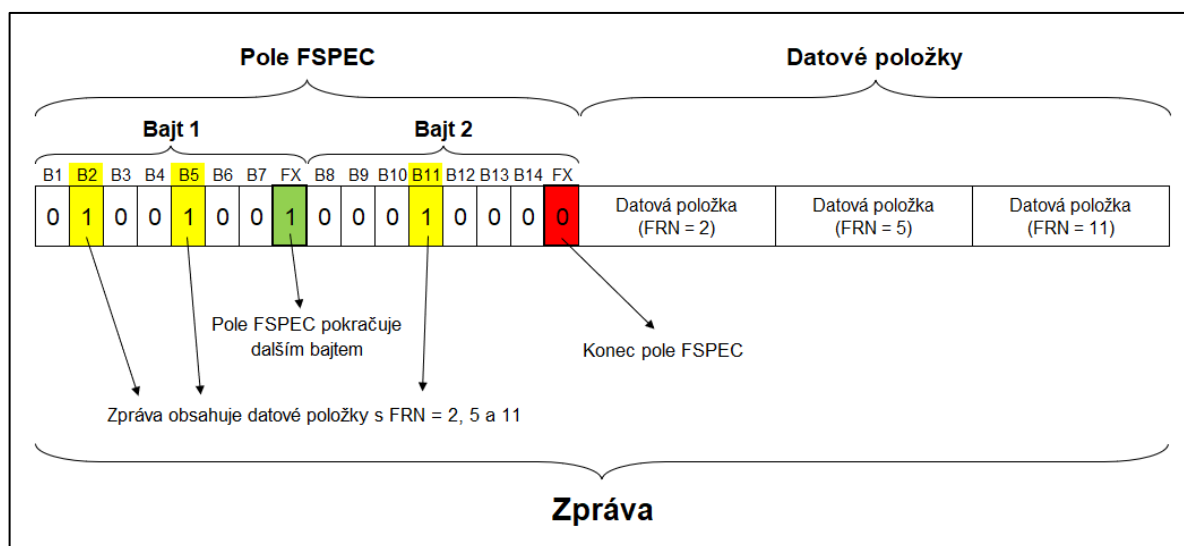
Ačkoli jsou v rámci formátu ASTERIX definované jednotlivé datové kategorie, existují určité společné náležitosti platné pro všechny tyto kategorie, jejichž popis je předmětem tohoto oddílu. Tyto obecné náležitosti jsou popsány v první části (Part 1) dokumentace k formátu ASTERIX [98]. Specifikace jednotlivých datových kategorií včetně popisu přenášených dat jsou dále popsány zvlášť v dalších částech; v případě kategorie CAT 021 se jedná o dvanáctou část (Part 12) [100]. Je na místě upřesnit, že následující popis vychází z dokumentace platné v době vzniku edice 2.1 kategorie CAT 021, v níž byla poskytnuta data pro tuto práci. Jedná se tedy o popis principů struktury poplatný poskytnutým datům. Nicméně lze konstatovat, že ani s příchodem novějších edicí formátu ASTERIX nedošlo u popisovaných principů k zásadním změnám, které by popis učinily zastaralým.

K pochopení základních principů kolem struktury dat posílaných v rámci formátu ASTERIX je žádoucí nejprve definovat několik klíčových pojmů. Posílaná data odpovídající určité datové kategorii bývají uspořádána do tzv. datových bloků (angl. *data block*). Tyto datové bloky vždy obsahují minimálně jednu zprávu (angl. *record*). Pro každou datovou kategorii je definována množina datových položek (angl. *data items*), které mohou být obsaženy v těchto zprávách. Každé datové položce je v rámci zprávy věnováno tzv. datové pole (angl. *data field*), obsahující bity nesoucí informace týkající se této konkrétní datové položky. Každý datový blok vždy začíná datovým polem CAT, které určuje datovou kategorii dat v něm obsažených. K určení délky datového bloku (a tedy jednoznačnému rozlišení jednotlivých datových bloků během dekódování) slouží datové pole LEN, které následuje za polem CAT a které určuje celkovou délku daného datového bloku (včetně polí CAT a LEN). [98] Pro přehledné znázornění struktury dat ve formátu ASTERIX slouží doplňující ilustrace na obr. 9.



Obrázek 9: Základní struktura dat ve formátu ASTERIX

Jelikož ve zprávě nemusejí být vždy obsaženy všechny datové položky odpovídající dané datové kategorii, začíná každá zpráva datovým polem Field Specification (FSPEC), které prostřednictvím hodnot svých bitů upřesňuje přítomnost jednotlivých datových položek ve zprávě (0 – nepřítomna, 1 – přítomna). Aby bylo možné zprávy dekódovat, určuje tzv. User Application Profile (UAP) pořadí, v jakém jsou jednotlivé datové položky seřazeny ve zprávě. Každá datová položka v rámci dané datové kategorie má své vlastní Field Reference Number (FRN) číslo, přičemž datové položky ve zprávách jsou seřazeny vzestupně podle tohoto čísla. Pole FSPEC se může skládat z různého počtu oktětů (bajtů) v závislosti na počtu datových položek obsažených ve zprávě. Každý bajt je zakončen tzv. Field Extension Indicator (FX) bitem, který rozhoduje o případném pokračování pole. [98] Názorná ukázka struktury zprávy včetně ilustrace principu pole FSPEC je zobrazena na obr. 10.



Obrázek 10: Struktura zprávy ve formátu ASTERIX včetně pole FSPEC a obsažených datových položek

Jak již bylo řečeno, přenášená data bývají rozdělena do tzv. oktětů, tedy osmic bitů neboli bajtů (angl. *byte*). V rámci bajtů jsou bity číslovány zprava doleva; výjimkou je pole FSPEC, kde jsou bity číslovány zleva doprava, přičemž pro číslování bitů uvnitř těchto bajtů se uplatňuje stejný princip (tj. číslování zprava doleva, přičemž číslování není ohraničeno jednotlivými bajty, ale celým datovým polem). Všechny délky, ať už celých datových bloků či datových polí, jsou udávány právě v bajtech. Jelikož se každý bajt skládá z osmi bitů, přičemž každý bit může nabývat hodnot 0 a 1, může jeden bajt nabývat celkem 256 (2^8) různých hodnot (0-255). Je zřejmé, že tato skutečnost má vliv na definici jednotlivých datových položek z pohledu počtu bajtů potřebných pro přenos dané informace, tedy délky příslušného datového pole. Stejně tak má například pole CAT délku právě jeden bajt; proto může být současně definováno maximálně 256 různých datových kategorií. [98]



Jak již bylo řečeno, každá datová položka je v rámci zprávy realizována prostřednictvím datového pole. Datová pole odpovídající datovým položkám mohou mít různě definované délky (vždy však v bajtech). V rámci popisu dané datové položky v dokumentaci je vždy uveden typ datového pole z hlediska délky. Datové pole standardního typu může být: [98]

- Datové pole pevné délky (*Fixed Length Data Field*) – Datové pole má pevně danou, neměnnou délku.
- Datové pole rozšířené délky (*Extended Length Data Field*) – Datové pole obsahuje primární část o předem stanovené délce, přičemž podle potřeby následují sekundární části o předem stanovených délkách. O pokračování datového pole další sekundární částí rozhoduje poslední bit předcházející části; tzv. FX bit (viz výše).
- Datové pole explicitní délky (*Explicit Length Data Field*) – Hodnota prvního bajtu datového pole udává celkovou délku datového pole (včetně tohoto prvního bajtu).
- Datové pole s opakovaným obsahem (*Repetitive Data Field*) – Hodnota prvního bajtu datového pole udává počet opakování podpolí o stejné, předem upřesněné délce.
- Složené datové pole (*Compound Data Field*) – Datové pole se skládá z primárního podpole a sekundárních podpolí. Primární podpole je v podstatě datovým polem rozšířené délky, které hodnotami svých bitů určuje přítomnost jednotlivých sekundárních podpolí (analogicky k poli FSPEC). Sekundární podpole mohou být všech čtyř výše uvedených typů, přičemž popis každého sekundárního podpole je součástí dokumentace k dané datové položce.

Kromě výše uvedených datových polí standardního typu existují i nestandardní datová pole. Prvním příkladem je tzv. datové pole pro speciální účely (SP; z angl. *Special Purpose Data Field*), které slouží pro přenos informací nad rámec definovaných datových položek, a to na základě dohody zúčastněných stran. Tyto informace zpravidla nejsou pro ostatní uživatele podstatné. Druhým příkladem je tzv. vyhrazené rozšiřující datové pole (RE; z angl. *Reserved Expansion Data Field*), které může být v rámci datových kategorií uplatněno různě; zpravidla však pro poskytnutí dodatečných informací. Jeho obsah již není domluven zúčastněnými stranami, ale přímo skupinou AMG, přičemž pro jednotlivé datové kategorie bývá typicky využití tohoto pole popsáno v příslušné dokumentaci. V rámci pole FSPEC jsou polím SP a RE přiděleny příslušné bity upřeshňující jejich přítomnost v dané zprávě; v rámci UAP jsou zpravidla uvedeny až na konci (tj. mají nejvyšší FRN). [98] [100]



2 Metodika řešení

V této kapitole bude postupně popsána zvolená metodika řešení v rámci této práce. Nejprve bude popsán postup dekódování poskytnutých dat obsahujících ADS-B zprávy z provozu ve formátu ASTERIX. Následně bude popsán postup dalšího zpracování a analýzy těchto zpráv. Slovní popis postupu bude pro větší přehlednost podle potřeby různě doplňován segmenty použitého kódu či vývojovými diagramy popisujícími jednotlivé rozebírané algoritmy.

2.1 Dekódování dat ve formátu ASTERIX

Jak již bylo naznačeno výše, pro účely této práce byla státním podnikem Řízení letového provozu České republiky (ŘLP ČR) poskytnuta data týkající se ADS-B zpráv z provozu ve formátu ASTERIX, konkrétně edice 2.1 kategorie CAT 021. Poskytnutá data pokrývala Letiště Václava Havla Praha (LKPR) a okolní oblast. Za účelem dekódování těchto dat byl vytvořen vlastní dekódovací skript v programovém prostředí MATLAB, které bylo zvoleno pro veškeré zpracování a následnou analýzu dat v rámci této práce. Cílem této podkapitoly je popsat princip jeho fungování a vysvětlit tak postup dekódování poskytnutých dat pro další použití.

2.1.1 Prvotní načtení dat

Prvním krokem práce s daty bylo jejich načtení do pracovního prostředí MATLAB. Data byla poskytnuta v souborech rozdělených dle jednotlivých dnů z období měření, které představovalo celkem 14 dní, konkrétně mezi 17. a 30. červnem 2023. Každý z poskytnutých souborů byl načten a následně zpracován jednotlivě.

Pro načtení binárních dat byla použita funkce `fread`. Tato funkce načítá data z otevřeného datového souboru do sloupcového vektoru, nejprve je tedy nutné soubor otevřít v pracovním prostředí pomocí funkce `fopen`. Jeden z možných vstupních argumentů této funkce, který zde byl uplatněn, slouží k upřesnění, za jakým účelem probíhá otevření datového souboru – zda pro pouhé načtení dat či např. pro přepis dat v souboru. Po přečtení dat ze souboru jej lze uzavřít pomocí funkce `fclose`. Výhodou funkce `fread` je, že data standardně načítá po jednotlivých bajtech, čehož bylo následně využito při dekódování zpráv ve formátu ASTERIX, kde jsou data uspořádaná právě po bajtech. [101] Níže je ukázka použití těchto funkcí v kódu:

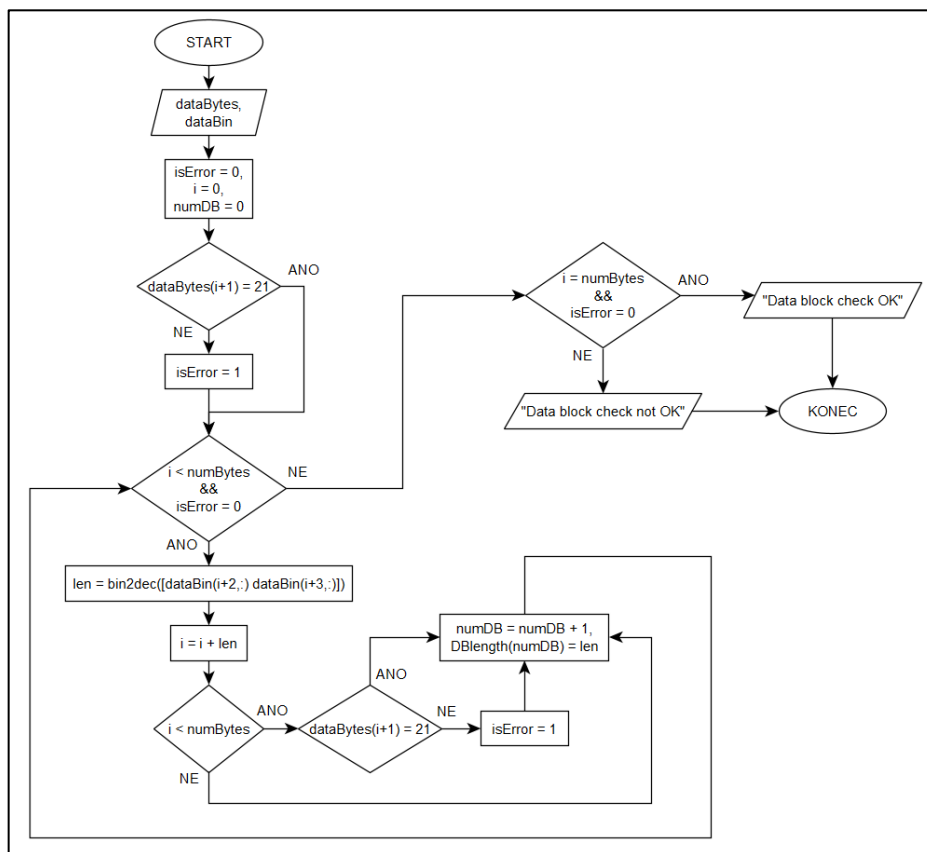
```
filename = 'sampledatafile.ast';

% načtení binárních dat
fileID = fopen(filename, 'r'); % argument 'r' - otevření pouze pro čtení
dataDec = fread(fileID);
fclose(fileID);
```


Načtená data se nyní nacházela ve sloupcovém vektoru o délce $numBytes$ shodné s počtem načtených bajtů, přičemž každý prvek tohoto vektoru měl hodnotu v rozmezí 0 až 255, která reprezentovala daný bajt. Jak je známo, jeden bajt je tvořen osmi bity. Jelikož ASTERIX řeší data na úrovni jednotlivých bitů, bylo nutné načtené bajty převést do binárního zápisu. Toho bylo docíleno pomocí funkce `dec2bin`, která původní sloupcový vektor převedla na matici typu znak (*char*) o rozměru $numBytes \times 8$. Právě s touto maticí bylo pracováno po zbytek procesu dekódování dat.

2.1.2 Kontrola datových bloků

Po načtení byla data zkontrolována z hlediska schopnosti jednoznačného rozlišení jednotlivých datových bloků dekódovacím skriptem. Jak bylo zmíněno v oddílu 1.8.2, každý datový blok formátu ASTERIX vždy začíná polem CAT tvořeným jedním bajtem, jehož hodnota určuje kategorii dat. V případě ADS-B dat, která odpovídají kategorii CAT 021, tedy musí být hodnota tohoto pole vždy 21 (binárně „00010101“). Po tomto poli následuje pole LEN, které udává celkovou délku datového bloku v bajtech. Na základě informací obsažených v těchto dvou polích bylo tedy možné kontrolu provést. Současně byla pro další použití spolu s počtem datových bloků uložena délka každého z nich. Algoritmus této kontroly je graficky znázorněn prostřednictvím vývojového diagramu na obr. 11.

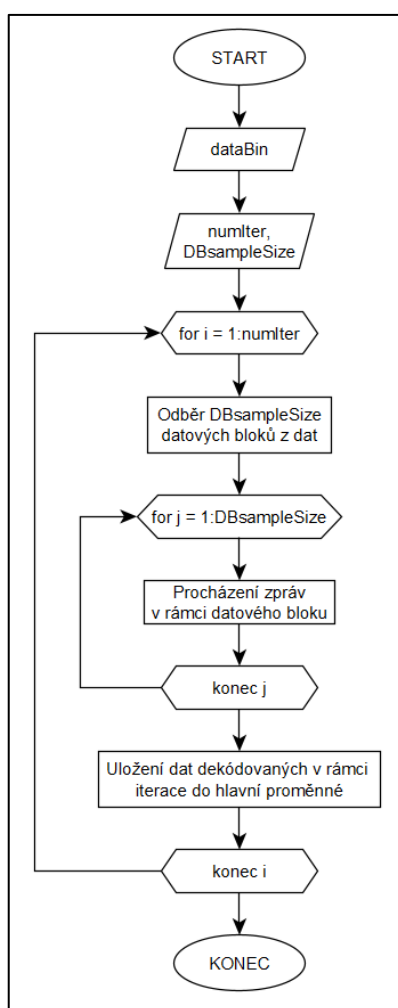


Obrázek 11: Algoritmus pro kontrolu datových bloků a určení jejich počtu a délek

Zjednodušeně lze říci, že až do dosažení konce dat, respektive posledního bajtu, bylo pokaždé zkontrolováno, že první bajt za posledním identifikovaným datovým blokem definovaným délkou v poli LEN odpovídá poli CAT, tj. že jeho hodnota je rovna 21. Na konci bylo zkontrolováno, že žádný bajt nepřebývá, tedy že všech *numBytes* bajtů bylo možné přiřadit některému z identifikovaných datových bloků. Kromě toho bylo zkontrolováno, že v průběhu procházení dat nebyla detekována žádná chyba z hlediska hodnoty pole CAT. V případě úspěšné kontroly byla data nyní připravena na dekódování.

2.1.3 Dekódování datových bloků

Předchozí kontrola byla zapotřebí i z toho důvodu, že pro dekódování dat bylo nutné získat informace o počtu datových bloků a jejich individuálních délkách v bajtech. Samotný algoritmus dekódování dat byl založen na principu postupného odebírání datových bloků z celkových dat a následném procházení v nich obsažených zpráv. Základní princip algoritmu je slovně popsán pomocí vývojového diagramu na obr. 12. Uvedeny jsou zde hlavní kroky, a to slovním popisem, nikoli pomocí kódu. Jednotlivé kroky budou blíže vysvětleny dále.



Obrázek 12: Základní princip algoritmu dekódování dat ve formátu ASTERIX



Jak vyplývá z vývojového diagramu, pro každou iteraci byl z celkových dat pokaždé nejprve odebrán vzorek o pevně daném počtu (*DBsampleSize*) datových bloků, přičemž jednotlivé datové bloky byly následně odebírány až z tohoto vzorku. Prakticky bylo toto realizováno prostřednictvím dvou vnořených for-cyklů namísto jednoho velkého. Důvodem pro volbu tohoto postupu bylo snížení výpočetní náročnosti, respektive celkového počtu iterací v rámci jednoho for-cyklu. Jak se totiž ukázalo během programování skriptu v MATLABu, při větším počtu iterací for-cyklu obecně postupně klesá výpočetní rychlost. Celkový počet procházených datových bloků v rámci jednoho spuštění skriptu byl tedy nastaven manuálně, a to prostřednictvím dvou parametrů – počet iterací (*numIter*) a počet datových bloků procházených v rámci jedné iterace (*DBsampleSize*) – přičemž celkový počet procházených datových bloků se rovnal součinu hodnot těchto dvou parametrů.

Prvním krokem v rámci každé iterace bylo tedy odebrání vzorku obsahujícího *DBsampleSize* datových bloků z celkových dat. Jak ukazuje segment kódu ze skriptu níže, nejprve byl definován vektor indexů řádků (*dataidxs*), které mají být odebrány z matice celkových dat. Způsob, jakým byl tento vektor definován, zohledňoval možnost opakovaného spuštění skriptu v případě rozsáhlých dat, kdy jediné spuštění by znamenalo příliš velký počet iterací navzdory vnořeným for-cyklům. Součástí definice vektoru byla dále proměnná *currentDB*, která svojí hodnotou udávala pořadí posledního zpracovaného datového bloku v rámci dat (tedy jakási „paměťová“ proměnná pro další spuštění skriptu). Pro určení indexů řádků patřících do aktuálního vzorku byl rovněž využit vektor délek jednotlivých datových bloků v bajtech (*DBlength*). Kód pro vybrání vzorku z celkových dat je uveden níže:

```
% vzorek z celkových dat pro danou iteraci
dataidxs =
(sum(DBlength(1:currentDB))+1):(sum(DBlength(1:currentDB))+sum(DBlength(currentDB
+1:currentDB+DBsampleSize))); % vektor indexů odebraných řádků

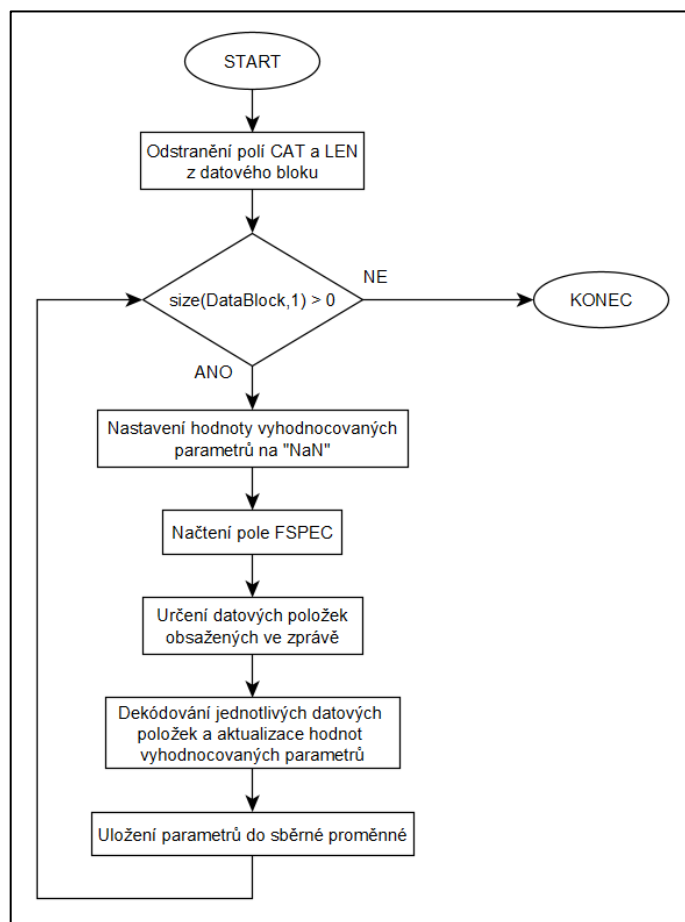
dataBinSample = dataBin(dataidxs,:); % vzorek z celkových dat
```

V cyklu pro každý datový blok byla nejprve aktualizována proměnná *currentDB* indikující pořadí aktuálního datového bloku. Následně byly ze vzorku dat vybrány řádky odpovídající zkoumanému datovému bloku (index 1 až délka datového bloku z vektoru *DBlength*), přičemž tyto řádky byly pro reprodukovatelnost tohoto způsobu indexace ze vzorku smazány.

```
currentDB = currentDB + 1;

% načtení aktuálního datového bloku + smazání ze vzorku z celkových dat
DataBlock = dataBinSample(1:DBlength(currentDB),:);
dataBinSample(1:DBlength(currentDB),:) = []; % smazání ze vzorku, aby byl 1. řádek
vždy nový datový blok
```

Jak již bylo popsáno prostřednictvím obr. 9 v oddílu 1.8.2, každý datový blok ve formátu ASTERIX se skládá z úvodních polí CAT a LEN, následovaných určitým počtem zpráv. Jelikož již jednak byla ověřena kategorie dat a jednak byla známá délka datového bloku, byla tato pole z aktuálního datového bloku odstraněna. V rámci datového bloku tak již zbývaly pouze jednotlivé zprávy. Algoritmus jejich procházení včetně předcházejícího odstranění úvodních polí CAT a LEN je graficky znázorněn pomocí vývojového diagramu na obr. 13, přičemž byl pro jednoduchost opět zvolen slovní popis.



Obrázek 13: Základní algoritmus procházení jednotlivých zpráv v rámci datového bloku

Jelikož počet zpráv obsažených v rámci datového bloku může být různý, byl algoritmus založený na opakovaném ověření počtu zbývajících bajtů, respektive počtu řádků (pomocí funkce `size`) zbývajících v rámci matice obsahující bajty vztahující se k aktuálnímu datovému bloku. Pokud byl tento počet nenulový, musela se v rámci datového bloku vyskytovat dosud nedekódovaná zpráva, která byla zpracována následujícím způsobem. Prvním krokem bylo nastavení hodnot všech vyhodnocovaných parametrů na NaN (nečíslo; z angl. *Not a Number*); jelikož se po zpracování každé zprávy veškeré parametry ukládaly do nového řádku sběrné proměnné, byly tímto způsobem rozlišeny parametry, které nebyly ve zprávě obsaženy a jejichž hodnoty tak nebyly aktualizovány o dekodovaná data. Druhým krokem bylo načtení



pole FSPEC. S jistotou v něm byl obsažen pouze první řádek, respektive bajt. Pro zjištění, zda pole pokračovalo i dalšími bajty, byla pokaždé vyhodnocena hodnota bitu FX (viz oddíl 1.8.2). Jednotlivé bajty tvořící toto pole byly postupně s výjimkou bitu FX spojeny dohromady, čímž bylo ve výsledku načteno celé toto pole. Zároveň byly jednotlivé řádky tvořící toto pole odmazány z matice datového bloku. Postup načtení pole FSPEC včetně následného určení datových položek obsažených v dané zprávě je v segmentu kódu níže:

```
% načtení pole FSPEC dané zprávy
FSPEC = DataBlock(1,1:end-1); % načtení prvního řádku do pole
FSPEC_FX = DataBlock(1,end); % bit FX na konci prvního řádku
DataBlock(1,:) = []; % smazání prvního řádku z dat k datovému bloku

while FSPEC_FX == '1' % kontrola pokračování pole FSPEC
    FSPEC = [FSPEC DataBlock(1,1:end-1)]; % doplnění FSPEC o další řádek
    FSPEC_FX = curDataBlock(1,end); % nový bit FX
    DataBlock(1,:) = []; % smazání řádku
end

% indexy datových položek obsažených v dané zprávě
idxsDataItems = []; % prázdná proměnná pro vektor zapsaných indexů
for FRN = 1:length(FSPEC)
    if FSPEC(FRN) == '1'
        idxsDataItems = [idxsDataItems FRN]; % zápis indexu do vektoru
    end
end
```

Určení datových položek obsažených v dané zprávě proběhlo podle již popsaného principu, kdy pořadí bitu v rámci pole FSPEC korespondovalo s hodnotou čísla FRN, které je pro změnu uvedeno v UAP definované pro danou kategorii dat.

Jakmile byly určeny datové položky obsažené v aktuálně zkoumané zprávě, následovalo jejich dekódování. V rámci for-cyklu byl pro každý prvek vektoru `idxsDataItems` obsahujícího čísla FRN datových položek obsažených v aktuálně dekódované zprávě prostřednictvím příkazu `switch-case` nalezen příslušný kód pro dekódování dané datové položky. Například, pokud byla hodnota prvního prvku vektoru indexů rovna 11, byl pomocí tohoto příkazu nejprve nalezen kód pro dekódování datové položky s `FRN = 11`. Pro ukázkou je níže uveden kód pro dekódování datové položky s tímto FRN, která představuje 24bitovou adresu odpovídače:

```
case 11 % I021/080 - Target Address
% Definition: Target address (emitter identifier) assigned uniquely to each
target.
% Format: Three-octet fixed length Data Item.

% načtení příslušných bajtů z matice obsahující data k datovému bloku
address24bit = [DataBlock(1,:) DataBlock(2,:) DataBlock(3,:)];
% dekódování datové položky
address24bit = bin2dec(address24bit); % převod na desítkové číslo
```



```
address24bit = string(dec2hex(address24bit)); % převod na hexadecimální formát a  
následně na typ string  
  
DataBlock(1:3,:) = []; % smazání všech řádků odpovídajících dekódované datové  
položce z matice dat datového bloku
```

Z ukázky kódu vyplývají dvě skutečnosti. První skutečností je, že proměnná odpovídající výsledku dekódování datové položky byla převedena na datový typ string. Důvodem pro tento převod bylo zachování kompatibility z hlediska společného uložení numerických i textových parametrů (např. zeměpisná šířka a hexadecimální 24bitová adresa) do jediné proměnné, jak bude dále popsáno níže. Druhou skutečností je, že po dekódování datové položky byly z matice dat aktuálního datového bloku pokaždé odstraněny všechny řádky příslušející této položce. Důvodem byl způsob indexace řádků vybíraných z matice, která, jak je patrné z příkladu kódu nahoře, vždy začínala hodnotou 1 a končila počtem bajtů obsažených v rámci dané datové položky.

Po dekódování všech datových položek obsažených v dané zprávě byly všechny vyhodnocované parametry zapsány do nového řádku sběrné proměnné, a to bez ohledu na to, zda měly stále hodnotu NaN, nebo hodnotu aktualizovanou během dekódování. Tento proces zápisu do sběrné proměnné se opakoval jednak pro každou další zprávu v rámci aktuálního datového bloku a jednak pro všechny datové bloky obsažené ve vzorku vybraném v rámci jedné iterace z celkových dat. Na konci iterace byla tato sběrná proměnná sloučena s hlavní proměnnou obsahující veškerá dekódovaná data, načež byl její obsah pro další iteraci smazán. V případě dekódování většího objemu dat bylo možné definovat současně několik hlavních proměnných, kdy každá byla naplněna v rámci jednoho spuštění skriptu. Jak již bylo zmíněno, skript byl naprogramován tak, aby umožňoval opakované spuštění, přičemž poslední procházený datový blok by byl uchován v „paměti“ skriptu prostřednictvím již zmíněné hodnoty *currentDB*, tudíž by data nebyla při novém spuštění procházena od začátku, ale až od posledního dekódovaného datového bloku. V případě současného definování několika hlavních proměnných by bylo před každým novým spuštěním nutné upřesnit, do které z nich mají být ukládána data z průběžně plněných sběrných proměnných, přičemž na konci by tyto hlavní proměnné byly sloučeny do jediné, „skutečně“ hlavní proměnné obsahující veškerá dekódovaná data pro další použití. Nicméně závěrem je na místě doplnit, že tato situace v rámci dekódování poskytnutých dat nakonec nenastala.



2.2 Zpracování dekódovaných ADS-B zpráv

Po dekódování poskytnutých dat ve formátu ASTERIX dle postupu popsáno výše bylo před analýzou těchto zpráv nejprve nutné jejich zpracování, jehož popisu se věnuje tato podkapitola.

2.2.1 Filtrace relevantních ADS-B zpráv

První fáze zpracování dekódovaných ADS-B zpráv spočívala v odstranění všech pro práci nepodstatných zpráv, což bylo realizováno ve třech krocích, které budou v rámci tohoto oddílu postupně popsány.

První krok spočíval v rozlišení, zda byla daná zpráva relevantní z pohledu kategorie jejího zdroje, respektive vysílajícího zařízení. Dekódovaná data zahrnovala všechny přijaté ADS-B zprávy, a to bez ohledu na to, zda se jednalo o zprávy od letadel na LKPR či jiných letištích, letadel letících po trati nebo například letištních pozemních prostředků. V podkapitole 1.7 bylo řečeno, že technologie ADS-B je založená na formátu DF 17 módu S. Kromě tohoto formátu však pro civilní použití rovněž existuje doplňkový formát sestupného spoje DF 18, který je mj. využíván zařízeními jinými, než jsou palubní odpovídače letadel, k vysílání ADS-B zpráv. Tato zařízení bývají typicky součástí pozemních prostředků na letištích, přičemž tento formát byl definován, aby nedocházelo k dotazování těchto zařízení ostatními zařízeními či palubními odpovídači v rámci ACAS. [68] [69] V rámci datového formátu ASTERIX je definována datová položka I021/020 – Emitter Category o jednom bajtu, která určuje kategorii jednotky vysílající danou zprávu. Pro edici 2.1 je takto rozlišeno celkem 18 kategorií, mezi něž patří například rotorová letadla, bezpilotní zařízení, letištní pozemní prostředky či kluzáky. [100] Seznam kategorií, které byly pro práci relevantní, je uveden v tab. 4 níže. Pro názvy jednotlivých kategorií zařízení byly použity jejich doslovné překlady z dokumentace [100].

Tabulka 4: Povolené kategorie zařízení vysílajících ADS-B zprávy dle formátu ASTERIX [100]

Číslo kategorie dle dokumentace	Kategorie zařízení
1	Lehká letadla (hmotnost do 7 000 kg)
2	Malá letadla (hmotnost v rozmezí 7 000-34 000 kg)
3	Střední letadla (hmotnost v rozmezí 34 000-136 000 kg)
4	Velká letadla s výraznými víry v úplavu
5	Těžká letadla (hmotnost nad 136 000 kg)
6	Letadla s vysokou manévrovatelností (schopnost zrychlení 5 g) a vysokou cestovní rychlostí (nad 400 uzlů)



Jelikož tato datová položka nebyla součástí všech přijatých zpráv ve formátu ASTERIX, bylo nutné zvolit alternativní postup než prosté smazání všech zpráv s jinou než povolenou hodnotou kategorie. Platilo, že pro každou zprávu byla vždy dostupná 24bitová ICAO adresa vysílajícího zařízení. Pro každou tuto adresu byla tedy určena nejčastěji vysílaná hodnota kategorie vysílajícího zařízení, přičemž následně byly z dat odstraněny všechny zprávy příslušející těm adresám, u nichž byla takto určena jiná než povolená kategorie (tj. hodnota mimo interval 1-6). Filtrace zpráv dle kategorie vysílajícího zařízení byla provedena pomocí kódu uvedeného níže:

```
addresses = unique(data(:,13)); % jedinečné adresy obsažené v datech

addrEmitCat = 0; % proměnná pro kategorii zařízení dané adresy

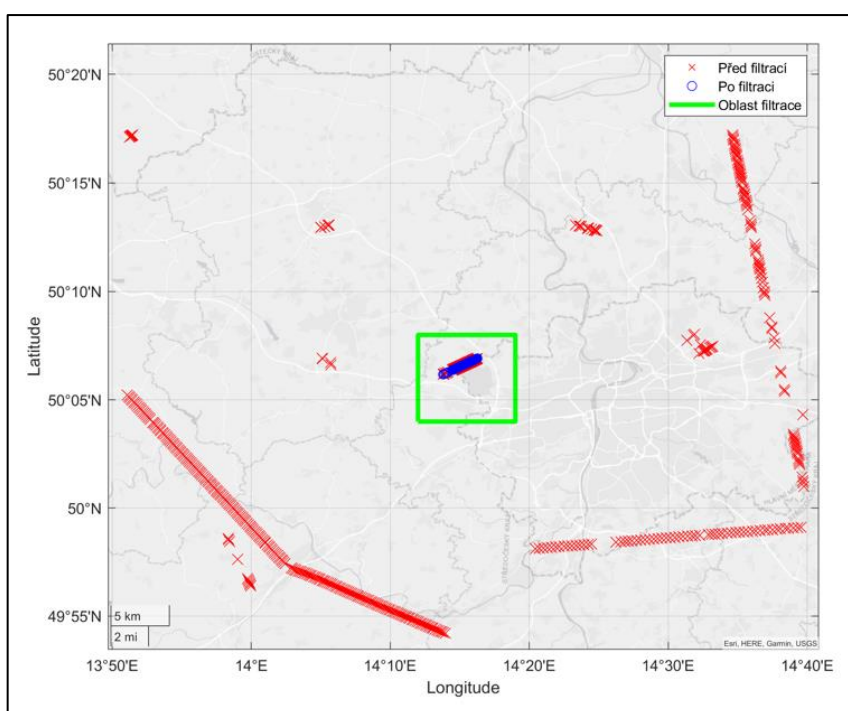
% procházení jednotlivých adres
for i = 1:size(addresses,1)
    % zjištění kategorie zařízení každé adresy
    emitCat = double(data(data(:,13) == addresses(i),32));
    addrEmitCat = mode(emitCat); % mód - nejčastější hodnota

    % odstranění všech zpráv u adres s kategorií zařízení mimo interval 1-6
    if addrEmitCat >= 1 && addrEmitCat <= 6 % povolený interval kategorií (1-6)
    else
        data(data(:,13) == addresses(i),:) = []; % odstranění z dat
    end
end
```

Druhým krokem v rámci filtrace ADS-B zpráv bylo odstranění těch zpráv, které se týkaly traťového provozu. Provedení tohoto kroku bylo poměrně přímočaré; z dat byly odstraněny ty zprávy, které obsahovaly vysílanou geometrickou výšku větší než 20 000 stop. Jelikož se většina traťového provozu nachází nad touto výškou, bylo toto kritérium považováno za dostatečné. Jak se ukázalo, po provedení tohoto kroku byly v průměru odstraněny zhruba tři pětiny všech detekovaných 24bitových adres letadel v rámci daného datového souboru.

Třetí krok filtrace spočíval v určení, zda se v rámci daného datového souboru vyskytovalo letadlo s konkrétní 24bitovou adresou pouze na LKPR. Poskytnutá data totiž zahrnovala také ADS-B zprávy vysílané provozem na okolních letištích (např. pražská letiště Letňany, Kbely, Vodochody atd.), které bylo s ohledem na téma práce zapotřebí odstranit. Provoz mezi LKPR a těmito okolními letišti je obecně minimální a je zpravidla omezen pouze na letadla všeobecného letectví, což usnadnilo definování logiky této filtrace. Pro každou 24bitovou adresu byla nejprve vyhodnocena minimální vysílaná geometrická výška. Předpokladem totiž bylo, že tato minimální hodnota byla vysílána ve chvíli, kdy se dané letadlo nacházelo na zemi. Jakmile byla tato výška vyhodnocena, byly nalezeny všechny zprávy obsahující tuto výšku. V ideálním případě byly všechny tyto zprávy vysílány pouze na LKPR, čímž bylo potvrzeno, že sledované letadlo se v daný den nenacházelo na žádném jiném letišti v okolí. Kolem letiště

tedy byla vymezena obdélníková oblast ($14^{\circ} 12'$ až $14^{\circ} 19'$ v. d., $50^{\circ} 04'$ až $50^{\circ} 08'$ s. š.), v níž měly být vysílány všechny tyto zprávy. Pokud byla některá ze zpráv vysílána mimo tuto oblast, byly všechny zprávy příslušející dané adrese odstraněny z dat. Dalším sledovaným kritériem kromě vysílané polohy (ASTERIX datová položka I021/130 – Position in WGS-84 co-ordinates) byla také samotná hodnota minimální geometrické výšky, která měla být nižší než 3 000 stop. Obrázek 14 níže ukazuje vysílanou polohu všech zpráv obsahujících minimální geometrickou výšku za den 19. 6. 2023, s rozlišením před filtrací a po filtraci nevyhovujících 24bitových adres, včetně vymezené oblasti filtrace kolem LKPR.



Obrázek 14: Poloha zpráv obsahujících minimální geometrickou výšku vysílaných 19. 6. 2023 pro všechny adresy před filtrací (červené křížky) a po filtraci (modré kružnice), včetně oblasti filtrace (zelený obdélník)

Z obr. 14 vyplývá, že touto cestou byla rovněž odstraněna letadla, která oblastí pokrytí pouze prolétala, přičemž na žádném z letišť nepřistála. Po této fázi filtrace tedy v datech zbývaly pouze ADS-B zprávy vysílané letadly, která se v daný den nacházela pouze na LKPR. Je nutno dodat, že princip této fáze filtrace byl založen na skutečnosti, že LKPR se nachází ve větší nadmořské výšce, než okolní letiště (především letiště Kbely, Letňany, Točná či Vodochody). Pokud se tedy některé z letadel nacházelo současně na LKPR i některém z okolních letišť (což však dle předpokladu bylo zanedbatelná procento případů), byla minimální geometrická výška vysílána vždy na těchto letištích. Je zřejmé, že pro letiště nacházející se v nižší nadmořské výšce, než okolní letiště, by tato logika musela být definována jiným způsobem (například se zohledněním určitého rozmezí vysílaných geometrických výšek, nikoli pouze té minimální), nicméně pro potřeby této práce byla volba tohoto principu filtrace vyhovující. Kód pro realizaci této fáze filtrace je uveden níže:



```
% povolené souřadnice kolem letiště
longitudeW = 14.2; % 14°12'
longitudeE = 14.31667; % 14°19'
latitudeN = 50.13333; % 50°08'
latitudeS = 50.06667; % 50°04'

% kontrola všech 24bitových adres
for i = 1:size(addresses,1)
    addressData = data(data(:,13) == addresses(i),:); % data pro danou adresu
    minHeight = min(double(addressData(:,16))); % minimální vysílaná geometrická
výška pro danou adresu

    % odstranění adresy z dat, pokud nebyla vysílána geometrická výška
    if isnan(minHeight)
        data(data(:,13) == addresses(i),:) = [];
    end

    minHeightData = addressData(double(addressData(:,16)) == minHeight,:); %
zprávy vysílané v minimální geometrické výšce

    coords = double(minHeightData(:, [5 6])); % souřadnice vysílaných zpráv
obsahujících minimální geometrickou výšku

    % kontrola souřadnic pro každou zprávu
    for j = 1:size(coords,1)
        if coords(j,1) >= latitudeS && coords(j,1) <= latitudeN && coords(j,2) >=
longitudeW && coords(j,2) <= longitudeE && minHeight < 3000
            else
                data(data(:,13) == addresses(i),:) = []; % smazání dat týkajících se
dané adresy, pokud některá ze zpráv ležela mimo LKPR
            end
        end
    end
end

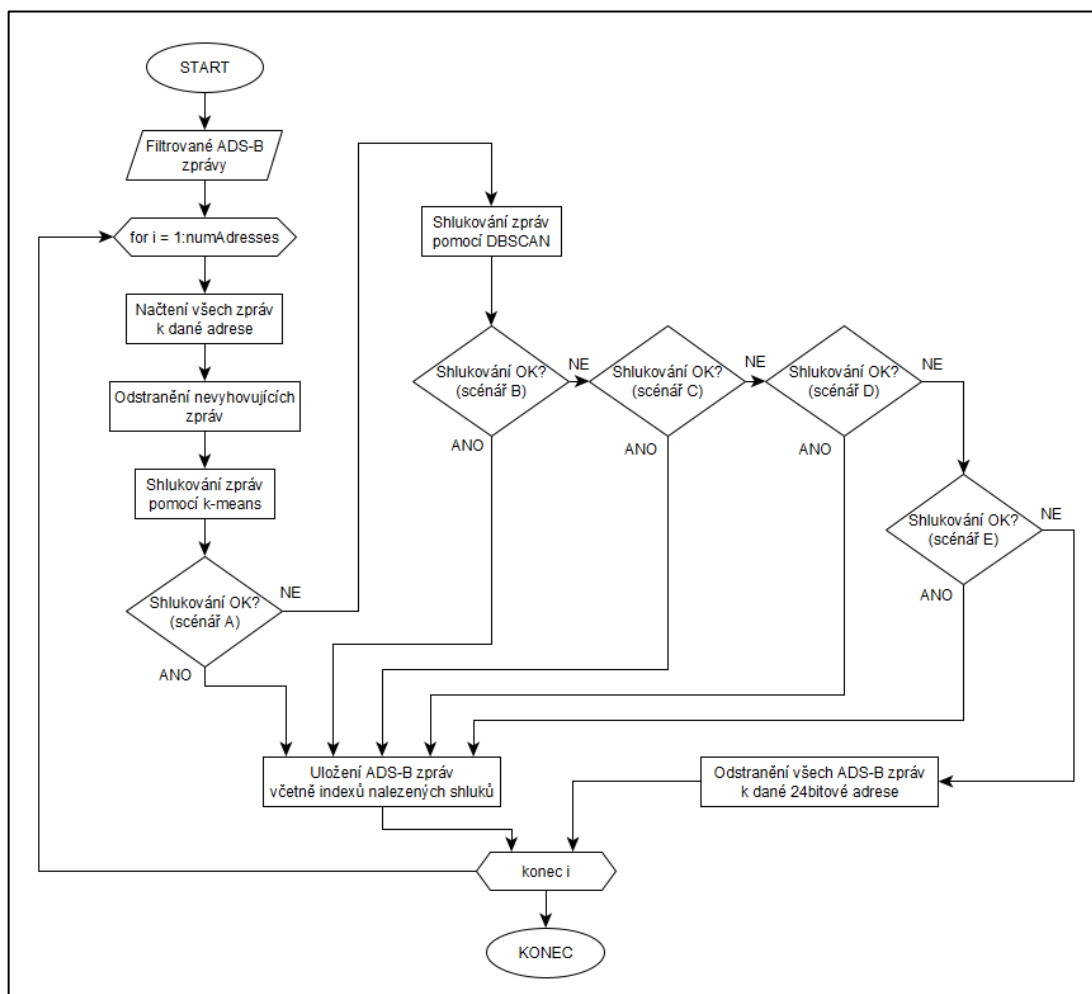
addresses = unique(data(:,13)); % adresy, které zbyly po kontrole

data(ismissing(data(:,31)),:) = []; % odstranění zpráv, které nemají callsign
```

Jak vyplývá z ukázky kódu výše, v rámci tohoto posledního kroku filtrace ADS-B zpráv byly zároveň odhaleny všechny 24bitové adresy, pro které nebyly v žádné zprávě vysílány informace o geometrické výšce; konkrétně byla v těchto případech hodnota minimální geometrické výšky rovna NaN. Jelikož tento údaj byl potřebný mj. v rámci následné analýzy, byly všechny zprávy příslušející těmto adresám z dat odstraněny. Na konci ukázky kódu výše je zároveň možné spatřit poslední krok filtrace ADS-B zpráv pro další využití, jenž spočíval v odstranění všech zpráv, které neobsahovaly informace o vysílaném volacím znaku letadla (ASTERIX datová položka I021/170 – Target Identification), neboť tento údaj byl potřebný mj. v rámci následující fáze zpracování dekodovaných ADS-B zpráv. Popis této následující fáze spočívající v rozlišení jednotlivých pohybů ve zbývajících ADS-B zprávách je předmětem následujícího oddílu.

2.2.2 Identifikace jednotlivých pohybů v datech

Postup filtrace popsáný v předchozím oddílu vedl k odstranění všech nepodstatných ADS-B zpráv, čímž zbyly pouze zprávy z letištního provozu na LKPR. Na základě těchto zpráv bylo pro následnou analýzu zapotřebí identifikovat jednotlivé pohyby (tj. přílety a odlety zvlášť) letadel na letišti. Teoretický postup by zde spočíval ve využití vysílaných volacích znaků letadly k rozlišení jednotlivých pohybů, nicméně, jak se ukázalo, tento postup nebyl možný. Důvodem byly totiž různé nepravidelnosti; například u letadel všeobecného letectví byl po celý den vysílán stejný volací znak, ačkoli v datech byl objektivně rozeznatelný větší počet letů; dále byly během jednoho pohybu vysílány dva volací znaky, případně byl pro přílet i následný odlet vysílán stejný volací znak. Potřeba automatizace procesu detekce těchto nepravidelností pro správné rozlišení jednotlivých pohybů v datech tedy byla zřejmá; z toho důvodu byl zvolen postup založený na shlukové analýze, který využíval údaje o vysílané 24bitové adrese letadla a času příjmu zprávy o jeho poloze. Výsledky tohoto shlukování byly vyhodnoceny a postupně přiřazeny některému z definovaných scénářů, které budou blíže popsány dále. Základní princip definovaného algoritmu je znázorněn pomocí vývojového diagramu na obr. 15.



Obrázek 15: Algoritmus identifikace jednotlivých pohybů v datech založený na shlukové analýze



Jak vyplývá z vývojového diagramu výše, v rámci algoritmu byly v iteracích postupně procházeny jednotlivé 24bitové adresy letadel, které zbyly po filtraci popsané v předchozím oddílu, přičemž pro každou z nich byly identifikovány shluky vysílaných zpráv odpovídající jednotlivým pohybům. Na začátku každé iterace byly nejprve načteny všechny ADS-B zprávy příslušející dané adrese, načež byly odstraněny ty z nich, které nevyhovovaly pro další postup. Všechny načtené zprávy obsahovaly informaci o vysílaném volacím znaku, neboť všechny zprávy, které tento údaj neobsahovaly, již byly odstraněny v rámci filtrace popsané v předchozím oddíle. Nejprve tedy byly zjištěny všechny volací znaky obsažené v těchto zprávách, načež bylo pro každý z nich posouzeno, kolik zpráv jej obsahovalo. Pro zajištění dostatku dat byly odstraněny všechny zprávy obsahující ty volací znaky, které v nich byly obsaženy méně než stokrát, což byla empiricky nastavená hodnota na základě posouzení dat. Kód pro realizaci tohoto kroku je uveden níže:

```
addressData = data(data(:,13) == addresses(i),:); % načtení dat k adrese

% callsigny ve zprávách
callsigns = addressData(:,31); % všechny callsigny
callsignsUniques = unique(callsigns); % jedinečné callsigny v datech
numCallsigns = size(callsignsUniques,1); % počet callsignů

% kontrola každého callsignu - počet zpráv
for j = 1:numCallsigns
    if sum(callsigns == callsignsUniques(j)) < 100
        addressData(addressData(:,31) == callsignsUniques(j),:) = []; % smazání
    end
end
```

Druhý krok odstranění nevyhovujících zpráv spočíval ve vyhodnocení, kdy byly zprávy vysílány. Tuto informaci obsahuje ASTERIX datová položka I021/073 – Time of Message Reception of Position, která konkrétně udává čas příjmu zprávy o poloze letadla v sekundách uplynulých od poslední půlnoci UTC [100]. Je tedy zřejmé, že pohyb obsahující současně zprávy přijaté před a po půlnoci by byl na časové ose (0-86 359 sekund během dne) rozdělen, což by negativně ovlivnilo přesnost shlukování (obě části by byly shlukovacím algoritmem mylně považovány za jednotlivé pohyby), a tudíž bylo nutné tyto pohyby z dat odstranit. Kód v MATLABu pro odstranění zbývajících nevyhovujících zpráv je uveden níže:

```
callsigns = addressData(:,31); % zbylé callsigny po 1. kroku
callsignsUniques = unique(callsigns); % zbylé jedinečné callsigny v datech
numCallsigns = size(callsignsUniques,1); % počet zbylých callsignů

% kontrola každého callsignu - data kolem půlnoci
for j = 1:numCallsigns
    DataPreMidnight = addressData(addressData(:,31) == callsignsUniques(j) &
    double(addressData(:,14)) > 86340,:);
    DataPreMidnight = size(DataPreMidnight,1);
```



```

DataPostMidnight = addressData(addressData(:,31) == callsignsUniques(j) &
double(addressData(:,14)) < 60,:);
DataPostMidnight = size(DataPostMidnight,1);
midnightCheck = DataPreMidnight*DataPostMidnight;
if midnightCheck ~= 0
    addressData(addressData(:,31) == callsignsUniques(j),:) = []; % kolem
půlnoci jsou data - odstranění z dat
end
end

callsigns = addressData(:,31); % callsigny zbylé po obou krocích
callsignsUniques = unique(callsigns); % zbylé jedinečné callsigny v datech
numCallsigns = size(callsignsUniques,1); % počet zbylých callsignů
    
```

Po odstranění všech nevyhovujících zpráv bylo provedeno shlukování všech zpráv týkajících se aktuálně sledované 24bitové adresy. Jak bude více vysvětleno níže, pro shlukování byly použity dva různé algoritmy, přičemž jeden sloužil jako primární a druhý jako záložní v případě potřeby. Ve stručnosti lze říci, že prostřednictvím shlukové analýzy dochází k třídění jednotlivých datových bodů do skupin (respektive shluků) na základě vzájemné podobnosti sledovaných vlastností [102]. Algoritmů pro shlukování existuje celá řada; jako primární algoritmus zde byl zvolen k -means. Tento algoritmus iterativně hledá středy k hledaných shluků, přičemž tyto středy jsou dány jako průměr všech datových bodů obsažených v daném shluku (s výjimkou jejich počáteční volby, která může probíhat různě). Každý datový bod je v každé iteraci přiřazen vždy tomu nejbližšímu středu (typicky na základě vypočítané Euklidovské vzdálenosti), načež jsou tyto středy přepočítány (nové průměry z nově přiřazených datových bodů) a současně je přepočítáno kritérium

$$J(C) = \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2, \quad (2.1)$$

kde $C = \{c_j\}_1^k$ je množina k hledaných shluků, x_i jsou datové body ve shlucích a μ_j jsou středy jednotlivých shluků. Algoritmus je ukončen, jakmile se středy shluků s dalšími iteracemi již nemění, čímž zároveň došlo k minimalizaci kritéria (2.1). [102] [103]

Cílem bylo na základě času příjmu jednotlivých ADS-B zpráv identifikovat s pomocí shlukové analýzy jednotlivé pohyby. Tento přístup byl uplatněn například v článku od Sun et al. [104]. Kromě dat o času příjmu jednotlivých ADS-B zpráv v průběhu dne byl vstupem algoritmu počet hledaných shluků k ; v tomto případě se jednalo o předpokládaný počet pohybů realizovaných sledovaným letadlem za daný den. Tento počet byl určen na základě počtu časových mezer mezi jednotlivými zprávami, které byly větší než 20 minut; a to prostřednictvím kódu níže:

```

y = double(addressData(:,14)); % time of position reception
timeDiff = diff(y); % časové mezery mezi jednotlivými zprávami
k = sum(timeDiff > 1200) + 1; % počet očekávaných pohybů/shluků
    
```

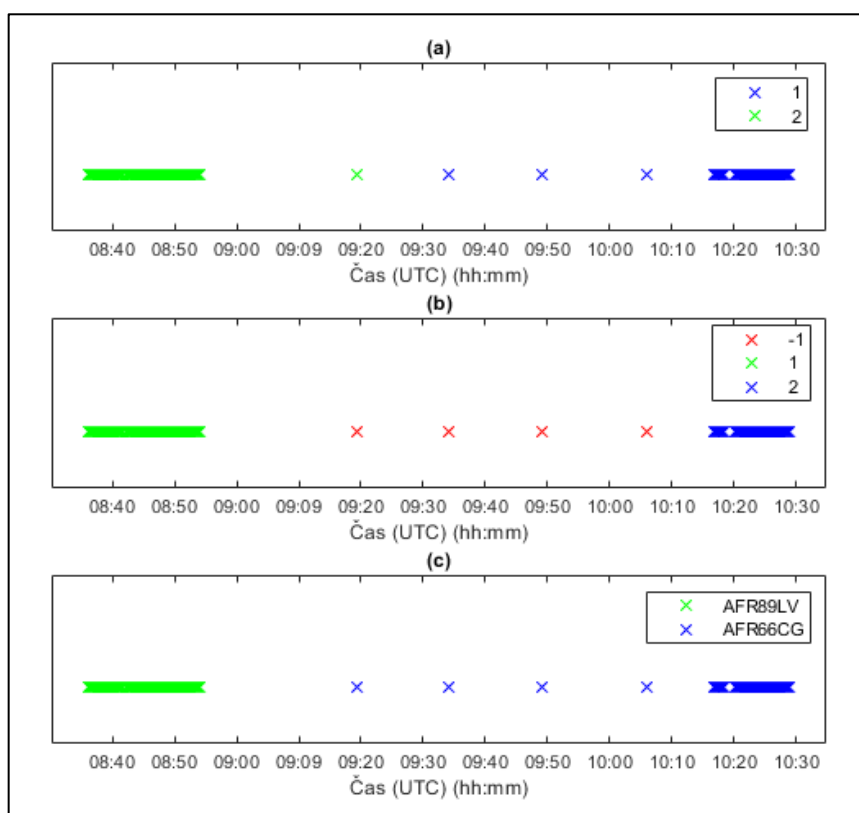


Jakmile bylo pomocí algoritmu k -means provedeno shlukování ADS-B zpráv, bylo vyhodnoceno, zda nalezené shluky odpovídají předpokladu a zda je tedy lze považovat za jednotlivé skutečné realizované pohyby daným letadlem. Pokud současně platilo, že v každém shluku byly vždy obsaženy zprávy odpovídající jedinému volacímu znaku, a že počet hledaných shluků k se rovnal počtu jedinečných volacích znaků vysílaných letadlem během dne, pak bylo předpokládáno, že shlukování proběhlo úspěšně a že bylo možné uložit všechny příslušné zprávy spolu s indexy nalezených shluků do nové proměnné. Tento scénář, který se týkal většiny vyhodnocovaných adres, byl označen jako tzv. Scénář A.

Jestliže shlukování zpráv pomocí k -means nebylo dostačující, tj. nepodařilo se správně určit jednotlivé shluky odpovídající realizovaným pohybům, bylo provedeno shlukování původních dat pomocí algoritmu DBSCAN. Algoritmus DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) identifikuje shluky na základě vzájemné blízkosti, respektive hustoty uspořádání datových bodů. Pro tento účel pracuje se dvěma uživatelem definovanými parametry; konkrétně eps (ϵ) a $minPts$. Platí, že v okolí o rozměru ϵ kolem daného bodu se musí nacházet alespoň ($minPts - 1$) jiných datových bodů. Pokud je tato podmínka splněna, tvoří tento bod (tzv. jádro) i všechny body v jeho ϵ -okolí jeden shluk. Stejně tak i tyto okolní body mohou být jádry, pokud podmínku splňují, čímž daný shluk zároveň rozšiřují o všechny body v jejich ϵ -okolí. Body, které toto sice nesplňují, ale současně se nacházejí v ϵ -okolí některého jádra, jsou tzv. hraniční či krajní body. Body, v jejichž ϵ -okolí se nevyskytuje žádné jádro, jsou algoritmem vyhodnoceny jako odlehlé body (šum), tj. body, které nejsou součástí žádného shluku. Oproti algoritmu k -means nevyžaduje DBSCAN před spuštěním upřesnění počtu hledaných shluků. [102] [105] Nastavení parametrů zde bylo $\epsilon = 600$ a $minPts = 100$; toto nastavení se ukázalo jako nejlepší z hlediska citlivosti při rozpoznávání jednotlivých shluků. Základem pro jednotlivé shluky tedy byla přítomnost alespoň 100 zpráv v rámci intervalu 20 minut; to v průměru představuje 1 zprávu za 12 sekund, což vyhovuje všem možným intervalům vysílání ADS-B zpráv [67].

Důvod, proč byl DBSCAN využit jakožto sekundární algoritmus v případě, že použití pouze samotného k -means nestačilo, spočíval v jeho schopnosti v rámci datových bodů rozpoznat „osamělé“ body, které nepatří do žádného z nalezených shluků a které lze tedy odstranit jakožto šum. Právě tyto osamělé datové body byly totiž algoritmem k -means často chybně přiřazeny k některému z identifikovaných shluků. Toto chybné přiřazení v důsledku způsobilo, že nebyla splněna podmínka na přítomnost jediného volacího znaku v rámci každého shluku. Tím, že DBSCAN tyto stejné body označil za šum, nedošlo k ovlivnění ostatních nalezených shluků. Po spuštění algoritmu DBSCAN bylo opět vyhodnoceno splnění několika podmínek, které byly z podstaty stejné, jako v případě algoritmu k -means. Konkrétně bylo vyhodnoceno,

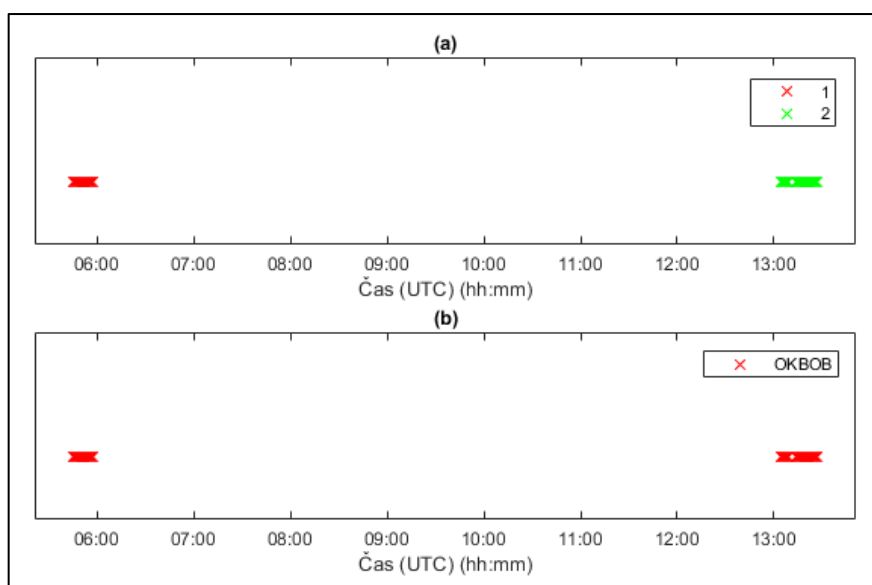
zda byl v každém z identifikovaných shluků pokaždé obsažen pouze jediný volací znak a zda počet nalezených shluků odpovídal počtu volacích znaků vysílaných daným letadlem v průběhu dne. Pokud byly tyto podmínky splněny, jednalo se o Scénář B, přičemž bylo vyhodnoceno, že shlukování pomocí sekundárního algoritmu DBSCAN již v pořádku bylo, tudíž bylo možné zprávy spolu s indexy shluků (prozatím i včetně šumových bodů) uložit do sběrné proměnné. Pro ilustraci výhody doplnění primárního algoritmu k -means o DBSCAN, který byl použit jakožto záložní algoritmus v případě potřeby, slouží obr. 16 níže, na němž jsou znázorněny skutečně vysílané volací znaky a výsledky shlukování s použitím obou algoritmů. Výhoda tohoto přístupu z obrázku jasně vyplývá; problematické osamělé datové body byly algoritmem vyhodnoceny jako šum (index -1) a nebyly tak zahrnuty do shluků.



Obrázek 16: Ukázka rozdílných výsledků aplikace algoritmu k -means (a) a DBSCAN (b) z pohledu správné identifikace jednotlivých pohybů (c) (Scénář B); adresa 39E681 (F-HZUB), 19. 6. 2023

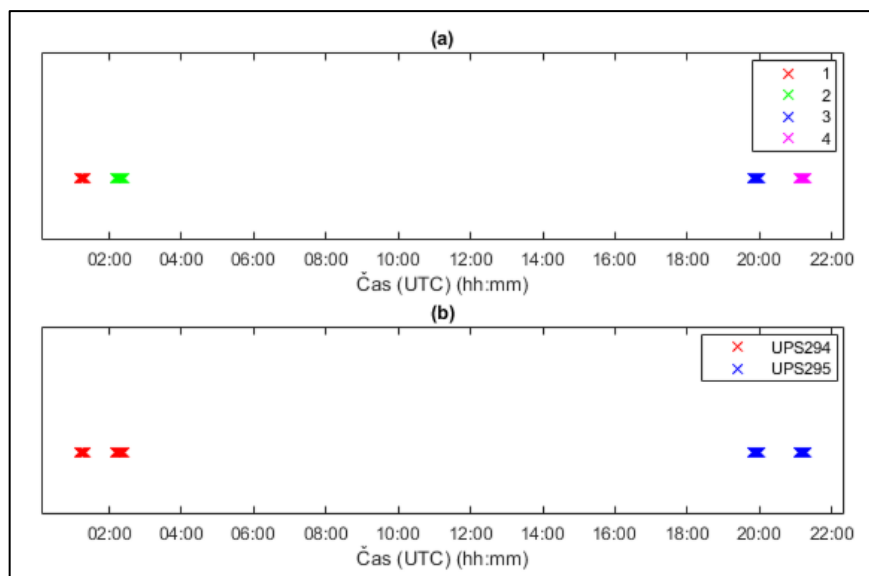
Pro většinu adres se podařilo shlukováním rozlišit bez chyby jednotlivé pohyby a potvrdit tak „spolehlivost“ vysílaných volacích znaků (tj. bylo možné důvěřovat vysílaným volacím znakům z pohledu odlišení jednotlivých pohybů); toto byl případ Scénáře A či Scénáře B. Ne vždy však byly podmínky pro zařazení do těchto dvou scénářů splněny; příčiny pro toto byly různé, přičemž ty nejčastější byly zohledněny v dalších definovaných scénářích. Častým případem byla situace, kdy byl po celý den letadlem vysílán jediný volací znak, a to bez ohledu na počet realizovaných pohybů. Toto se zpravidla týkalo letadel všeobecného letectví, která v rámci volacího znaku vysílají svoji imatrikulaci. Je zřejmé, že pokud bylo algoritmem DBSCAN

v rámci dne rozlišeno více pohybů, nebyla splněna podmínka na rovnost počtu shluků (respektive nalezených pohybů) a počtu jedinečných volacích znaků. Při nesplnění podmínek pro zařazení do Scénáře B tedy byly vyhodnoceny dvě alternativní podmínky. První z nich se týkala počtu vysílaných volacích znaků, který měl být pouze jeden; druhá se týkala shody počtu nalezených shluků s očekávaným počtem shluků, který se rovnal hodnotě k původně určené pro algoritmus k -means. Pokud byly tyto podmínky splněny, byla daná adresa zařazena pod Scénář C, načež byly všechny zprávy příslušející aktuálně zkoumané adrese spolu s indexy shluků uloženy do sběrné proměnné. Příklad této situace je pro ilustraci uveden na obr. 17.



Obrázek 17: Ukázka rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě vysílání jediného volacího znaku během celého dne (b) (Scénář C); adresa 49D506 (OK-BOB), 19. 6. 2023

Pokud doposud nebylo pro danou 24bitovou adresu rozlišení jednotlivých pohybů pomocí shlukování vyhodnoceno jako úspěšné, bylo pokračováno s hledáním příslušného scénáře. Následující scénář, označovaný jako Scénář D, byl principiálně podobný předchozímu scénáři, avšak s tím rozdílem, že během dne byly vysílány alespoň dva volací znaky místo jediného, přičemž byl identifikován větší počet pohybů, než jaký byl počet jedinečných volacích znaků. Tato situace byla specifickým případem některých linek, zejména nákladních; jak ostatně dokládá obr. 18 ilustrující tuto situaci, kde se konkrétně jednalo o linku nákladního dopravce UPS. Podmínky pro zařazení dané adresy pod Scénář D byly podobné jako v případě předchozího scénáře; například stále platil požadavek na rovnost počtu nalezených shluků (respektive pohybů) a počtu očekávaných shluků. Rovněž platil požadavek, aby byly v rámci každého shluku obsaženy datové body odpovídající jedinému volacímu znaku; posledním kritériem bylo, aby počet nalezených shluků převyšoval počet vysílaných volacích znaků. Je zřejmé, že nesplnění tohoto posledního požadavku by znamenalo, že některý z vysílaných volacích znaků nebyl v identifikovaných shlucích zohledněn, což nebylo přijatelné.



Obrázek 18: Ukázka rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě vysílání minimálně dvou volacích znaků během celého dne (b) (Scénář D); adresa A51EDE (N429UP), 19. 6. 2023

Všechny dosavadní scénáře pracovaly s teoretickým předpokladem, že v rámci každého shluku byly vždy obsaženy pouze zprávy s jediným vysílaným volacím znakem. Například v případě adres spadajících pod Scénář B byl tento předpoklad splněn až po aplikaci algoritmu DBSCAN, kdy byl problém v mnoha případech vyřešen vynecháním problematických osamělých datových bodů z nalezených shluků (viz obr. 16). Problém však nastal ve chvíli, kdy bylo v rámci jediného pohybu chybně vysíláno více volacích znaků, tudíž mezi jednotlivými datovými body neexistovala mezera, kterou by jinak bylo možné využít pro jejich rozdělení do jednotlivých shluků podle vysílaného volacího znaku. Tento jev bude v dalším textu označován jako „kontaminace nalezených shluků“. U každého z dosud diskutovaných scénářů byla jednou z podmínek právě absence této kontaminace u všech shluků. Jak se ukázalo při bližším zkoumání dat, k této kontaminaci došlo například v případě, kdy došlo ke změně vysílaného volacího znaku až během vytlačení ze stání či následného poježdění. Po manuálním posouzení bylo možné potvrdit, zda tento kontaminovaný shluk skutečně reprezentoval jediný pohyb, nicméně pro větší efektivitu byl postup tohoto posouzení automatizován.

Nejprve bylo nutné stanovit podmínky, za kterých bylo možné kontaminaci shluku uznat jako přípustnou (tj. bylo možné s jistotou říci, že shluk představuje jediný pohyb). Pro tento účel byly pro každý z nalezených shluků v rámci aktuálně zkoumané 24bitové adresy vyhodnoceny dva parametry. Prvním parametrem byl počet volacích znaků přítomných v daném shluku, tím druhým byl procentuální podíl nejčastěji vysílaného volacího znaku v daném shluku. Spolu s tím byl pro každý shluk určen nejčastěji vysílaný volací znak, přičemž podmínkou bylo, aby byl některému ze shluků touto cestou přidělen každý z volacích znaků vysílaných během dne.



Jinými slovy, žádný volací znak nesměl být přidělen více než jednomu shluku, kromě případů, kdy bylo během dne podobně identifikováno více shluků, než bylo vysílaných volacích znaků (tyto případy byly specificky zohledněny s ohledem na další platné podmínky, jak bude ukázáno v kódu níže). Realizace popsaného postupu v MATLABu je uvedena v segmentu kódu níže:

```
% příprava proměnných
clusterPurityVector = zeros(1,numClustersDB);
idxPurityVector = zeros(1,numClustersDB);
clusterMoCoCa = [];

% vyhodnocení parametrů u shluků
for j = 1:numClustersDB
    clusterCallsigns = tabulate(callsigns(idxDB == j)); % volací znaky ve shluku
    clusterPurityVector(j) = size(clusterCallsigns,1); % kolik je volacích znaků
    v daném shluku
    callsignShareInCluster = cell2mat(clusterCallsigns(:,3)); % procentuální
    podíly volacích znaků ve shlucích
    [idxPurityVector(j),idxMoCoCa] = max(callsignShareInCluster); % procentuální
    podíl nejčastějšího volacího znaku v daném shluku + index řádku v tabulce
    clusterMoCoCa{j} = clusterCallsigns{idxMoCoCa,1}; % nejčastější volací znak
end

clusterMoCoCa = string(clusterMoCoCa); % volací znaky přidělené shlukům

% kontrola, že žádný volací znak nebyl přidělen dvěma shlukům
callsignsUniqueness = 0;
callsignsUniquenessSpec = 0;
if size(unique(clusterMoCoCa),2) == numClustersDB || numCallsigns == 1
    callsignsUniqueness = 1;
else % specifický případ - více shluků než volacích znaků
    if size(unique(clusterMoCoCa),2) == numCallsigns && numClustersDB ==
numExpectedClusters && numClustersDB > numCallsigns
        callsignsUniqueness = 1;
        callsignsUniquenessSpec = 1; % indikátor specifického případu
    end
end
end
```

Jakmile byly pro každý ze shluků identifikovaných v průběhu dne určeny tyto parametry, bylo možné vyhodnotit samotnou přípustnost kontaminace shluků. První podmínkou bylo, aby alespoň jeden z identifikovaných shluků nebyl kontaminovaný, tj. měl obsahovat pouze jediný vysílaný volací znak. Další podmínkou bylo, že procentuální podíl nejčastějšího volacího znaku v každém shluku nesměl být menší než 60 %; dále musela být splněna výše popsaná podmínka týkající se přidělení každého z volacích znaků některému ze shluků. Vedle těchto podmínek samozřejmě platily také „klasické“ podmínky týkající se shody počtu nalezených shluků s počtem vysílaných volacích znaků či počtem očekávaných shluků. Při splnění všech těchto podmínek bylo vyhodnoceno, že míra kontaminace shluků byla přípustná a že tedy bylo možné po přepsání chybných volacích znaků uložit všechny zprávy k dané adrese spolu s indexy shluků k dalšímu využití. Příslušný kód této kontroly je uveden níže:

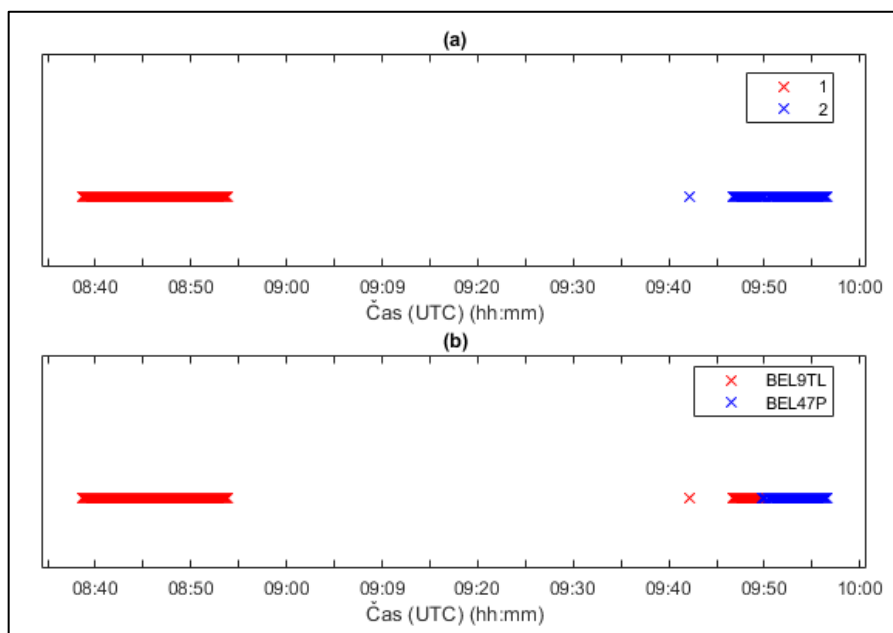
```

% kontrola přípustnosti kontaminace shluků
if min(clusterPurityVector) == 1 && sum(idxPurityVector < 60) == 0 &&
callsignsUniqueness == 1 % podmínky pro přípustnou kontaminaci
    if numClustersDB == numCallsigns || numClustersDB == numExpectedClusters ||
numCallsigns == 1 || callsignsUniquenessSpec == 1 % „klasické podmínky“
        % přepsání volacích znaků u přípustně kontaminovaných shluků
        for j = 1:numClustersDB
            callsigns(idxDB == j) = repmat(clusterMoCoCa(j),size(callsigns(idxDB
== j),1),1);
        end

        % uložení dat do sběrné proměnné
        dataPostClustering = [dataPostClustering; [addressData idxDB callsigns]];
    end
end
end

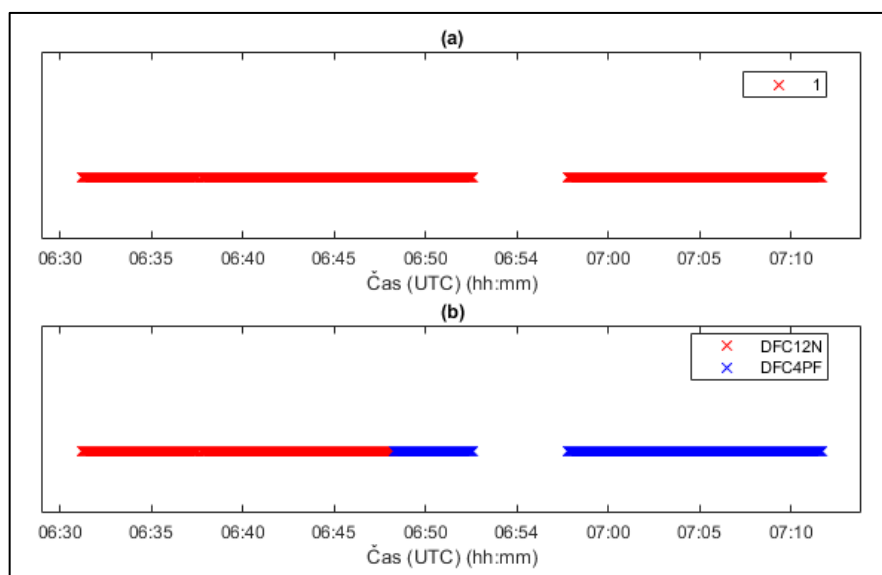
```

Pokud byla míra kontaminace identifikovaných shluků vyhodnocena jako přípustná a současně byly splněny i ostatní podmínky, jednalo se o Scénář E. Ukázka toho, kdy byla data ke konkrétní adrese přiřazena tomuto scénáři, je pro ilustraci zobrazena na obr. 19. Jak je na obrázku vidět, v datech jsou objektivně rozlišitelné dva shluky reprezentující dva pohyby, což potvrzují i dva různé volací znaky, přičemž v rámci shluku č. 2 jsou přítomny datové body obsahující oba volací znaky. V tomto případě byla míra kontaminace tohoto shluku vyhodnocena jako přípustná; algoritmus pro shluk správně zvolil volací znak „BEL47P“ namísto chybného „BEL9TL“, který byl v omezené míře ve shluku rovněž přítomen a který odpovídal předchozímu letu. Tím byla zároveň splněna podmínka, že některému ze shluků musí být přidělen každý volací znak.



Obrázek 19: Ukázka rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě přípustné kontaminace některého ze shluků (b) (Scénář E); adresa 4CACB0 (EI-GEA), 17. 6. 2023

Pokud nebyly v případě konkrétní 24bitové adresy splněny podmínky pro zařazení do některého z výše uvedených scénářů (A-E), jednalo se o Scénář F, přičemž se zprávami příslušejícími této adrese nebylo dále pracováno (zprávy nebyly uloženy do sběrné proměnné; *de facto* tedy byly tyto adresy z dat smazány). Snahou pochopitelně bylo, aby takovýchto případů bylo co nejméně, neboť představovaly ztrátu dat k následné analýze. V naprosté většině se jednalo o specifické případy, jejichž zohlednění by vyžadovalo dodatečné úsilí, které by s ohledem na jejich malý počet nepřineslo podstatnou přidanou hodnotu. Příklad situace odpovídající Scénáři F je zobrazen na obr. 20. V tomto konkrétním případě byla zřejmě problémem nedostatečně dlouhá časová mezera mezi předpokládanými pohyby (pouze pět minut), tudíž DBSCAN chybně identifikoval pouze jediný shluk, zatímco se s ohledem na počet vysílaných volacích znaků velmi pravděpodobně jednalo o dva různé pohyby.



Obrázek 20: Ukázka chybného rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě nevyhovujících dat (b) (Scénář F); adresa 49D253 (OK-OBR), 19. 6. 2023

Jakmile byly z dat odstraněny všechny nevyhovující adresy, byly z dat rovněž odstraněny ty zprávy, které byly algoritmem DBSCAN označeny za osamělé (tj. měly přidělený index -1). Posledním úkonem bylo přečíslování indexů jednotlivých nalezených pohybů. Tyto indexy uložené spolu se zprávami jim byly původně přiřazeny použitým shlukovacím algoritmem v jednotlivých iteracích, tudíž jednotlivé hodnoty (1, 2, 3 atd.) se v datech neustále opakovaly napříč adresami. Pro usnadnění další práce s daty byly tyto indexy přečíslovány tak, aby byly kumulativní, tedy aby každý identifikovaný pohyb měl svůj vlastní jedinečný index. Kód pro realizaci popsaného postupu je uveden níže:

```
dataPostClustering(dataPostClustering(:,37) == "-1",:) = []; % odstranění šumu
addressesPostClust = unique(dataPostClustering(:,13)); % adresy, které zbyly po
rozřazení adres do scénářů A-F podle identifikace pohybů v datech
```



```
%% PŘEPSÁNÍ INDEXŮ NALEZENÝCH POHYBŮ
movtCounter = 0; % počítadlo pohybů (= shluků)

temp = []; % dočasná sběrná proměnná

for i = 1:size(addressesPostClust,1)
    addressData = dataPostClustering(dataPostClustering(:,13) ==
    addressesPostClust(i,:),:); % načtení dat příslušejících dané adrese

    idxAggregate = double(addressData(:,37)) + movtCounter; % posun indexů shluků
    addressData = [addressData string(idxAggregate)]; % uložení nových indexů

    temp = [temp; addressData]; % zápis do dočasné proměnné

    movtCounter = movtCounter + max(double(addressData(:,37))); % aktualizace
    počítadla přičtením počtu indexů (= maximální hodnota) pro danou adresu
end

temp(:,37) = []; % odstranění původních indexů shluků

dataPostClustering = temp; % načtení dočasné proměnné do hlavních dat

clear temp % odstranění dočasné proměnné
```

V této fázi tedy byly v datech předběžně identifikovány jednotlivé pohyby. Dále však bylo nutné ověřit kvalitu výsledků této identifikace, tedy vyhodnotit, zda každý z identifikovaných shluků skutečně představuje jeden konkrétní pohyb. Postupu této kontroly se věnuje následující oddíl.

2.2.3 Kontrola správnosti identifikace pohybů

Identifikované shluky ADS-B zpráv, o nichž bylo předpokládáno, že odpovídají jednotlivým pohybům, byly podrobeny kontrole. Cílem této kontroly bylo ověřit kvalitu provedeného shlukování a odstranit případné chybně identifikované pohyby. Tím mělo být zajištěno, že pro následnou analýzu budou dodána data bez chyb, které by negativně ovlivnily výsledky práce. Tato kontrola měla dvě hlavní části, které budou postupně popsány v rámci tohoto oddílu.

První část kontroly spočívala v ověření, že v rámci každého identifikovaného shluku byl vždy obsažen pouze jeden pohyb. Tímto způsobem tedy měly být detekovány především případy, kdy letadlo bez přestávky vysílalo ADS-B zprávy po celou dobu pobytu na letišti, a to včetně příletu i následného odletu, čímž došlo k chybnému spojení zpráv odpovídajících oběma pohybům do jediného shluku. Takováto situace mohla nastat například v případě, kdy nějaké letadlo vysílalo stejný volací znak, přičemž doba jeho pobytu na letišti byla pouze v řádu minut. Takovéto situace byly i s ohledem na předchozí postup nepravděpodobné, nicméně pro zvýšení robustnosti metodiky je bylo nutné zohlednit. Stejně tak se mohl daný shluk týkat letadla, které kolem letiště pouze letělo, aniž by na něm přistálo. Princip této kontroly se zaměřil na vysílanou geometrickou výšku. Základem byl totiž předpoklad, že v rámci jednoho pohybu se letadlo nachází ve vzduchu pouze buďto na jeho začátku (v případě příletu) či na jeho konci



(v případě odletu). Pokud se tedy letadlo nacházelo ve vzduchu na začátku i na konci současně, pak se nejednalo o jediný pohyb, ale například o situaci popsanou výše. Pro každý identifikovaný shluk byla tedy nejprve vyhodnocena minimální vysílaná geometrická výška, k níž bylo přičteno 1 000 stop. Tato výška byla pomyslným rozhraním pro určení, zda se letadlo nacházelo na zemi či ve vzduchu. Pokud bylo prvních a posledních pět zpráv příslušejících danému shluku vysíláno nad touto výškou, byl tento shluk vyhodnocen jako neplatný a z dat byl vyloučen. Kód pro realizaci této kontroly je uveden níže:

```
errorCounter = 0; % počítadlo odstraněných pohybů

clustersNumbers = 1:movtCounter; % vektor indexů shluků po kontrole

% kontrola, že každý shluk obsahoval pouze jediný pohyb
for i = 1:movtCounter
    % načtení dat pro daný pohyb - dle indexu
    movtData = dataPostClustering(dataPostClustering(:,38) == num2str(i),:);

    movtGeomAltData = double(movtData(:,16)); % data o geometrické výšce

    airborneHeightMin = min(movtGeomAltData) + 1000; % kritérium "airborne"

    % detekce nevyhovujících shluků
    if mean(movtGeomAltData(1:5)) > airborneHeightMin &&
mean(movtGeomAltData(end-4:end)) > airborneHeightMin % zprávy na začátku i na
konci jsou vysílány ve výšce nad zemí (airborne)
        dataPostClustering(dataPostClustering(:,38) == num2str(i),:) = []; %
odstranění z hlavních dat
        movtCounter = movtCounter - 1; % snížení počtu pohybů o jeden
        errorCounter = errorCounter + 1; % počítadlo odstraněných pohybů
        clustersNumbers(clustersNumbers == i) = []; % odstranění z indexů shluků
    end
end
```

Po této kontrole následovala druhá, dodatečná kontrola všech zbývajících shluků, které nebyly vyhodnoceny jako chybné. Prvním krokem v rámci každé iterace bylo načtení všech zpráv příslušejících aktuálně sledovanému shluku. Pro každou zprávu byly následně dopočítány dva údaje, které byly využity v rámci kontroly i později. Tím prvním byla vzdálenost mezi aktuální vysílanou polohou a polohou vysílanou v předchozí zprávě. Pro tento výpočet byly v MATLABu využity funkce `distance` a `deg2km` (včetně následného převodu z kilometrů na metry). Pomocí tohoto údaje a informace o rozdílu času příjmu aktuální a předchozí zprávy byla poté vypočítána rychlost letadla vůči zemi (traťová rychlost), načež byla pro daný shluk určena minimální vysílaná geometrická výška. Kód pro tyto prvotní úkony je uveden níže:

```
dataReady = []; % data připravená na analýzu

for i = clustersNumbers % shluky zbylé po předchozí kontrole
    % načtení dat
    movtData = dataPostClustering(dataPostClustering(:,38) == num2str(i),:);
```



```
% vzdálenost mezi jednotlivými body + traťová rychlost v kt
for j = 2:size(movtData,1)
    arclen = distance(double(movtData(j-1,5)),double(movtData(j-
1,6)),double(movtData(j,5)),double(movtData(j,6))); % úhlová vzdálenost mezi
aktuálními a předchozími souřadnicemi
    movtData(j,39) = string(deg2km(arclen)*1000); % převod na metry (m)
    movtData(j,40) =
string(1.944*double(movtData(j,39))/(double(movtData(j,14))-double(movtData(j-
1,14)))); % výpočet rychlosti; 1.944 je převodní konstanta z m/s na kt
end

% minimální vysílaná geometrická výška
minHeightMovt = min(double(movtData(:,16)));
...
```

V každém z procházených shluků byly v rámci kontroly hledány dílčí shluky, které by mohly signalizovat chybnou detekci pohybu. V ideálním případě byly totiž zprávy v rámci daného shluku vysílány nepřetržitě, například od vstupu do oblasti pokrytí po zastavení letadla na příslušném stání. Pokud se však v rámci shluku nacházela nějaká významnější časová mezera, bylo nutné ji prozkoumat a shluk v případě potřeby automaticky vyloučit. Pro shlukování byl zvolen algoritmus DBSCAN s nastavenými parametry $\epsilon = 120$ a $minPts = 20$, čímž bylo požadováno, aby byla jedna ADS-B zpráva vysílána alespoň jednou za šest sekund. Následně byl vyhodnocen počet nalezených shluků. Pokud byl identifikován právě jeden shluk (i včetně případných osamělých bodů, které byly z dat následně odstraněny), byly dále zkontrolovány údaje týkající se vysílané geometrické výšky a vypočítané rychlosti. Pakliže bylo rozpětí vysílaných hodnot geometrické výšky větší než 1 000 stop a současně platilo, že vypočítaná traťová rychlost byla v minimálně 15 % případů menší než 30 uzlů (signalizující pojiždění letadla), byla kontrola u konce s tím, že původně identifikovaný shluk bylo definitivně možné považovat za správně identifikovaný jedinečný pohyb. Data týkající se tohoto pohybu byla následně uložena do proměnné obsahující jednotlivé definitivně potvrzené pohyby.

V případě, že byly touto cestou identifikovány minimálně dva shluky, bylo nutné vyhodnotit, zda byly součástí jediného pohybu. Toto bylo realizováno prostřednictvím tří různých testů. První test byl založen na požadavku, aby každý shluk obsahoval určitý minimální počet zpráv vysílaných na zemi. Pro každý z identifikovaných shluků bylo nejprve vyhodnoceno, zda obsahuje alespoň 10 ADS-B zpráv s hodnotou geometrické výšky menší než 300 stop nad minimální vysílanou výškou, či případně zda obsahuje alespoň 10 zpráv, v nichž nebyla obsažena geometrická výška (hodnota v rámci dané zprávy byla NaN; toto byl případ, kdy se letadlo nacházelo na zemi). Pokud byl tento požadavek splněn pro každý z identifikovaných shluků, byl první test vyhodnocen jako úspěšný. V případě, že některý ze shluků tento požadavek nesplňoval, byl z dat odstraněn; jak bude více popsáno níže, tento krok byl výhodný i v kontextu dalšího testování. Jako příklad, kdy některý ze shluků neobsahoval žádné



zprávy vysílané na zemi, lze jmenovat situaci, kdy konkrétní letadlo na přiletu na několik minut opustilo oblast pokrytí (první identifikovaný shluk; algoritmem byl odstraněn), načež se do ní vrátilo a setrvalo v ní až do konečného zastavení na stání (druhý identifikovaný shluk). Pakliže nedošlo k odstranění všech shluků, ale například jen jednoho ze dvou (jako v případě situace popsané výše), byl první test zpětně vyhodnocen jako úspěšný. Příslušná část kódu pro tento test je uvedena níže:

```
numClusters = max(idx); % počet identifikovaných shluků
clustersIdxs = 1:numClusters; % vektor indexů shluků

% % TEST 1 - KAŽDÝ SHLUK OBSAHUJE NĚJAKÁ DATA NA ZEMI
clustContainsGnd = zeros(numClusters,1);

% zkoumání shluků z hlediska obsažených dat
for j = clustersIdxs
    clusterData = movtData(idx == j,:);

    % zda-li daný shluk obsahuje data na zemi
    if sum(double(clusterData(:,16)) < (minHeightMovt + 300), 'omitnan') > 10 ||
sum(isnan(double(clusterData(:,16)))) > 10 % nějaká data jsou poblíž minimální
výšky v rámci pohybu či je určitý počet NaNů (příznak, že je letadlo na zemi)
        clustContainsGnd(j) = 1;
    else
        clustContainsGnd(j) = 0;
    end
end

% vyhodnocení
if min(clustContainsGnd) == 1 % v každém shluku jsou data na zemi
    testlok = 1;
else
    % odstraní se shluky, kde to neplatí
    for j = clustersIdxs
        if clustContainsGnd(j) == 0
            movtData(idx == j,:) = [];
            idx(idx == j) = []; % vektor indexů shluků pro jednotlivé zprávy
            clustersIdxs(clustersIdxs == j) = []; % odstranění indexu shluku
        end
    end

    % když zbyl alespoň jeden shluk obsahující nějaká data na zemi
    if numel(clustersIdxs) > 0
        testlok = 1; % nyní zbývají pouze shluky obsahující i zprávy na zemi
    end
end
```

Druhý ze tří testů byl zaměřený na požadavek, aby právě jeden z identifikovaných shluků obsahoval zprávy vysílané ve vzduchu. Tento požadavek vycházel z předpokladu, že k pauzám ve vysílání ADS-B zpráv, které v důsledku vedly k identifikaci vícero shluků, došlo pouze na zemi, nikoli ve vzduchu. Jak bylo naznačeno během popisu prvního testu, odstranění shluků obsahujících pouze data vysílaná ve vzduchu bylo výhodné i z hlediska tohoto testu



a jak se ukázalo, v některých případech dokonce pomohlo k úspěšnému splnění druhého testu. Zatímco v rámci prvního testu byly v případě neúspěchu odstraněny nevyhovující shluky, načež byl již test označen za úspěšný, v tomto případě tomu tak nebylo. Pokud tedy nastala situace, že více shluků obsahovalo data vysílaná ve vzduchu (např. v případě, kdy byla pro daný pohyb současně přítomna data o přiletu i následném odletu), byl aktuálně vyhodnocovaný pohyb v důsledku označen za neplatný. Test vycházel z principu, že v případě určitého významného rozpětí (více než 1 000 ft) ve vysílaných hodnotách geometrické výšky musela být v daném shluku přítomna data vysílaná ve vzduchu. V rámci testu byla zohledněna případná skutečnost, že v rámci předchozího testu byly odstraněny všechny shluky; v takovém případě nebyl test proveden. Stejně tak nebyly ze zřejmých důvodů vyhodnoceny ty shluky, které již byly odstraněny. Příslušný úsek kódu věnovaný tomuto testu je uveden níže:

```
% % TEST 2 - PRÁVĚ JEDEN SHLUK OBSAHUJE ZPRÁVY VYSÍLANÉ VE VZDUCHU
clustContainsAir = NaN(numClusters,1); % odlišení odstraněných shluků

% zkoumání shluků z hlediska obsažených dat
for j = clustersIdxs
    if numel(clustersIdxs) > 0 % kontrola, zda test 1 nesmazal všechny shluky
        clusterData = movtData(idx == j,:);

        % určení, zda daný shluk obsahuje data ve vzduchu
        if range(double(clusterData(:,16))) > 1000 % kontrola dle rozpětí výšek
            clustContainsAir(j) = 1;
        else
            clustContainsAir(j) = 0;
        end
    end
end

% vyhodnocení testu
if sum(clustContainsAir,'omitnan') == 1 % pouze jediný prvek vektoru má obsahovat
    hodnotu 1; omitnan kvůli případným neprocházeným shlukům (NaN)
    test2ok = 1;
end
```

Poslední ze tří testů byl zaměřen na vyhodnocení mezer mezi jednotlivými identifikovanými shluky, respektive „skoků“ ve vysílané poloze. Podstatným rozdílem totiž bylo, zda k pauze v přijatých ADS-B zprávách došlo ve chvíli, kdy letadlo například delší dobu vyčkávalo u dráhy, či zda v jejím důsledku chyběla část dat týkajících se daného pohybu. Pro každý z identifikovaných shluků byla nejprve vybrána první a poslední dostupná zpráva, načež byly všechny takto vybrané zprávy seřazeny dle času příjmu (pro případ, že číslování identifikovaných shluků nebylo chronologické). Z těchto zpráv byly následně vybrány údaje o vysílaných souřadnicích, které byly použity k určení vzdálenosti v prostoru mezi jednotlivými shluky. Kritériem bylo, aby tato vzdálenost byla u všech mezer menší než 100 metrů. V opačném případě byl test vyhodnocen jako neúspěšný. Stejně jako v případě druhého testu



nebyl tento test proveden v případě, že v rámci prvního testu byly odstraněny všechny identifikované shluky. Specifikem byla situace, kdy po tomto testu zbyl jediný shluk; v takovém případě pochopitelně neexistovaly žádné mezery mezi shluky k vyhodnocení a test tak byl automaticky vyhodnocen jako splněný. Příslušný kód tohoto testu v MATLABu je uveden níže:

```
% TEST 3 - NÁVAZNOST SHLUKŮ Z POHLEDU SOUŘADNIC
if numel(clustersIdxs) > 0 % má-li vůbec smysl ještě dělat
    if numel(clustersIdxs) == 1
        test3ok = 1; % jeden shluk; test nemá smysl (žádné mezery k vyhodnocení)
    else
        test3ok = 1; % prvotní nastavení; změna na 0 případně později

        clusterEdgeCoords = []; % souřadnice bodů na krajích shluků

        numClusters = 0; % reset počítadla shluků

        % určení dat na okrajích shluků
        for j = clustersIdxs
            clusterData = movtData(idx == j,:);
            clusterEdgeCoords = [clusterEdgeCoords; double(clusterData(1,:));
double(clusterData(end,:))]; % data na začátku a konci shluku
            numClusters = numClusters + 1;
        end

        clusterEdgeCoords = sortrows(clusterEdgeCoords,14,'ascend'); % seřazení
clusterEdgeCoords = double(clusterEdgeCoords(:,5:6)); % jen souřadnice
clusterEdgeCoords(1,:) = []; % odstranění prvního řádku matice
clusterEdgeCoords(end,:) = []; % odstranění posledního řádku matice

        for j = 1:(numClusters - 1) % pro každou mezeru mezi shluky
            % výběr souřadnic z matice souřadnic - oba okraje mezery
            point1 = clusterEdgeCoords((j-1)*2 + 1,:);
            point2 = clusterEdgeCoords((j-1)*2 + 2,:);

            % vzdálenost mezi body
            clustDist = distance(point1(1),point1(2),point2(1),point2(2));
            clustDist = deg2km(clustDist)*1000; % převod na metry

            % vyhodnocení
            if clustDist < 100 % vzdálenost mezi shluky musí být menší než 100 m
            else
                test3ok = 0; % test neúspěšný pro jedinou mezeru
            end
        end
    end
end
end
```

V případě, že byly splněny všechny tři výše popsané testy, bylo možné původně identifikovaný shluk považovat za správně nalezený pohyb, tudíž mohla být uložena všechna příslušná data. Pro definitivní potvrzení bylo současně požadováno splnění již dříve zmíněné podmínky na to, aby minimálně 15 % zpráv obsahovalo údaje o traťové rychlosti odhadnuté na základě jednotlivých vysílaných pozic menší než 30 uzlů, což bylo považováno za objektivní kritérium, že se letadlo skutečně alespoň částečně nacházelo na zemi (a že tedy zároveň minimální



geometrická výška použitá v rámci testů skutečně odpovídala výšce na zemi, tudíž testy bylo možné považovat za validní). Kód pro vyhodnocení splnění všech testů a následné uložení příslušných dat je uveden níže:

```
% vyhodnocení testů
testResult = test1ok*test2ok*test3ok; % splnění - logika AND

if testResult == 1 && quantile(double(movtData(:,40)),0.15) < 30
    OKcounter = OKcounter + 1;
    movtData(idx == -1,:) = []; % odstranění osamělých bodů z dat před uložením
    dataReady = [dataReady; movtData]; % uložení dat
end
```

Jelikož byly některé pohyby v důsledku neúspěšného splnění testů odstraněny, bylo nutné zbylé pohyby přečíslovat tak, aby na sebe jejich indexy znovu navazovaly. Toto bylo provedeno prostřednictvím kódu uvedeného níže:

```
movtCounter = 0; % počítadlo pohybů

for i = unique(double(dataReady(:,38)))'
    movtCounter = movtCounter + 1; % aktualizace počítadla
    dataReady(dataReady(:,38) == num2str(i),38) = num2str(movtCounter); % přepis
end
```

V této fázi byla tedy již k dispozici data týkající se jednotlivých identifikovaných pohybů, přičemž výše popsaným postupem byla ověřena správnost jejich identifikace. V rámci přípravy na analýzu dat k těmto pohybům však bylo ještě nutné zkontrolovat kvalitu samotných ADS-B zpráv, což bylo provedeno pomocí postupu popsaného v následujícím oddílu.

2.2.4 Kontrola indikátorů kvality dat

V případě použití přehledových dat v rámci různých aplikací je nezbytné mít informaci o jejich kvalitě, která je sledována prostřednictvím různých parametrů, mezi něž patří například přesnost, integrita, dostupnost, spojitost či spolehlivost. Znalost kvality dat je pochopitelně žádoucí i v případě ADS-B zpráv, v nichž jsou obsaženy mj. údaje o poloze či výšce konkrétního letadla. Pro aplikace využívající tyto údaje je rozhodující z hlediska určení, zda lze příslušná data použít. Z toho důvodu je součástí ADS-B zpráv celá řada tzv. indikátorů kvality. [69] Před dalším výkladem je nutno doplnit, že formát ADS-B (respektive technologie 1090 ES) se v čase měnil v závislosti na aktuálně platných standardech minimální provozní výkonnosti (MOPS, z angl. *minimum operational performance standards*), které jsou vydávány organizacemi EUROCAE (Evropa), potažmo RTCA (USA). Podle těchto MOPS jsou definovány jednotlivé verze ADS-B; například standard EUROCAE ED-102A/RTCA DO-260B odpovídá verzi 2, z níž pocházely i ADS-B zprávy použité v rámci této práce. [100] Spolu s vývojem jednotlivých verzí ADS-B docházelo také ke změnám v definicích některých



indikátorů kvality. Například v rámci původní verze 0 byly používány indikátory nejistoty (angl. *uncertainty indicators*), zatímco v následných verzích byly tyto nahrazeny indikátory přesnosti (angl. *accuracy indicators*). Kromě nich existují ještě indikátory integrity (angl. *integrity indicators*). [67] Podrobnější popis této problematiky včetně souhrnného výčtu indikátorů kvality je nad rámec této práce.

Indikátory kvality jsou obsažené v ASTERIX datové položce I021/090 – Quality Indicators. V rámci této položky mohou být pro zachování zpětné kompatibility vysílány různé indikátory v závislosti na příslušných MOPS; jako příklad lze uvést indikátor nejistoty NUCp pocházející z verze 0, který byl ve verzi 1 nahrazen indikátorem integrity NIC. [100] Pro účely této práce bylo pracováno pouze s indikátorem NACp (Navigation Accuracy Category – position). Tento indikátor udává přesnost určení horizontální polohy letadla; konkrétně se jedná o rozměr kružnice kolem skutečné polohy letadla, v níž se s pravděpodobností 95 % nachází jeho odhadovaná (oznamovaná) poloha. V případě verze 2 ADS-B vychází tento indikátor z GNSS parametru Horizontal Figure of Merit (HFOM). [106] [107] Indikátor NACp v rámci ADS-B zprávy může nabývat hodnot v rozmezí 0-11, přičemž každá hodnota odpovídá určitému intervalu HFOM [67]. V praxi (i v rámci přehledu o letištním provozu) se za přípustné obecně považují hodnoty NACp ≥ 8 , což odpovídá hodnotě HFOM $\leq 92,6$ m. Zatímco NACp řeší přesnost určení horizontální polohy, tu vertikální (respektive přesnost určení geometrické výšky, tj. výšky letadla nad elipsoidem WGS-84) řeší parametr GVA (Geometric Vertical Accuracy), který pro ADS-B verzi 2 vychází z GNSS parametru VFOM (Vertical Figure of Merit). [107] [108] Nicméně, tento indikátor je zde uveden čistě pro úplnost; pro účely této práce byl použit pouze indikátor NACp, jelikož jednoznačné stanovení kritéria pro filtraci se v případě GVA ukázalo jako příliš komplikované.

Principem kontroly dat z pohledu indikátoru NACp pro daný pohyb bylo, aby určité minimální procento ADS-B zpráv (defaultně 95 %) obsahovalo vyhovující hodnotu NACp (8 a více). Pro každý pohyb byl nejprve určen podíl nevyhovujících zpráv, načež byly nalezeny všechny pohyby, u nichž tento podíl překročil hodnotu 0,05 (5 %). Indexy těchto pohybů byly následně označeny ke smazání. Příslušný kód pro realizaci této prvotní kontroly je uveden níže:

```
badNACp = zeros(1,flightCounter); % vektor podílu nepřesných dat pro každý pohyb

% podíl zpráv s NACp <8 pro každý pohyb
for i = 1:flightCounter
    movtData = dataReady(dataReady(:,38) == num2str(i),:); % načtení dat pohybu
    numData = size(movtData,1); % počet dat pro daný pohyb
    movtNACp = double(movtData(:,19)); % hodnoty NACp pro každou zprávu
    badNACp(i) = sum(movtNACp < 8)/numData; % podíl špatného NACp pro daný pohyb
end

idxsToRemove = []; % proměnná pro indexy pohybů k odstranění
```



```
% načtení indexů pohybů k odstranění
for i = 1:flightCounter
    if badNACp(i) > 0.05 % více než 5 % zpráv s nevyhovujícím NACp
        idxsToRemove = [idxsToRemove; i];
    end
end
```

Jakmile byly nalezeny pohyby s nadlimitním podílem zpráv obsahujících špatné hodnoty NACp, bylo vyhodnoceno, o kolik pohybů se jednalo. Pokud se jednalo o pět a více pohybů, byla hranice zvýšena z 5 % na 10 %, načež byly znovu vyhledány a určeny ke smazání všechny pohyby, u nichž byla tato nová hranice překročena. Následně byla odstraněna data týkající se všech pohybů označených ke smazání. Příslušný kód je uveden níže:

```
if size(idxsToRemove,1) < 5 % vyhodnocení počtu pohybů se špatným NACp
else % posunutí tolerance na 10 %, pokud 5 a více pohybů má špatné NACp
    idxsToRemove = []; % znovu proměnná pro indexy pohybů k odstranění

    % znovu načtení - tentokrát posunutá tolerance
    for i = 1:flightCounter
        if badNACp(i) > 0.1 % více než 10 % špatných dat
            idxsToRemove = [idxsToRemove; i];
        end
    end
end

% odstranění z dat
for i = idxsToRemove
    dataReady(dataReady(:,38) == num2str(i),:) = []; % odstranění z dat
end

flightCounterFinal = flightCounter - size(idxsToRemove,1); % počítadlo
```

Posledním krokem v rámci procesu kontroly kvality ADS-B zpráv bylo přečíslování indexů jednotlivých pohybů v případě, že některý z pohybů byl odstraněn pro nevyhovující kvalitu dat (tj. došlo ke změně celkového počtu pohybů). Kód pro toto přečíslování je uveden níže:

```
% přečíslování indexů v datech
if flightCounterFinal == flightCounter % pouze pokud se změnil počet pohybů
else
    % přečíslování pohybů po odstranění dat
    counter = 0; % počítadlo pohybů

    for i = unique(double(dataReady(:,38)))'
        counter = counter + 1; % aktualizace počítadla
        dataReady(dataReady(:,38) == num2str(i),38) = num2str(counter); %
        přečíslování indexu pro daný pohyb
    end
end
```



Před dokončením procesu zpracování ADS-B zpráv pro následnou analýzu bylo žádoucí zkompletovat data pro analýzu, což zahrnovalo vyloučení některých nepotřebných parametrů a dopočítání jiných. Tomuto se věnuje následující oddíl.

2.2.5 Kompletace dat pro analýzu

Kompletace dat pro analýzu spočívala ve dvou zásadních úkonech. Tím prvním bylo dopočítání traťového úhlu. Již dříve byla například pro každou zprávu na základě srovnání v ní uvedených souřadnic a času jejího příjmu pozemní stanicí s odpovídajícími hodnotami v předchozí zprávě odhadnuta traťová rychlost letadla. Traťový úhel letadla byl odhadnut podobným principem (tedy na základě dvou po sobě následujících souřadnic), a to s pomocí funkce `azimuth` v MATLABu. Příslušný kód je uveden níže:

```
for i = 1:flightCounterFinal
    movtData = dataReady(dataReady(:,38) == num2str(i),:); % data pro daný pohyb

    numData = size(movtData,1); % počet dat pro daný pohyb

    trkAngle = NaN(numData,1); % vektor pro traťový úhel

    % výpočet traťového úhlu
    for j = 2:numData
        trkAngle(j) = azimuth(double(movtData(j-1,5)),double(movtData(j-1,6)),double(movtData(j,5)),double(movtData(j,6)));
    end

    dataTemp = [dataTemp; [movtData trkAngle]];
end

dataReady = dataTemp;
```

Druhý úkon související s kompletací dat pro analýzu spočíval ve výběru relevantních parametrů z dat. Pro každou ADS-B zprávu byly zvoleny následující parametry (skutečně vysílané i odhadnuté výpočtem):

- Číslo pohybu
- ICAO 24bitová adresa letadla
- Volací znak
- Zeměpisná šířka a délka
- Traťová rychlost (odhadnutá)
- Traťový úhel (odhadnutý)
- Geometrická výška
- Geometrická vertikální rychlost
- Letová hladina



- Barometrická vertikální rychlost
- Čas obdržení zprávy
- Kategorie vysílajícího zařízení

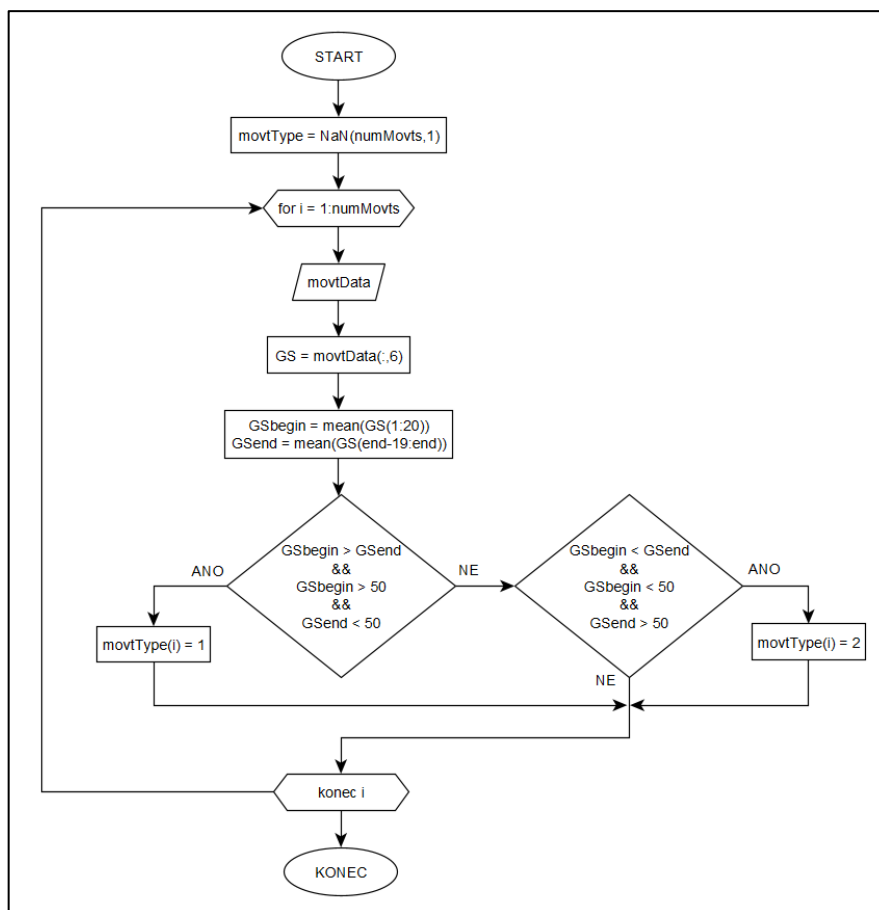
Data obsahující tyto parametry byla uložena pro další práci v rámci analýzy; popisu jejího postupu se věnuje následující podkapitola.

2.3 Analýza zpracovaných ADS-B zpráv

V předchozí podkapitole byl podrobně popsán postup zpracování dekódovaných ADS-B zpráv, jenž vedl k rozlišení jednotlivých letištních pohybů, přičemž byl kladen důraz na ověření správnosti této identifikace, a tedy zajištění potřebné robustnosti metodiky. Cílem této podkapitoly je popsat postup analýzy ADS-B zpráv týkajících se jednotlivých nalezených pohybů, vedoucí k určení dob trvání příslušných provozních režimů LTO cyklu pro každý ze zkoumaných pohybů. Součástí je také představení ostatních parametrů relevantních pro následnou statistickou analýzu.

2.3.1 Určení typu pohybu

Pro každý pohyb bylo nejprve nutné určit jeho typ, tedy zda se jednalo o přilet či odlet. Toto určení bylo podstatné z hlediska následně vyhodnocovaných provozních režimů LTO cyklu. Je zřejmé, že v případě odletu například nedává smysl vyhodnocovat dobu trvání provozního režimu „Přiblížení“. Určení typu pohybu bylo provedeno automaticky, na základě algoritmu popsaného vývojovým diagramem na obr. 21. Logika použitého algoritmu vycházela z konferenčního příspěvku autora a vedoucího této práce [109]. V principu spočívala ve srovnání průměrné počáteční a konečné traťové rychlosti daného pohybu; tyto průměrné hodnoty byly vypočítány z prvních, respektive posledních 20 ADS-B zpráv týkajících se daného pohybu. Důvodem volby tohoto parametru byl předpoklad, že letadlo na přiletu má na začátku, kdy se nachází ve vzduchu, větší traťovou rychlost než na konci, kdy přijíždí na stání; a obráceně pro odlet. Nerovnost těchto dvou průměrných hodnot byla tedy základním indikátorem typu pohybu. Kromě srovnání těchto dvou průměrných hodnot byly rovněž zkontrolovány hodnoty samotné. Pokud měl být například daný pohyb identifikován jako přilet, musela být jeho počáteční rychlost dostatečně vysoká (příznak toho, že se letadlo nachází ve vzduchu) a konečná rychlost naopak dostatečně nízká (příznak toho, že je letadlo na zemi). Hraniční hodnota traťové rychlosti pro toto binární rozlišení („na zemi“/„ve vzduchu“) byla stanovena na 50 uzlů, což bylo uvažováno jako dostatečná rezerva například pro zahrnutí veškerého pojíždění na zemi.



Obrázek 21: Algoritmus určení typu pohybu (přilet = 1, odlet = 2)

Informace o typu jednotlivých pohybů byly uloženy do proměnné *movtType*, kdy každý prvek tohoto vektoru odpovídal pohybu s příslušným indexem. Typ pohybu tedy byl rozlišen numericky; hodnota 1 odpovídala přiletu a hodnota 2 odletu. Příslušný kód v MATLABu realizující toto rozlišení je uveden níže:

```

numMovts = size(unique(double(data(:,1))),1); % počet pohybů

movtType = NaN(numMovts,1); % proměnná pro zápis typu pohybu

% určení typu pohybu pro každý pohyb
for i = 1:numMovts
    movtData = data(data(:,1) == num2str(i),:); % data k pohybu

    GS = double(movtData(:,6)); % ground speed data

    GS(1) = GS(2); % doplnění počáteční hodnoty, která je NaN

    GSbegin = mean(GS(1:20)); % průměrná traťová rychlost na začátku
    GSend = mean(GS(end-19:end)); % průměrná traťová rychlost na konci

    % určení typu pohybu
    if GSbegin > GSend && GSbegin > 50 && GSend < 50 % podmínky pro přilet
        movtType(i) = 1; % přilet
    else
        if GSbegin < GSend && GSbegin < 50 && GSend > 50 % podmínky pro odlet

```



```

        movtType(i) = 2; % odlet
    end
end
end

```

Jak z vývojového diagramu na obr. 21 vyplývá, algoritmus byl definován tak, aby zohledňoval možnou (byť nepravděpodobnou) situaci, kdy daný pohyb nebylo možné identifikovat ani jako přílet, ani odlet (daný prvek proměnné *movtType* byl roven NaN). V takovém případě byla data odpovídající tomuto pohybu odstraněna, načež byly přečíslovány indexy zbývajících pohybů. Kompletní kód pro případné odstranění dat včetně následného přečíslování je uveden níže:

```

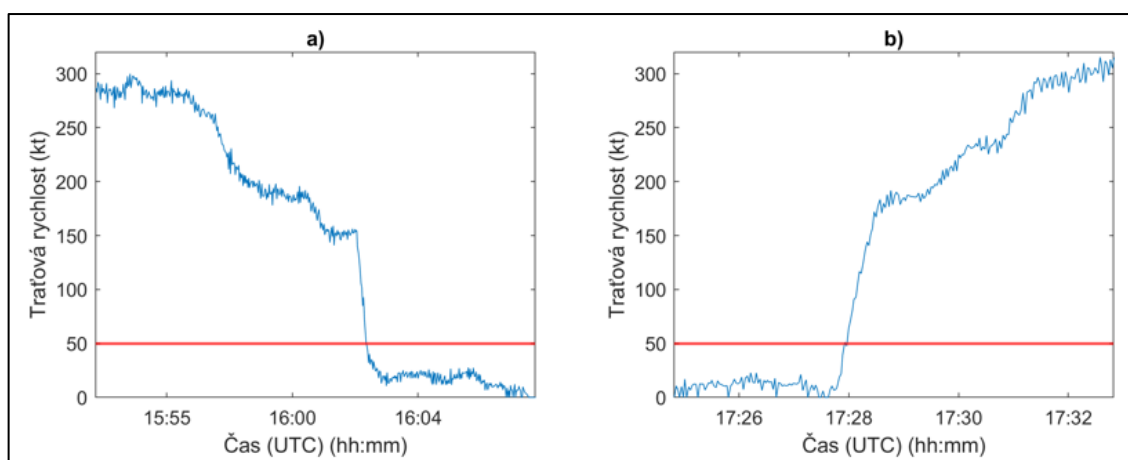
% odstranění pohybů bez identifikace typu pohybu
if sum(isnan(movtType)) > 0 % jsou-li nějaké pohyby s nepřirazeným typem
    % odstranění
    for i = 1:numMovts
        if isnan(movtType(i))
            data(data(:,1) == num2str(i),:) = [];
        end
    end

    movtType(isnan(movtType)) = []; % odstranění NaNů z vektoru typů pohybů

    % přečíslování pohybů
    movtCounter = 0; % počítadlo pohybů
    for i = unique(double(data(:,1)))'
        movtCounter = movtCounter + 1; % aktualizace počítadla
        data(data(:,1) == num2str(i),1) = num2str(movtCounter); % přečíslování
    end
    numMovts = movtCounter; % aktualizace počtu pohybů
end

```

Jako důkaz vhodnosti použití traťové rychlosti pro určení typu pohybu je na obr. 22 níže zobrazen ukázkový profil traťové rychlosti příletu a odletu. Součástí je také vyznačená rychlost 50 uzlů, která sloužila jako hranice určení, zda se letadlo nacházelo ve vzduchu či na zemi.

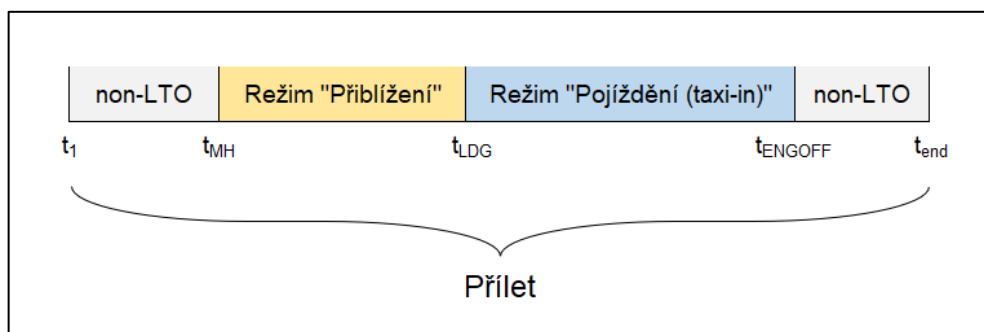


Obrázek 22: Ukázka profilu traťové rychlosti příletu (TVS2825, OK-SWH, 17. 6. 2023) (a) a odletu (TVS2852, OK-SWH, 17. 6. 2023) (b) s vyznačením hraniční hodnoty 50 uzlů (červená čára)

V závislosti na určeném typu pohybu následoval konkrétní postup určení dob trvání příslušných provozních režimů LTO cyklu. V případě příletu se jednalo o provozní režimy „Přiblížení“ a „Pojíždění (taxi-in)“, zatímco v případě odletu se jednalo o provozní režimy „Pojíždění (taxi-out)“, „Vzlet“ a „Stoupání“. V MATLABu bylo toto provedeno pomocí for-cyklu procházejícího postupně všechny pohyby; v rámci každé iterace byla nejprve pomocí příkazu `switch-case` posouzena hodnota příslušného prvku proměnné `movtType` (tj. byl zjištěn typ daného pohybu), podle níž byly následně vyhodnoceny příslušné provozní režimy. Postupu určení hodnot TIM jednotlivých režimů pro oba typy pohybů se postupně věnují následující dva oddíly.

2.3.2 Určení dob trvání provozních režimů – přílet

Jak již bylo řečeno, v případě příletu byla vyhodnocována doba trvání provozních režimů „Přiblížení“ a „Pojíždění (taxi-in)“. Obrázek 23 ukazuje teoretické rozdělení příletu na dílčí části, založené na provozních režimech LTO cyklu. Jak je vidět, tyto části lze oddělit pomocí konkrétních časových mezníků. Principem analýzy bylo nalézt tyto časové mezníky a na základě nich tak určit dobu trvání (tj. hodnoty TIM) jednotlivých provozních režimů LTO cyklu.



Obrázek 23: Rozdělení příletu na jednotlivé části včetně příslušných LTO provozních režimů a časových mezníků

Časové mezníky v případě příletu byly definovány následovně:

- Čas t_1 – Jednalo se o čas příjmu první ADS-B zprávy týkající se daného pohybu.
- Čas t_{MH} – Jednalo se o čas prvního podklesání směšovací výšky (= nejmenší geometrická výška vysílaná letadlem + 3 000 ft); pokud byl rozdíl mezi nejmenší a největší vysílanou geometrickou výškou menší než 3 000 ft, platilo $t_{MH} = t_1$.
- Čas t_{LDG} – Jednalo se o čas přistání, konkrétněji definovaný jako okamžik podrovnání před dosednutím letadla na dráhu.
- Čas t_{ENGOFF} – Jednalo se o čas vypnutí motorů po zastavení letadla na stání.
- Čas t_{END} – Jednalo se o čas příjmu poslední ADS-B zprávy týkající se daného pohybu.



Jak z obrázku vyplývá, v rámci daného příletu nebyly relevantní všechny zprávy, ale pouze zprávy přijaté v rámci časového intervalu $t \in \langle t_{MH}, t_{ENGOFF} \rangle$. Zprávy přijaté mimo tento interval nebyly součástí LTO cyklu, tudíž nebyly ani předmětem zájmu analýzy. V následujících odstavcích bude nejprve popsán postup určení jednotlivých časových mezníků včetně případného bližšího objasnění logiky jejich definice, načež bude představen princip výpočtu časů TIM a postup uložení dat pro následnou statistickou analýzu.

Postup určení času t_{MH}

Prvním z relevantních časových mezníků v rámci příletu byl čas t_{MH} . Jak již bylo uvedeno, jednalo se o čas, kdy v rámci příletu došlo poprvé k podklesání směšovací výšky letadlem. Problematika směšovací výšky již byla ve stručnosti představena v podkapitole 1.6. Tehdy bylo řečeno, že emise emitované pod touto výškou mají význam pro místní kvalitu ovzduší, přičemž ICAO uvažuje její konstantní hodnotu 3 000 ft (914 m) nad letišťem, ačkoli je ve skutečnosti její hodnota značně proměnlivá. Vzhledem k tomu, že problematika odhadu skutečné směšovací výšky není předmětem této práce (byť její zohlednění v budoucnu by jistě přineslo další zpřesnění zde definované metodiky), byla v této práci uvažována pouze její standardní hodnota (3 000 ft) dle ICAO. Pro správné určení času t_{MH} bylo žádoucí, aby bylo možné na základě ADS-B zpráv odhadnout okamžik prvního a zároveň jediného předpokládaného podklesání směšovací výšky letadlem. Ta byla pro daný přílet stanovena připočtením hodnoty 3 000 ft k minimální vysílané geometrické výšce, o níž bylo předpokládáno, že představuje geometrickou výšku letiště. Zde tedy platil zjednodušující předpoklad, že směšovací výška se neměnila s místem, tudíž byla mj. nezávislá na terénu v okolí letiště.

Z toho důvodu bylo podstatné, aby rozpětí hodnot vysílané geometrické výšky bylo větší než 3 000 ft. Pokud tomu tak nebylo, byl čas t_{MH} dán jako čas příjmu první ADS-B zprávy týkající se daného pohybu (t_1), načež byla vyhodnocovaná doba trvání režimu „Přiblížení“ pro daný pohyb rovnou označena za nekompletní, a tedy nespolehlivou. Toto bylo provedeno prostřednictvím indikátoru kompletnosti režimu „Přiblížení“, jenž byl nastaven na hodnotu 0. Pakliže byla podmínka na rozpětí hodnot geometrické výšky splněna, byly jednotlivé ADS-B zprávy pro daný přílet postupně procházeny, dokud nebyla nalezena první zpráva vysílaná pod stanovenou směšovací výškou. Předpokladem bylo, že k podklesání směšovací výšky došlo někde mezi příjmem této a předchozí zprávy. Dále tedy byla vyhodnocena časová mezera mezi příjmem obou těchto zpráv, přičemž podle její délky byl zvolen příslušný postup určení času t_{MH} . Pokud byla tato mezera kratší než 10 sekund, byla zvolena metoda interpolace na základě času příjmu obou zpráv a vysílané geometrické výšky. V případě delší mezery byl čas t_{MH} určen konzervativně jako čas příjmu první zprávy vysílané pod směšovací výškou. Zmiňovaný indikátor kompletnosti, jenž byl uložen spolu s výslednou hodnotou TIM



režimu „Přiblížení“, byl následně nastaven na hodnotu 1. Použitý kód pro určení času t_{MH} včetně předcházející kontroly typu pohybu (příkazem `switch-case`) je uveden níže:

```
movtData = data(data(:,1) == num2str(i),:); % data k pohybu; i je iterace for-  
cyklu (kvůli zjednodušení indentace nebyl v tomto segmentu zahrnut)  
  
switch movtType(i)  
    case 1 % přílet  
        % čas tMH  
        minGeoHeight = min(double(movtData(:,8))); % minimální geometrická výška  
        mixingHeight = minGeoHeight + 3000; % směšovací výška (mixing height)  
  
        j = 1;  
  
        if range(double(movtData(:,8))) <= 3000 % nelze přesně určit čas tMH  
            tMH = double(movtData(1,12)); % tMH = t1  
            appComplete = 0; % indikátor kompletnosti režimu "Přiblížení"  
        else % lze přesně určit čas tMH  
            while double(movtData(j,8)) >= mixingHeight  
                j = j + 1;  
            end  
  
            timeGap = double(movtData(j,12)) - double(movtData(j-1,12)); % časová  
mezera  
  
            % určení nejvhodnější metody určení času tMH  
            if timeGap < 10 % dostatečně malá mezera - lze interpolovat  
                % metoda interpolace  
                y = [double(movtData(j-1,12)) double(movtData(j,12))];  
                x = [double(movtData(j-1,8)) double(movtData(j,8))];  
                x2 = [x(1) mixingHeight x(2)];  
  
                y2 = interp1(x,y,x2); % interpolace času mezi zprávami  
  
                tMH = y2(2); % čas podklesání mixing height  
            else % příliš velká časová mezera  
                tMH = double(movtData(j,12)); % čas tMH  
            end  
  
            appComplete = 1; % indikátor kompletnosti režimu "Přiblížení"  
        end  
end  
...
```

Postup určení času t_{LDG}

Po určení času t_{MH} následovalo určení časového mezníku t_{LDG} . Tento časový mezník byl definován jako okamžik podrovnání před dosednutím letadla na dráhu. Podle manuálu ICAO totiž v této době dochází ke snížení nastavení tahu motorů letadla na volnoběh, což tedy lze považovat i za konec LTO režimu „Přiblížení“ (kde je uvažováno nastavení tahu na 30 %) [21]. Okamžik podrovnání lze zároveň poměrně snadno odhadnout na základě dostupných parametrů. Pro tento účel tedy byla zvolena geometrická výška letadla a jeho barometrická vertikální rychlost, k jejímuž poklesu téměř na nulu dochází právě během podrovnání. Pro



indikaci podrovnání byla její hraniční absolutní hodnota stanovena na 200 ft/min (tedy zhruba 1 m/s). K vyloučení chybné indikace podrovnání, například v případě uvedení letadla do horizontálního letu v některé fázi přiblížení, sloužila právě informace o jeho geometrické výšce. Pro indikaci podrovnání tedy bylo žádoucí, aby ke zmiňovanému poklesu absolutní hodnoty barometrické vertikální rychlosti letadla pod 200 ft/min došlo nejvýše 50 ft nad minimální vysílanou geometrickou výškou, která již byla známá z předchozího postupu určení času t_{MH} a která dle předpokladu odpovídala geometrické výšce letiště.

V některých případech, zejména u malých soukromých letadel, nebyly údaje o barometrické vertikální rychlosti k dispozici. Základem tedy bylo vyhodnocení, zda byly k dispozici oba parametry, či pouze geometrická výška, z čehož vycházel další postup. Jak bude blíže vysvětleno níže, ten byl v obou případech totožný až na jediný rozdíl. V obou případech byla nejprve nalezena první zpráva, ve které byly překročeny obě limitní hodnoty (tedy geometrická výška i absolutní hodnota barometrické vertikální rychlosti). Stejně jako v případě postupu určení času t_{MH} byla následně vyhodnocena délka časové mezery mezi touto a předchozí zprávou (mezi nimiž se dle předpokladu nacházel hledaný časový mezník), podle níž byl čas t_{LDG} buďto dán jako průměr času příjmu této a předchozí zprávy (v případě mezery kratší než 10 sekund) nebo jako čas příjmu této zprávy (konzervativní odhad v případě delší mezery). Zmiňovaný rozdíl spočíval v tom, že k času t_{LDG} určenému pouze na základě geometrické výšky (tedy při absenci údajů o barometrické vertikální rychlosti) bylo připočteno 5 sekund, což vycházelo z podrobného zkoumání dat.

Pro další statistickou analýzu byl rovněž odhadnut kurz dráhy (angl. *runway heading*), přičemž tento údaj sloužil k určení dráhy použité daným příletem. Tento parametr byl určen jako průměrná hodnota traťového úhlu letadla v okamžiku podrovnání. Příslušný kód v MATLABu pro určení času t_{LDG} a kurzu dráhy, navazující na předchozí segment, je uveden níže:

```
...
    % čas tLDG
    if sum(~isnan(double(movtData(:,11)))) > 10
        % k dispozici jsou data o geometrické výšce i baro vertikální rychlosti
        while double(movtData(j,8)) > (minGeoHeight + 50) ||
abs(double(movtData(j,11))) > 200
            j = j + 1;
        end

        timeGap = double(movtData(j,12)) - double(movtData(j-1,12)); % časová
mezera

        % volba nejvhodnější metody určení času tLDG
        if timeGap < 10 % dostatečně malá mezera - lze průměrovat
            tLDG = mean([double(movtData(j-1,12)) double(movtData(j,12))]); % čas
podrovnání; metoda průměru
        else % příliš velká časová mezera
```



```
tLDG = double(movtData(j,12)); % čas podrovnání
end
else
% k dispozici pouze data o geometrické výšce
while double(movtData(j,8)) > (minGeoHeight + 50)
j = j + 1;
end

timeGap = double(movtData(j,12)) - double(movtData(j-1,12)); % časová
mezera

% volba nejvhodnější metody určení času tLDG
if timeGap < 10 % dostatečně malá mezera - lze průměrovat
tLDG = mean([double(movtData(j-1,12)) double(movtData(j,12))]) + 5; %
čas podrovnání; metoda průměru
else % příliš velká časová mezera
tLDG = double(movtData(j,12)) + 5; % čas podrovnání
end
end

% určení runway heading
RWYhdg = mean([double(movtData(j-1,7)) double(movtData(j,7))]);
...

```

Postup určení času $t_{ENG OFF}$

Posledním z vyhodnocovaných časových mezníků v rámci přiletu byl čas $t_{ENG OFF}$. Jak již bylo řečeno, jednalo se o čas vypnutí motorů po zastavení letadla na stání – i zde se tedy jednalo pouze o odhad založený na určitých předpokladech a parametrech. První předpoklad se týkal rychlosti příjezdu letadla na stání, která bývá obecně nižší než během pojíždění letadla po provozní ploše letiště. Tato nízká rychlost způsobovala, že se diskrétní poloha letadla obsažená v datech formátu ASTERIX neměnila s každou zprávou, tudíž se letadlo chvílemi jevilo, jako by stálo na místě. Vzhledem k použitému postupu odhadu traťové rychlosti letadla, jenž byl založený na změně vysílané polohy, tedy spočíval první krok ve výběru ADS-B zpráv obsahujících nulovou traťovou rychlost. Pakliže takovéto zprávy existovaly, byla v každé z nich porovnána vzdálenost mezi její vysílanou polohou s polohou obsaženou v poslední zprávě, načež byly z výběru odstraněny všechny zprávy, kde tato vzdálenost překračovala hodnotu 100 metrů – zbylo tedy pouze blízké okolí předpokládaného stání. Pokud žádná z ADS-B zpráv neobsahovala nulovou traťovou rychlost, byl čas $t_{ENG OFF}$ určen jako čas příjmu poslední zprávy (t_{END}) a příslušný indikátor kompletnosti režimu „Pojíždění (taxi-in)“ byl nastaven na hodnotu 0. Jak se ukázalo, k takové situaci došlo například ve chvíli, kdy nebyly k dispozici ADS-B zprávy pokrývající poslední úsek pojíždění letadla.

Stejný postup byl i v případě, kdy byly během filtrace zpráv příliš vzdálených od poslední vysílané pozice odstraněny všechny zprávy obsahující nulovou traťovou rychlost, tj. v okruhu 100 metrů kolem poslední vysílané pozice bylo letadlo neustále v pohybu. V opačném případě



byla ze zbylých zpráv vybrána nejčastěji vysílaná poloha, která byla považována za pozici stání. Po určení polohy stání letadla byly zbývající ADS-B zprávy týkající se daného přiletu (tedy zprávy následující po přistání letadla) postupně procházeny, přičemž byla sledována vzdálenost letadla od určené pozice stání. Čas $t_{ENG OFF}$ byl následně určen jako čas příjmu první zprávy, která obsahovala vysílanou polohu shodnou s identifikovanou polohou stání. Aby byl odhad tohoto času konzervativní, což bylo žádoucí vzhledem ke zvolenému způsobu jeho určení, bylo k němu ještě přičteno 30 sekund. Tento čas zohledňoval dobu potřebnou k úplnému zastavení letadla na stání, což bylo dáno i tím, že informace o poloze nebyla spojitá, ale diskrétní (s rozlišením zhruba 10 m), a následnému vypnutí motorů. Posledním krokem bylo nastavení indikátoru kompletnosti režimu „Pojíždění (taxi-in)“ na hodnotu 1, což signalizovalo, že vypočítaná hodnota TIM byla spolehlivá a bylo s ní možné dále pracovat v rámci následné statistické analýzy. Kód pro nalezení času $t_{ENG OFF}$, jenž navazuje na předchozí segment kódu, je uveden níže:

```
...
    % čas tENGOFF
    posZeroGS = double(movtData(movtData(:,6) == "0",4:5)); % zprávy obsahující
nulovou GS

    if ~isempty(posZeroGS) % existují zprávy obsahující nulovou GS
        % filtrace "zero GS" poloh příliš vzdálených od konečné pozice
        for j = 1:size(posZeroGS,1)
            distToFinalPos =
deg2km(distance(posZeroGS(j,1),posZeroGS(j,2),posZeroGS(end,1),posZeroGS(end,2)))
*1000;
            if distToFinalPos > 100
                posZeroGS(j,:) = NaN;
            end
        end

        if sum(~isnan(posZeroGS)) > 0 % existují nějaké "zero GS" zprávy blízko
poslední polohy
            posNoGSsingleNum = posZeroGS(:,1).*posZeroGS(:,2); % vyjádření
souřadnic jediným číslem

            standPos = posZeroGS(posNoGSsingleNum == mode(posNoGSsingleNum),:); %
pozice stání jako nejčastější "zero GS" poloha

            standPos = standPos(1,:); % jediná hodnota

            distToStand =
deg2km(distance(double(movtData(j,4)),double(movtData(j,5)),standPos(1),standPos(
2)))*1000; % vzdálenost ke stání

            while distToStand > 0
                j = j + 1;
                distToStand =
deg2km(distance(double(movtData(j,4)),double(movtData(j,5)),standPos(1),standPos(
2)))*1000; % aktualizovaná vzdálenost
            end
```



```

        tENGOFF = double(movtData(j,12)) + 30; % odhad času tENGOFF
        idleINComplete = 1; % indikátor kompletnosti režimu "Pojíždění (taxi-
in)"
    else % žádné "zero GS" zprávy poblíž poslední polohy
        tENGOFF = double(movtData(end,12)); % tENGOFF = tEND
        idleINComplete = 0; % indikátor kompletnosti režimu "Pojíždění (taxi-
in)"
    end
else % neexistují zprávy obsahující nulovou GS
    tENGOFF = double(movtData(end,12)); % čas příjmu poslední zprávy (tEND)
    idleINComplete = 0; % indikátor kompletnosti režimu "Pojíždění (taxi-in)"
end
...

```

Výpočet hodnot TIM a následné uložení dat

Jakmile byly nalezeny všechny časové mezníky, bylo možné vypočítat hodnoty TIM pro vyhodnocované provozní režimy v rámci daného přeletu. Výpočet doby trvání provozního režimu „Přiblížení“ byl dán následujícím vzorcem:

$$TIM_{App} = t_{LDG} - t_{MH}. \quad (2.2)$$

Analogicky byl dán vzorec pro výpočet doby trvání provozního režimu „Pojíždění (taxi-in)“:

$$TIM_{TaxiIn} = t_{ENGOFF} - t_{LDG}. \quad (2.3)$$

Posledním krokem bylo uložení všech hodnot do společné proměnné pro následnou statistickou analýzu. Kromě samotných hodnot TIM byly uloženy také indikátory kompletnosti obou režimů. Pro umožnění podrobnější statistické analýzy výsledků byly rovněž uloženy časy t_{LDG} (zde považovaný za čas přistání) a t_{ENGOFF} (zde považovaný za čas příjezdu na stání), jejichž významy byly pro účely statistické analýzy bez vlivu na předchozí výpočty formálně pozměněny (např. v rámci letištních provozních statistik se mnohem častěji pracuje s časem přistání, nikoli časem podrovnání). Kód pro výpočet časů TIM a následné uložení všech příslušných hodnot je uveden níže (opět v návaznosti na předchozí segment a s naznačením pokračujícího větvení switch-case pro analýzu odletu):

```

...
% hodnoty TIM
TIM_App = tLDG - tMH;
TIM_IdleIN = tENGOFF - tLDG;

% uložení hodnot
LTOdata(i,5) = num2str(tLDG); % čas přistání
LTOdata(i,6) = num2str(tENGOFF); % čas spuštění motorů
LTOdata(i,7) = num2str(TIM_App); % TIM režimu "Přiblížení"
LTOdata(i,8) = num2str(appComplete); % indikátor kompletnosti režimu
"Přiblížení"
LTOdata(i,9) = num2str(TIM_IdleIN); % TIM režimu "Pojíždění (po přistání)"

```

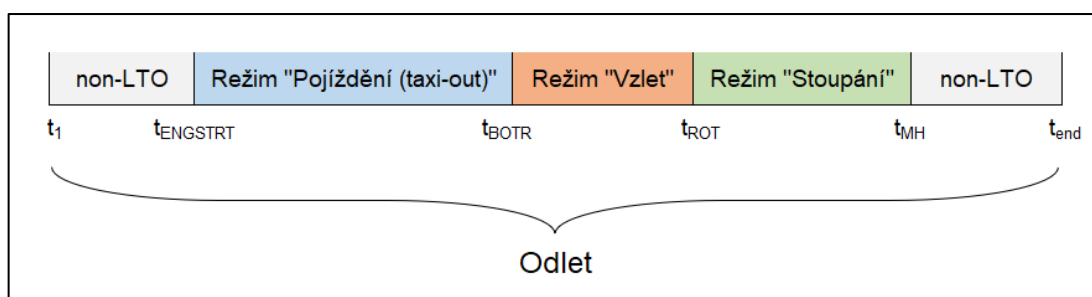


```
LTOdata(i,10) = num2str(idleINComplete); % indikátor kompletnosti režimu
"Pojíždění (po přistání)"

case 2 % odlet
...
```

2.3.3 Určení dob trvání provozních režimů – odlet

V případě odletu byly vyhodnocovány hodnoty TIM pro provozní režimy „Pojíždění (taxi-out)“, „Vzlet“ a „Stoupání“. Návaznost těchto režimů v rámci odletu je ukázána na obr. 24, kde jsou rovněž zachyceny všechny podstatné časové mezníky, které byly hledány stejně jako v případě příletu.



Obrázek 24: Rozdělení odletu na jednotlivé části včetně příslušných LTO provozních režimů a časových mezníků

Časové mezníky týkající se odletu byly definovány následovně:

- Čas t_1 – Jednalo se o čas příjmu první ADS-B zprávy týkající se daného odletu.
- Čas $t_{ENGSTRT}$ – Jednalo se o čas dokončení spouštění motorů letadla před zahájením pojíždění.
- Čas t_{BOTR} – Jednalo se o čas zahájení vzletu nastavením motorů na vzletový výkon.
- Čas t_{ROT} – Jednalo se o čas rotace letadla na konci rozjezdu po dráze.
- Čas t_{MH} – Jednalo se o čas vystoupení letadla nad směšovací výšku (= nejmenší geometrická výška vysílaná letadlem v průběhu odletu + 3 000 ft); pokud byl rozdíl mezi nejmenší a největší geometrickou výškou menší než 3 000 ft, platilo $t_{MH} = t_{END}$.
- Čas t_{END} – Jednalo se o čas příjmu poslední ADS-B zprávy týkající se daného odletu.

Stejně jako u postupu analýzy pro přílet i zde platilo, že byly relevantní pouze zprávy přijaté v rámci časového intervalu $t \in \langle t_{ENGSTRT}, t_{MH} \rangle$, který obsahoval vyhodnocované provozní režimy LTO cyklu. Hlavní rozdíl oproti postupu určení časových mezníků týkajících se příletu zde spočíval v tom, že zprávy odpovídající jednotlivým pohybům byly procházeny odzadu, tedy od času t_{END} směrem k času t_1 . Jak se totiž ukázalo, tento přístup byl praktičtější s ohledem na obtížnost určení některých časových mezníků, jejichž postupu se věnují následující



odstavce. Na konci tohoto oddílu bude stejně jako v tom předchozím ukázán princip výpočtu příslušných časů TIM a následného uložení všech relevantních dat pro další analýzu.

Postup určení času t_{MH}

V rámci daného odletu byl nejprve určen časový mezník t_{MH} , tedy čas, kdy letadlo během stoupání překonalo směšovací výšku. Její hodnota byla stanovena stejně jako v případě časového mezníku t_{MH} v rámci příletu, tedy přičtením hodnoty 3 000 ft k minimální geometrické výšce vysílané letadlem, kdy se dle předpokladu nacházelo na zemi. Aby tedy bylo možné určit čas t_{MH} , bylo žádoucí, aby rozpětí hodnot vysílané geometrické výšky bylo větší než 3 000 ft (čímž by data určitě obsahovala zprávy vysílané nad i pod směšovací výškou). Pakliže tato podmínka nebyla splněna, byl čas t_{MH} určen jako čas příjmu poslední zprávy (t_{END}), načež byl indikátor kompletnosti provozního režimu „Stoupání“ pro sledovaný pohyb nastaven na hodnotu 0.

V případě splnění výše uvedené podmínky byly postupně odzadu procházeny jednotlivé zprávy pro daný odlet, přičemž byla hledána chronologicky poslední zpráva vysílaná pod směšovací výškou (respektive první taková zpráva v případě procházení odzadu). Předpokladem bylo, že přesný okamžik překonání směšovací výšky (tedy čas t_{MH}) se nacházel někde uvnitř časové mezery mezi touto a chronologicky následující zprávou. Konkrétní postup určení času t_{MH} závisel na délce této časové mezery. Pokud byla tato mezera dostatečně malá (do 10 sekund), byl tento čas určen na základě interpolace založené na času příjmu obou zpráv a v nich obsažené geometrické výšce. V opačném případě byl čas t_{MH} konzervativně určen jako čas příjmu první zprávy, kdy se již letadlo nacházelo nad směšovací výškou. Následně byl indikátor kompletnosti vyhodnocovaného provozního režimu „Stoupání“ pro daný odlet nastaven na hodnotu 1. Odpovídající kód pro určení času t_{MH} včetně počátku větve odpovídající odletu v rámci příkazu `switch-case` je uveden níže:

```
...
case 2 % odlet
    % čas tMH
    minGeoHeight = min(double(movtData(:,8))); % minimální geometrická výška
    mixingHeight = minGeoHeight + 3000; % směšovací výška

    j = 0;

    if range(double(movtData(:,8))) <= 3000 % nelze přesně určit čas tMH
        tMH = double(movtData(end,12)); % tMH = tEND
        climbComplete = 0; % indikátor kompletnosti režimu "Stoupání"
    else % lze přesně určit čas vystoupení nad mixing height
        while double(movtData(end-j,8)) >= mixingHeight
            j = j + 1;
        end
    end
end
```



```

timeGap = double(movtData(end-j+1,12)) - double(movtData(end-j,12)); %
časová mezera

% určení nejvhodnější metody určení času tMH
if timeGap < 10 % dostatečně malá mezera - lze interpolovat
    % metoda interpolace
    y = [double(movtData(end-j,12)) double(movtData(end-j+1,12))];
    x = [double(movtData(end-j,8)) double(movtData(end-j+1,8))];
    x2 = [x(1) mixingHeight x(2)];

    y2 = interp1(x,y,x2); % interpolace času mezi zprávami

    tMH = y2(2); % čas vystoupení nad mixing height
else % příliš velká časová mezera
    j = j - 1; % čas tMH - první zpráva po vystoupení nad mixing height
    tMH = double(movtData(end-j,12)); % čas vystoupení nad mixing height
end

climbComplete = 1; % indikátor kompletnosti režimu "Stoupání"
end
...

```

Postup určení času t_{ROT}

Dalším časovým mezníkem určovaným v rámci odletu byl čas t_{ROT} . Tento čas odpovídal konci rozjezdu letadla na dráze, respektive jeho rotaci, přičemž v souladu s původní definicí ICAO představoval rozhraní mezi provozními režimy „Vzlet“ a „Stoupání“. Jelikož v rámci datových položek formátu ASTERIX není explicitně dána informace o tom, zda se letadlo nachází na zemi či ve vzduchu, bylo nutné tento časový mezník odhadnout konzervativně na základě vhodných parametrů. Těmito parametry byla stejně jako v případě časového mezníku t_{LDG} v rámci příletu geometrická výška a barometrická vertikální rychlost letadla. Jelikož druhý ze zmíněných parametrů nebyl dostupný pro všechny odlety, bylo nutné tuto skutečnost zohlednit v rámci použitého skriptu, jak bude ukázáno níže.

V rámci postupu určení času t_{ROT} byla nejprve nalezena chronologicky poslední zpráva, která současně obsahovala vysílanou geometrickou výšku 50 ft či méně nad minimální geometrickou výškou (již známou z předchozího určení času t_{MH}) a barometrickou vertikální rychlost menší nebo rovnou 400 ft/min (pakliže byla k dispozici). Na základě zkoumání dat bylo vyzorováno, že prakticky všechny odlety na počátku stoupání překročily tuto hodnotu velmi rychle, tudíž volba této hodnoty byla považována za vyhovující pro spolehlivý odhad času konce rozjezdu letadla. Hledaný čas t_{ROT} se opět dle předpokladu nacházel někde v rámci časové mezery mezi touto a následující zprávou; opět tedy byla vyhodnocena délka této mezery a podle ní byla zvolena příslušná metoda stanovení tohoto času. V případě dostatečně malé mezery (pod 10 s) byl tento čas dán jako průměr času příjmu obou zpráv, jinak byl čas t_{ROT} konzervativně určen jako čas příjmu první zprávy po rotaci.



Pro účely následné statistické analýzy byl dále odhadnut kurz dráhy, z něž byla později určena dráha použitá daným pohybem pro vzlet. Tento parametr byl určen na základě průměrné hodnoty traťového úhlu letadla během rotace. Použitý kód pro určení času t_{ROT} včetně kurzu dráhy (včetně naznačené návaznosti na předchozí segment kódu) je uveden níže:

```
...
% čas tROT
if sum(~isnan(double(movtData(:,11)))) > 10
    % k dispozici jsou data o geometrické výšce i baro vertikální rychlosti
    while double(movtData(end-j,8)) > (minGeoHeight + 50) ||
double(movtData(end-j,11)) > 400
        j = j + 1;
    end
else
    % pouze data o geometrické výšce
    while double(movtData(end-j,8)) > (minGeoHeight + 50)
        j = j + 1;
    end
end

timeGap = double(movtData(end-j+1,12)) - double(movtData(end-j,12)); % časová
mezera

% určení nejvhodnější metody určení času tROT
if timeGap < 10 % dostatečně malá mezera - lze průměrovat oba časy
    tROT = mean([double(movtData(end-j,12)) double(movtData(end-j+1,12))]); %
čas rotace; metoda průměru
else % příliš velká časová mezera
    j = j - 1; % vrácení času na první zprávu odpovídající stoupání
    tROT = double(movtData(end-j,12)); % čas rotace
end

% runway heading
RWYhdg = mean([double(movtData(end-j,7)) double(movtData(end-j+1,7))]);
...
```

Postup určení času t_{BOTR}

Následujícím časovým mezníkem byl čas t_{BOTR} , který odpovídal času zahájení vzletu letadla, tj. okamžiku nastavení motorů na vzletový výkon. Zároveň se jednalo o rozhraní mezi provozními režimy „Pojíždění (taxi-out)“ a „Vzlet“. Pro odhad tohoto časového mezníku byla využita traťová rychlost letadla a jeho zrychlení. Traťová rychlost, která již byla předtím na základě výpočtu z informace o poloze letadla obsažena v každé ADS-B zprávě, byla nejprve vyhlazena pomocí klouzavého průměru (funkce `movmean`), načež byla spolu s časem příjmu jednotlivých zpráv použita k výpočtu zrychlení letadla. Vypočítané hodnoty zrychlení v každé zprávě byly poté rovněž vyhlazeny klouzavým průměrem.

Následně byly dále procházeny jednotlivé zprávy, přičemž byla hledána chronologicky poslední zpráva (tj. první zpráva v případě procházení odzadu), která jednak obsahovala



traťovou rychlost menší než 50 kt a jednak zrychlení menší než 2 kt/s^2 . Zatímco údaj o traťové rychlosti sloužil především ke zúžení možností z hlediska určení okamžiku zahájení vzletu, rozhodující byl údaj o zrychlení letadla. Jeho zvolená mezní hodnota (2 kt/s^2) vycházela z již zmiňovaného konferenčního příspěvku [109], přičemž i následná kontrola dat potvrdila, že tato hodnota byla na začátku rozjezdu letadla poměrně rychle překročena s tím, jak rychle rostl tah motorů (který, jak známo z fyziky, je při uvažovaném zjednodušení přímo úměrný výslednému zrychlení). Po nalezení zmiňované zprávy byla stejně jako v případě předchozích časových mezníků nejprve určena délka časové mezery mezi touto a následující zprávou, načež byla zvolena vhodná metoda určení vyhodnocovaného času t_{BOTR} . V případě krátké časové mezery se jednalo o interpolaci na základě času příjmu zpráv a hodnot zrychlení, jinak byl použit čas příjmu první zprávy odpovídající vzletu. Použitý kód je uveden níže:

```
...
% čas tBOTR
time = double(movtData(:,12)); % čas příjmu zpráv
GS = double(movtData(:,6)); % traťová rychlost
GS = movmean(GS,3,'omitnan'); % vyhlazená traťová rychlost
accel = diff(GS)./diff(time); % zrychlení
accel = [NaN; accel]; % srovnání délek vektorů
accel = movmean(accel,3); % vyhlazené zrychlení

while GS(end-j) > 50 || accel(end-j) > 2
    j = j + 1;
end

timeGap = double(movtData(end-j+1,12)) - double(movtData(end-j,12)); % časová
mezera

% určení nejvhodnější metody určení času tBOTR
if timeGap < 10 % dostatečně malá mezera - lze interpolovat
    % určení času tBOTR - metoda interpolace
    y = [time(end-j) time(end-j+1)];
    x = [accel(end-j) accel(end-j+1)];
    x2 = [accel(end-j) 2 accel(end-j+1)];

    y2 = interp1(x,y,x2); % interpolace času mezi zprávami

    tBOTR = y2(2); % čas zahájení vzletu
else % příliš velká časová mezera
    j = j - 1; % vrácení času na první zprávu odpovídající vzletu
    tBOTR = time(end-j); % čas zahájení vzletu
end
...
```

Postup určení času $t_{ENGSTRT}$

Posledním časovým mezníkem v případě odletu byl čas $t_{ENGSTRT}$, jenž představoval odhadovaný čas spuštění motorů. Nutno dodat, že odhad tohoto času byl ve srovnání s ostatními časovými mezníky, kdy bylo zpravidla možné přímo využít některý z dostupných



parametrů (např. výška či rychlost letadla), zatížen vůbec největší nejistotou. Důvodem bylo, že zde bylo nutné z velké části pracovat se zjednodušujícími předpoklady, které byly zformulovány na základě podrobného prozkoumání příslušných dat. Rozdílem oproti jiným časovým mezníkům v rámci odletu také bylo, že zatímco dosud byly zprávy postupně procházeny odzadu, zde se přešlo na první zprávu (čas t_1), načež se pokračovalo chronologicky, tedy opačným směrem oproti dosavadnímu postupu.

První uvažovaný předpoklad založený na obecné praxi spočíval v tom, že existují právě dva možné způsoby opuštění stání – buďto výjezd ze stání vlastní silou, což se týká průjezdných stání, nebo vytlačení ze stání, což se typicky týká tzv. nose-in stání u terminálu. Jak se ukázalo, v prvním jmenovaném případě byly první ADS-B zprávy dostupné bezprostředně před zahájením pojíždění. V tomto případě byl tedy čas spuštění motorů určen na základě času příjmu první zprávy (t_1), od něž bylo odečteno 60 sekund. V případě vytlačení ze stání letadlo zpravidla začalo vysílat ADS-B zprávy ještě před zahájením vytlačení. V takovém případě bylo nutné určit čas zahájení pojíždění po vytlačení, od něž bylo následně odečteno 60 sekund, čímž byl získán odhad času spuštění motorů. Zde tedy bylo předpokládáno, že letadlo spustí své motory až po vytlačení ze stání, přičemž mu bude umožněno bez většího odkladu zahájit pojíždění. Dalším použitým předpokladem bylo, že ke spuštění motorů letadla dochází ve vzdálenosti maximálně 200 metrů od první vysílané polohy, přičemž tento předpoklad vycházel z prozkoumaných dat; je tedy zřejmé, že pro jiná letiště může být tato vzdálenost odlišná.

Během zkoumání dat byla zjištěna skutečnost, že v rámci poskytnutých ADS-B dat chyběly zprávy vysílané letadlem v době, kdy po určitou dobu (obecně déle než 20 sekund) stálo na místě. To se týkalo i zpráv vysílaných mezi ukončením vytlačení letadla ze stání a zahájením pojíždění. V rámci dostupných ADS-B zpráv tedy byl vyhodnocen parametr časové difference příjmu zpráv, který pro každou zprávu uváděl dobu uplynulou od příjmu předchozí zprávy. Ze všech zpráv k danému odletu byly následně vybrány pouze ty zprávy, které byly vysílány v okruhu 200 metrů od první vysílané polohy, načež v nich byla nalezena ta zpráva, která obsahovala maximální hodnotu časové difference příjmu zpráv. Obecně totiž platilo, že v případě vytlačení ze stání právě po příjmu této zprávy letadlo zahájilo pojíždění, tudíž ji bylo možné použít pro odhad času spuštění motorů (tj. odečíst od času jejího příjmu 60 sekund). V některých případech za takovouto zprávou následovala ještě další významná časová mezera (nad 20 sekund), což bylo v rámci skriptu zohledněno. Pokud v okruhu 200 metrů kolem první vysílané polohy nebyla vysílána žádná zpráva s časovou diferencí příjmu zpráv větší než 20 sekund, bylo předpokládáno, že daný pohyb opustil stání vlastní silou, jinak bylo uvažováno, že letadlo bylo ze stání vytlačeno (a poté chvíli stálo na místě, než začalo pojíždět).



Nutno dodat, že výše popsany princip byl založený na skutečnosti, že v poskytnutých ADS-B datech chyběly zprávy, které byly vysílány v době, kdy letadlo stálo na místě. Díky tomu bylo možné poměrně snadno a s dostatečnou jistotou (byť ne stoprocentní) identifikovat vytlačení, respektive zahájení pojiždění letadla na vlastní pohon. Zvolený přístup tedy vycházel ze specifické povahy poskytnutých dat, přičemž v případě kontinuálního příjmu ADS-B zpráv by jej nebylo možné v této podobě uplatnit. Případný alternativní přístup by tedy mohl vycházet například právě ze sledované změny vzdálenosti od první vysílané pozice. Kód v MATLABu použitý pro odhad času $t_{ENGSTRT}$ je uveden níže:

```
...
% čas tENGSTRT
initPos = double(movtData(1,4:5)); % první vysílaná pozice letadla

k = 2;

distFromStand =
deg2km(distance(double(movtData(k,4)),double(movtData(k,5)),initPos(1),initPos(2)
))*1000; % vzdálenost od první pozice

longestPause = 0;

% vyhodnocení nejdelší mezery v příjmu zpráv do 200 m od první polohy
while distFromStand < 200
    msgPause = double(movtData(k,12)) - double(movtData(k-1,12));

    if msgPause > longestPause
        longestPause = msgPause;
        idxLongestPause = k;
    end

    k = k + 1;

    distFromStand =
deg2km(distance(double(movtData(k,4)),double(movtData(k,5)),initPos(1),initPos(2)
))*1000; % aktualizovaná vzdálenost od první polohy
end

% určení času tENGSTRT - s/bez vytlačení ze stání
if longestPause < 20 % bez vytlačení
    tENGSTRT = double(movtData(1,12)) - 60; % odhad - žádné vytlačení
else % s vytlačěním ze stání
    pauseAfterLongest = double(movtData(idxLongestPause+1,12)) -
double(movtData(idxLongestPause,12)); % pauza následující po té nejdelší

    % přítomnost další dlouhé pauzy za tou nejdelší (>=20 s)
    if pauseAfterLongest >= 20
        idxLongestPause = idxLongestPause + 1;
    end

    tENGSTRT = double(movtData(idxLongestPause,12)) - 60; % odhad
end
...
```



Výpočet hodnot TIM a následné uložení dat

Po určení všech příslušných časových mezníků byly vypočítány hodnoty TIM pro provozní režimy týkající se aktuálně vyhodnocovaného odletu. Výpočet hodnoty TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ byl dán následujícím vzorcem:

$$TIM_{TaxiOut} = t_{BOTR} - t_{ENGSTRT}. \quad (2.4)$$

Vzorec pro výpočet doby trvání provozního režimu „Vzlet“ byl dán následovně:

$$TIM_{TakeOff} = t_{ROT} - t_{BOTR}. \quad (2.5)$$

Vzorec pro výpočet hodnoty TIM provozního režimu „Stoupání“ byl dán následovně:

$$TIM_{Climb} = t_{MH} - t_{ROT}. \quad (2.6)$$

Následně byly všechny vypočítané hodnoty uloženy do společné proměnné pro následnou statistickou analýzu. Kromě samotných časových hodnot TIM byl také uložen indikátor kompletnosti režimu „Stoupání“. Stejně jako v případě příletu byly pro umožnění podrobnější statistické analýzy výsledků rovněž uloženy časy $t_{ENGSTRT}$ a t_{BOTR} (zde zjednodušeně považovaný za čas vzletu). Příslušný kód je uveden níže (spolu s navazujícím koncem větvení switch-case):

```
...  
    % hodnoty TIM  
    TIM_IdleOUT = tBOTR - tENGSTRT;  
    TIM_TakeOff = tROT - tBOTR;  
    TIM_Climb = tMH - tROT;  
  
    % uložení hodnot  
    LTOdata(i,11) = num2str(tENGSTRT); % čas spuštění motorů  
    LTOdata(i,12) = num2str(tBOTR); % čas vzletu  
    LTOdata(i,13) = num2str(TIM_IdleOUT); % TIM režimu "Pojíždění (taxi-out)"  
    LTOdata(i,14) = num2str(TIM_TakeOff); % TIM režimu "Vzlet"  
    LTOdata(i,15) = num2str(TIM_Climb); % TIM režimu "Stoupání"  
    LTOdata(i,16) = num2str(climbComplete); % indikátor kompletnosti režimu  
    "Stoupání"  
end
```

2.3.4 Doplnující parametry pro statistickou analýzu

Kromě již uložených hodnot TIM a časových mezníků bylo pro účely následné statistické analýzy žádoucí doplnit tyto údaje o následující parametry:

- Volací znak daného odletu/příletu
- ICAO 24bitová adresa letadla
- Typ pohybu (odlet/přílet)



- Dráha využitá pohybem pro vzlet/přistání

Postup určení volacího znaku a ICAO 24bitové adresy letadla byl založený na nejčastěji vysílané hodnotě; ačkoli na základě předchozího zpracování dat bylo předpokládáno, že v rámci dat týkajících se daného pohybu byla obsažena vždy pouze jedna hodnota, cílem zde bylo zachování maximální robustnosti. Určení typu pohybu vycházelo z hodnoty konkrétního prvku proměnné *movtType*. Logika určení dráhy použité pohybem spočívala v nalezení maximální shody mezi stanoveným kurzem dráhy a jednotlivými drahami. Použitý kód pro určení těchto parametrů a jejich následné uložení ke zbývajícím datům včetně naznačení konce for-cyklu procházejícího jednotlivé pohyby je uveden níže:

```
...
% callsign
callsign = tabulate(movtData(:,3));
callsignShares = cell2mat(callsign(:,3));
[~,idx] = max(callsignShares);
callsign = string(callsign{idx,1}); % callsign
LTodata(i,1) = callsign; % uložení

% ICAO 24bit adresa
ICAOaddress = tabulate(movtData(:,2));
ICAOaddressShares = cell2mat(ICAOaddress(:,3));
[~,idx] = max(ICAOaddressShares);
ICAOaddress = string(ICAOaddress{idx,1}); % adresa
LTodata(i,2) = ICAOaddress; % uložení

% informace o typu pohybu
if movtType(i) == 1
    LTodata(i,3) = "ARR";
else
    LTodata(i,3) = "DEP";
end

% určení dráhy (RWY) pohybu
RWYs = [6 12 24 30]; % vektor možných RWY
RWYhdg = RWYhdg/10; % runway heading letadla v desítkách
RWYmatch = 99; % míra shody - počáteční nastavení

% vyhodnocení všech možných RWY
for j = 1:length(RWYs)
    if abs(RWYhdg - RWYs(j)) < RWYmatch
        RWYmatch = abs(RWYhdg - RWYs(j)); % míra shody - aktualizace
        RWY = RWYs(j); % přiřazení RWY k danému pohybu
    end
end

LTodata(i,4) = num2str(RWY); % uložení údaje o RWY
end % konec iterace for-cyklu procházející aktuální pohyb
```



2.4 Postup statistické analýzy výsledků

Po vyhodnocení hodnot TIM i dalších parametrů pro každý sledovaný pohyb a jejich uložení byla na řadě jejich statistická analýza, jejímž cílem bylo proměnit tyto údaje v konkrétní prezentovatelné a použitelné výstupy. V rámci této analýzy byly rozlišeny dvě úrovně, a to úroveň základní, která pracovala s doposud získanými údaji a sloužila především k získání výsledků dostačujících pro účely základní provozní analytiky a místního zpřesnění LTO cyklu, a úroveň pokročilá, která využívala další data, jež bylo nutné dodat zvenčí, k umožnění podrobnějšího zpřesnění LTO cyklu. Popisu obou těchto úrovní se věnují následující dva oddíly. Oproti předchozím podkapitolám zde již nebudou uváděny ukázky použitého kódu.

2.4.1 Základní úroveň analýzy

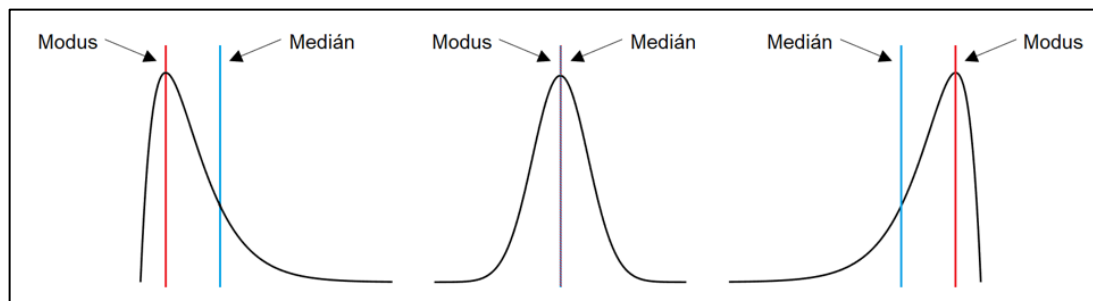
Jak již bylo řečeno, základní úroveň analýzy pracovala pouze s doposud vyhodnocenými parametry týkajícími se jednotlivých pohybů, které bylo možné určit na základě zpracování ADS-B zpráv. Cílem bylo, aby tuto úroveň analýzy bylo možné provést vždy, tedy i v případě absence podrobnějších dat k jednotlivým pohybům. Postup této analýzy byl stanoven tak, aby byly poskytnuty veškeré nezbytné výstupy umožňující požadované zpřesnění časových hodnot TIM jednotlivých provozních režimů LTO cyklu, a tedy ve výsledku také místních výpočtů emisí letištních pohybů.

Na této úrovni byly všechny pohyby brány dohromady jako celek, tedy bez dílčího dělení podle různých kritérií (např. použitá dráha, typ letadla atd.). Pro každý provozní režim byly vyhodnoceny následující statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM:

- Medián
- Mezikvartilové rozpětí (IQR, z angl. *interquartile range*)
- Modus zaokrouhlených hodnot

U dat bylo na této úrovni analýzy zjednodušeně uvažováno, že nepocházejí z normálního rozdělení (což vycházelo mj. z výrazné šikmosti rozdělení hodnot TIM u některých provozních režimů). Z toho důvodu byl tedy zvolen medián namísto průměru. Ze stejného důvodu bylo využito IQR místo směrodatné odchylky. Tato charakteristika udává variabilitu v datech a pro uživatele byla tedy především doplňující, informativní povahy. Z důvodu zmiňované šikmosti rozdělení u některých hodnot byl rovněž pro všechny provozní režimy vyhodnocen modus. Jelikož modus představuje nejčastější hodnotu ve výběru, bylo nutné spojitě hodnoty převést na diskrétní, což bylo učiněno jejich zaokrouhlením. Pro provozní režimy „Vzlet“ a „Stoupání“ byly hodnoty zaokrouhleny na jednotky; pro ostatní režimy bylo vzhledem k mnohdy významnému rozpětí hodnot (až kolem 1 000 s) považováno za výhodnější jejich zaokrouhlení

na desítky. Výhoda současného zohlednění mediánu i modu je zřejmá z obr. 25, kde jsou pro ukázkou zobrazena tři různá rozdělení dat – dvě šikmá a jedno symetrické (normální). Jak je vidět, zatímco v případě symetrického rozdělení představuje medián zároveň nejčetnější hodnotu (tedy modus), v případě šikmého rozdělení tomu tak již není.



Obrázek 25: Medián a modus u šikmých (vlevo, vpravo) a symetrických (uprostřed) dat

Využití mediánu či modu pro zpřesnění hodnoty TIM daného provozního režimu v případě šikmých dat má své výhody i nevýhody. V případě modu se kolem něj sice může soustředit nemalá část hodnot, o to značnější je však jeho odchylka od vzdálenějších hodnot, jež může v případě výpočtů emisí vést k jejich podhodnocení či naopak nadhodnocení. Oproti tomu medián lépe zohledňuje rozmanitost hodnot především v případě jejich většího rozpětí, což je případem zejména u pojiždění; o to méně se však může blížit hodnotám s vysokou četností. Je tedy zřejmé, že neexistuje jednoznačný závěr o tom, která z charakteristik je vhodnější; z toho důvodu byly tedy v rámci této analýzy vyhodnoceny obě z nich, přičemž jejich následné použití je na rozhodnutí uživatele. Využití modu může být praktické například za situace, kdy počet odlehlých hodnot je minimální (tj. rozpětí hodnot je menší); rozhodnutí by tedy v každém případě mělo vyplývat také z vizuálního posouzení rozdělení dat.

Výše uvedené charakteristiky bylo v rámci této úrovně analýzy možné vyhodnocovat jednak pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období, jednak souhrnně pro celé sledované období. Zatímco první jmenovaný případ lze využít například pro podrobnější zkoumání variability vyhodnocovaných charakteristik či konkrétní případové studie sledující například pouze jediný den provozu, druhý jmenovaný případ je praktický zejména v případě, kdy je cílem zpřesnění hodnot TIM na základě většího množství dat. Kromě zpřesnění hodnot TIM jednotlivých provozních režimů LTO cyklu bylo součástí této úrovně analýzy rovněž vyhodnocení některých základních letištních provozních statistik, které měly především doplňující, informativní účel. Konkrétně se jednalo o následující:

- Počet odletů a příletů za každý den sledovaného období
- Využití letištních drah odlety a přílety
- Vývoj počtu odletů a příletů po hodinách v průběhu dne



Prezentace výsledků měla dvě možné formy, tabulkově nebo graficky. V rámci tabulek byly prezentovány vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé dny za sledované období pro každý provozní režim zvlášť. Stejně tak byly touto formou prezentovány souhrnné výsledky pro jednotlivé provozní režimy za celé sledované období. U některých provozních režimů bylo žádoucí zahrnout také údaj o podílu využitých hodnot, což souviselo s již dříve definovaným indikátorem kompletnosti daného režimu. Účelem zahrnutí tohoto údaje do prezentace výsledků bylo upozornit uživatele na možný (byť, jak se ukázalo, nepravděpodobný) scénář, kdy by prezentované charakteristiky vycházely z omezeného počtu dat. Grafická prezentace výsledků týkajících se hodnot TIM byla dvojího typu. V případě výsledků na úrovni jednotlivých dní měla podobu krabicového diagramu (tzv. boxplotu), jenž umožňuje efektivním a úsporným způsobem získat základní představu o rozdělení hodnot v jednotlivých dnech. Pro souhrnné výsledky byl naopak preferován graf četností neboli histogram. Jeho silnou stránkou je, že velice dobře ilustruje rozdělení dat; pro prezentaci výsledků v případě porovnávání více výběrů (respektive jednotlivých dní) je však z hlediska rozsahu ve srovnání s boxploty méně efektivní.

První z vyhodnocovaných letištních provozních statistik byl počet odletů a příletů pro jednotlivé dny sledovaného období. Pro tuto statistiku byla zvolena pouze grafická prezentace, a to prostřednictvím skupinového sloupcového grafu se zobrazenými hodnotami. V případě sledování využití drah byla možná dvojitá prezentace výsledků, opět podle toho, zda se jednalo o data za celé období či za jednotlivé dny. V prvním jmenovaném případě bylo zvoleno využití koláčového grafu, kdy bylo pro odlety a přílety zvlášť prezentováno využití jednotlivých drah. Pakliže toto bylo vyhodnocováno pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období, byl s ohledem na efektivnost zobrazení výsledků vybrán sloupcový graf, respektive skládaný sloupcový graf ukazující pro každý den procentuální podíly odletů a příletů na každé dráze. Při znalosti počtu odletů a příletů za daný den lze procenta následně přepočítat na počty pohybů. Poslední z vyhodnocovaných statistik byl počet odletů a příletů po hodinách v průběhu dne. Pro prezentaci této statistiky byla zvolena forma sloupcového grafu s popisky hodnot, a to bez ohledu na to, zda byly prezentovány souhrnné výsledky či výsledky pro jednotlivé dny. V případě souhrnných výsledků byla prezentována průměrná hodnota pro každou hodinu během dne.

2.4.2 Pokročilá úroveň analýzy

Zatímco základní úroveň analýzy byla z hlediska hodnot TIM zaměřena čistě na souhrnné statistiky, v rámci pokročilé úrovně analýzy byly tyto hodnoty analyzovány podrobněji, což bylo umožněno využitím většího množství parametrů popisujících jednotlivé pohyby. Data k těmto parametrům však již nebylo možné odvodit ze zpracovaných ADS-B zpráv, ale bylo nutné je nalézt externě. Jak bude blíže popsáno níže, tyto parametry umožnily rozdělení pohybů,



potazmo hodnot TIM, podle různých kritérií v závislosti na vyhodnocovaném provozním režimu. Tyto dodatečné parametry byly následující:

- Rejstříková značka letadla
- Typ letadla
- Kategorie letadla podle rychlosti přiblížení
- Kategorie letadla (vlastní dělení)

Pro účely této práce byla vytvořena vlastní databáze obsahující tyto údaje. Jelikož se údaje týkaly letadel realizujících sledované pohyby, byl každý záznam v této databázi vztažen na jedno konkrétní letadlo, respektive jednu konkrétní ICAO 24bitovou adresu. Celkově bylo v rámci sledovaného období zaznamenáno 1 061 jedinečných adres. Ukázka z této databáze je v tab. 5 níže.

Tabulka 5: Ukázka z vlastní databáze letadel vytvořené pro účely pokročilé úrovně analýzy

ICAO 24bit adresa	Rejstříková značka letadla	Typ letadla	Kategorie letadla podle rychlosti přiblížení	Kategorie letadla (vlastní)
49D2E4	OK-JRT	C680	C	B
C02966	C-FPRP	B738	D	NB
49D365	OK-TSF	B738	D	NB
49D2B7	OK-TVW	B738	D	NB
49D00D	OK-TVJ	B738	D	NB
49D423	OK-SWM	B38M	D	NB

První dva parametry byly nalezeny podle ICAO 24bitové adresy daného letadla; zbývající parametry vycházely ze zjištěné informace o typu letadla. Hlavním zdrojem dat týkajících se prvních dvou parametrů byla volně dostupná databáze letadel spravovaná organizací OpenSky Network. Jelikož ADS-B data použita v této práci pocházela z druhé poloviny měsíce června roku 2023, byla využita verze této databáze z července toho roku [110]. V případě, že pro některou z adres v databázi OpenSky neexistoval záznam, nebo byl záznam chybný (typicky když byla daná adresa mezitím přiřazena jinému letadlu, přičemž toto nebylo v databázi aktualizováno), byly tyto údaje doplněny z jiných on-line zdrojů, a to konkrétně z webových stránek Flightradar24, Plane Finder a Airfleets. Informace týkající se kategorie letadla podle rychlosti přiblížení byly prioritně převzaty z výkonnostní databáze spravované organizací EUROCONTROL [111]; jako záložní zdroj sloužila výkonnostní databáze spravovaná americkým úřadem FAA [112].



Posledním údajem v databázi byla kategorie daného letadla dle vlastní kategorizace. Pro tyto účely bylo definováno celkem pět kategorií, jež jsou uvedeny níže:

- B – soukromá letadla (business jety)
- NB – úzkotrupá proudová dopravní/nákladní letadla
- WB – širokotrupá proudová dopravní/nákladní letadla
- T – turbovrtulová dopravní/nákladní letadla
- GA – letadla všeobecného letectví

V rámci této úrovně analýzy byly vyhodnocovány stejné statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM jednotlivých provozních režimů, jako v případě základní úrovně analýzy. Jak však již bylo zmíněno, v rámci této úrovně byly jednotlivé pohyby (potažmo hodnoty TIM) rozděleny podle různých kritérií, která byla částečně založena i na výše uvedených dodatečně nalezených parametrech. Pro jednotlivé provozní režimy byla tato kritéria uplatňována podle vhodnosti; jejich přehled je uveden níže v tab. 6.

Tabulka 6: Sledovaná kritéria u jednotlivých provozních režimů v rámci pokročilé úrovně analýzy

Kritérium	Provozní režim „Přiblížení“	Provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	Provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	Provozní režim „Vzlet“	Provozní režim „Stoupání“
Typ letadla	Ano	–	–	Ano	Ano
Kategorie letadla podle rychlosti přiblížení	Ano	–	–	–	–
Použitá dráha	–	Ano	Ano	–	–
Kategorie letadla (vlastní)	Ano	–	–	Ano	Ano

Kritérium „Kategorie letadla podle rychlosti přiblížení“ bylo použito pouze pro provozní režim „Přiblížení“. Pro tento provozní režim a také pro provozní režimy „Vzlet“ a „Stoupání“, u nichž je hodnota TIM ovlivněna především výkonnostními i jinými charakteristikami letadla, byla dále uplatněna kritéria „Typ letadla“ a „Kategorie letadla (vlastní)“. Provozní režimy „Pojíždění (taxi-in)“ a „Pojíždění (taxi-out)“ byly řešeny specifickým způsobem. V rámci teoretického úvodu do problematiky LTO cyklu bylo zmíněno, že tyto provozní režimy jsou spojené s mnohem větší neurčitostí způsobenou celou řadou faktorů, jako je například konfigurace systému pojezdových drah či aktuální provozní situace na letišti. Parametry spojené s letadlem, například typ letadla či jeho výkonnostní a jiné charakteristiky, mají zřejmě mnohem menší vliv než u jiných provozních režimů. Jediným uplatnitelným kritériem z tab. 6 tedy byla použitá dráha, která má nepochybně vliv na pojezdovou vzdálenost a tím pádem i dobu pojíždění.



Z tohoto důvodu tedy byly hodnoty TIM pro tyto provozní režimy posouzeny specificky, s ohledem na jejich dynamiku během dne. Sledován byl jejich vývoj v průběhu dne; pro tento účel byla data spojena do celkem dvanácti skupin odpovídajících dvouhodinovým intervalům během dne (tj. 00:00-01:59, 02:00-03:59 atd.). V rámci stejných intervalů byl poté vyhodnocen průměrný celkový počet pohybů, tedy odletů i příletů dohromady; přičemž toto mělo reprezentovat intenzitu provozu na letišti. Logikou tedy bylo poukázat jednak na variabilitu samotných hodnot TIM během dne a jednak na případnou souvislost s intenzitou provozu na letišti. Podrobnější analýza dílčích faktorů ovlivňujících hodnoty TIM u těchto provozních režimů nebyla provedena s ohledem na možnosti a rozsah této práce.

Pro lepší přehlednost byla prezentace výsledků na této úrovni analýzy rozdělena do jednotlivých oddílů podle provozních režimů. Forma prezentace výsledků byla stejná bez ohledu na to, zda byly posuzovány výsledky za celé sledované období (respektive více dní dohromady), nebo pouze za jediný den; v této práci však, jak bude zmíněno, budou v rámci této úrovně analýzy prezentovány pouze souhrnné výsledky (tj. za celé sledované období). V případě režimů „Přiblížení“, „Vzlet“ a „Stoupání“ byly výsledky prezentovány po jednotlivých kritériích; pokaždé nejprve formou tabulky obsahující vyhodnocené statistické charakteristiky po jednotlivých kategoriích v rámci daného kritéria. Tato tabulka byla následně doplněná grafickým zobrazením rozdělení hodnot prostřednictvím boxplotů pro jednotlivé kategorie. Pro všechna kritéria s výjimkou kritéria „Typ letadla“ byly tyto boxploty dále doplněny grafem znázorňujícím odhadované hustoty pravděpodobnosti (PDF, z angl. *probability density function*) pro jednotlivé kategorie. Tyto odhady byly učiněny prostřednictvím tzv. jádrového odhadu hustoty (*kernel density estimation*). Jednotlivé statistické charakteristiky uvedené v tabulkách byly následně doplněny o hodnotu TIM, jíž odpovídalo maximum odhadnuté PDF.

V případě provozních režimů „Pojíždění (taxi-in)“ a „Pojíždění (taxi-out)“ byla prezentace výsledků mírně odlišná. Nejprve byly pro každou dráhu zvlášť uvedeny v tabulkové formě vyhodnocované statistické charakteristiky odpovídající jednotlivým dvouhodinovým intervalům v průběhu dne. K těmto charakteristikám byl následně doplněn celkový počet pohybů v rámci tohoto intervalu. Pakliže byly prezentovány výsledky za více dní, jednalo se o průměrný počet pohybů. Tyto výsledky byly následně prezentovány také graficky, a to prostřednictvím boxplotů pro jednotlivé dvouhodinové intervaly. V rámci stejného obrázku byl rovněž vykreslen průběh intenzity provozu během dne, jež byla reprezentována celkovým, respektive průměrným počtem pohybů. Následně byly prezentovány souhrnné výsledky bez dílčího dělení na intervaly během dne, přičemž postup této prezentace již byl shodný s ostatními provozními režimy – tj. nejprve prezentace vyhodnocených charakteristik pro jednotlivé dráhy a následně grafická prezentace boxplotů a odhadnutých hustot pravděpodobnosti.



3 Výsledky aplikace metodiky

V této kapitole budou představeny výsledky aplikace metodiky, popsané v předchozí kapitole, na skutečných ADS-B datech, jež byla poskytnuta pro účely této práce. Kapitola bude rozdělena na dvě podkapitoly, přičemž toto dělení vychází z úrovně analýzy popsaných v podkapitole 2.4.

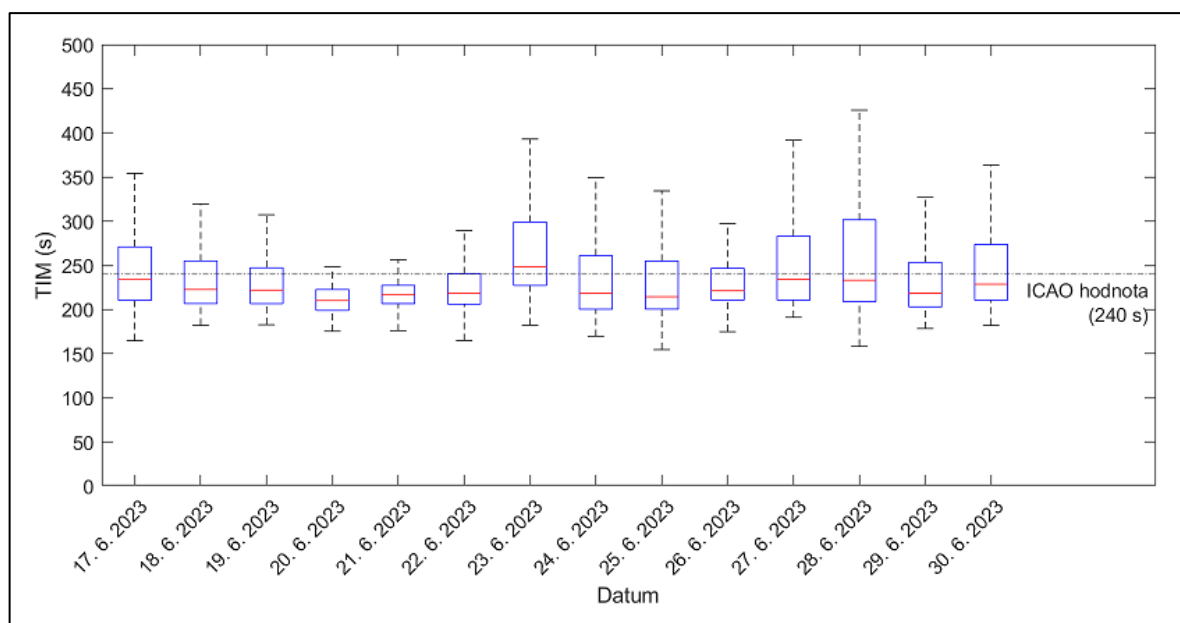
3.1 Základní úroveň analýzy

V této podkapitole budou prezentovány výsledky základní úrovně analýzy vyhodnocených parametrů sledovaných pohybů. Nejprve budou prezentovány výsledky týkající se hodnot TIM pro každý provozní režim, a to jednak pro jednotlivé dny sledovaného období (od 17. 6. 2023 do 30. 6. 2023) a jednak souhrnně za celé období. Následně budou prezentovány výsledky týkající se vyhodnocovaných doplňujících letištních provozních statistik.

Tabulka 7 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Přiblížení“ jednotlivě pro všech 14 dní v rámci sledovaného období. Rozdělení hodnot TIM pro tento provozní režim je dále ukázáno prostřednictvím boxplotů pro jednotlivé dny na obr. 26.

Tabulka 7: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Přiblížení“ pro jednotlivé dny

Datum	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Podíl využitých hodnot (%)
Sobota 17. 6. 2023	234,53	60,65	210	96,84
Neděle 18. 6. 2023	222,62	48,29	210	98,47
Pondělí 19. 6. 2023	222,01	40,55	210	98,87
Úterý 20. 6. 2023	210,15	23,65	210	100,00
Středa 21. 6. 2023	216,51	20,62	220	100,00
Čtvrtek 22. 6. 2023	218,16	34,41	210	98,38
Pátek 23. 6. 2023	248,48	71,72	220	97,81
Sobota 24. 6. 2023	218,18	60,68	200	99,39
Neděle 25. 6. 2023	214,44	54,38	210	96,94
Pondělí 26. 6. 2023	221,19	36,08	220	98,91
Úterý 27. 6. 2023	233,98	72,41	210	99,39
Středa 28. 6. 2023	233,16	92,62	200	97,30
Čtvrtek 29. 6. 2023	218,36	50,42	200	97,44
Pátek 30. 6. 2023	228,69	63,12	210	98,48

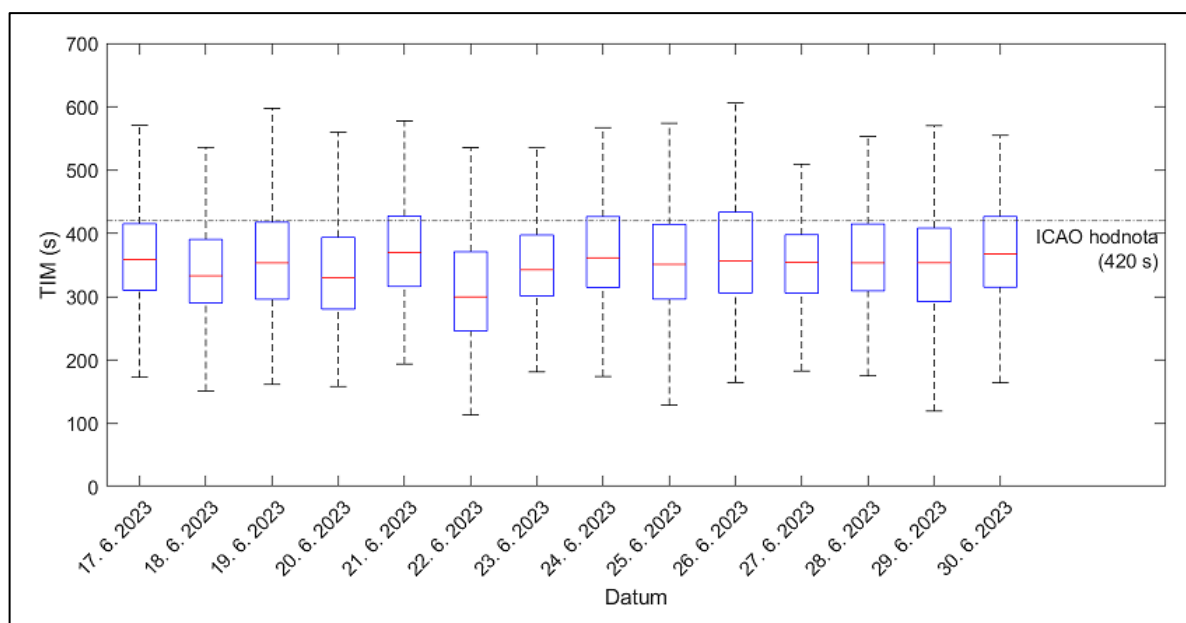


Obrázek 26: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Přiblížení“ pro jednotlivé dny (bez odlehlých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO

Tabulka 8 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-in)“ pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období. Rozdělení hodnot TIM je poté ukázáno boxploty pro jednotlivé dny na obr. 27.

Tabulka 8: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“ pro jednotlivé dny

Datum	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Podíl využitých hodnot (%)
Sobota 17. 6. 2023	358,48	105,43	320	99,37
Neděle 18. 6. 2023	333,21	100,38	330	97,45
Pondělí 19. 6. 2023	353,48	121,63	290	98,87
Úterý 20. 6. 2023	329,97	113,12	330	98,80
Středa 21. 6. 2023	369,50	111,10	340	99,43
Čtvrtek 22. 6. 2023	299,90	124,79	270	98,38
Pátek 23. 6. 2023	342,60	96,49	330	97,27
Sobota 24. 6. 2023	361,59	111,55	320	100,00
Neděle 25. 6. 2023	351,21	118,27	330	98,47
Pondělí 26. 6. 2023	356,32	127,82	290	98,91
Úterý 27. 6. 2023	354,48	92,38	360	98,16
Středa 28. 6. 2023	353,54	105,58	320	98,38
Čtvrtek 29. 6. 2023	353,70	116,30	360	99,49
Pátek 30. 6. 2023	367,53	111,44	350	97,98

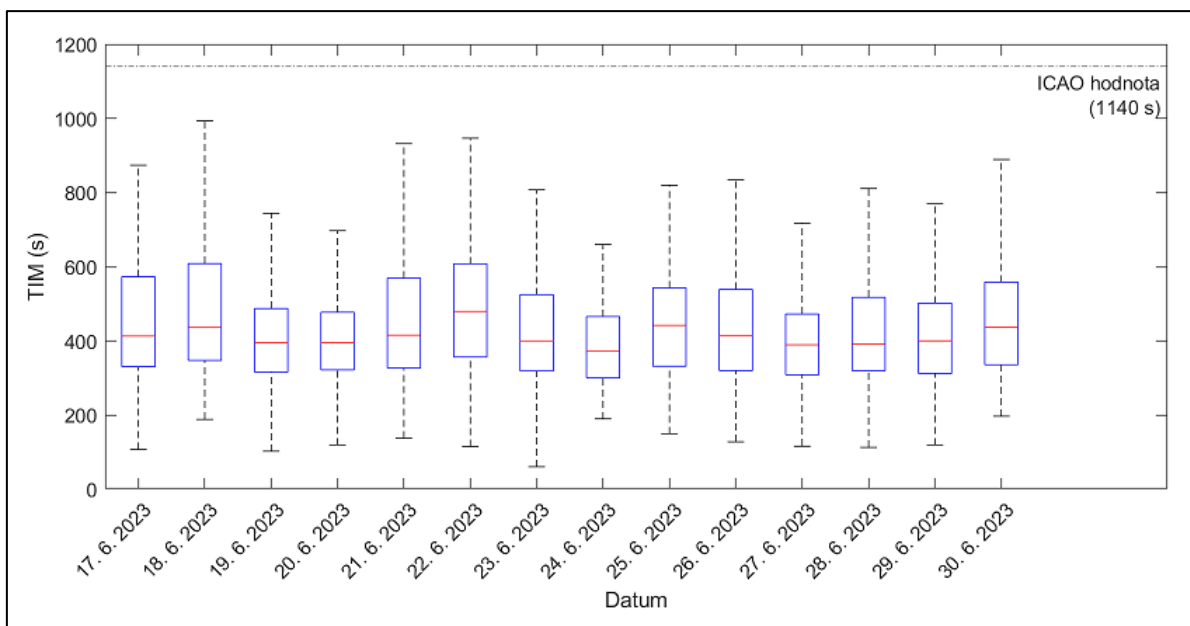


Obrázek 27: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-in)“ pro jednotlivé dny (bez odlehých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO

Tabulka 9 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období. Rozdělení hodnot TIM je poté ukázáno pomocí boxplotů pro jednotlivé dny na obr. 28.

Tabulka 9: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“ pro jednotlivé dny

Datum	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
Sobota 17. 6. 2023	413,27	242,56	350
Neděle 18. 6. 2023	438,10	260,87	330
Pondělí 19. 6. 2023	395,54	171,68	380
Úterý 20. 6. 2023	395,86	155,29	390
Středa 21. 6. 2023	415,89	242,36	340
Čtvrtek 22. 6. 2023	479,97	251,69	350
Pátek 23. 6. 2023	400,46	206,14	400
Sobota 24. 6. 2023	371,96	165,50	290
Neděle 25. 6. 2023	442,37	211,09	460
Pondělí 26. 6. 2023	413,64	218,85	350
Úterý 27. 6. 2023	389,87	163,54	290
Středa 28. 6. 2023	391,75	197,51	350
Čtvrtek 29. 6. 2023	400,56	189,84	430
Pátek 30. 6. 2023	436,63	222,88	260

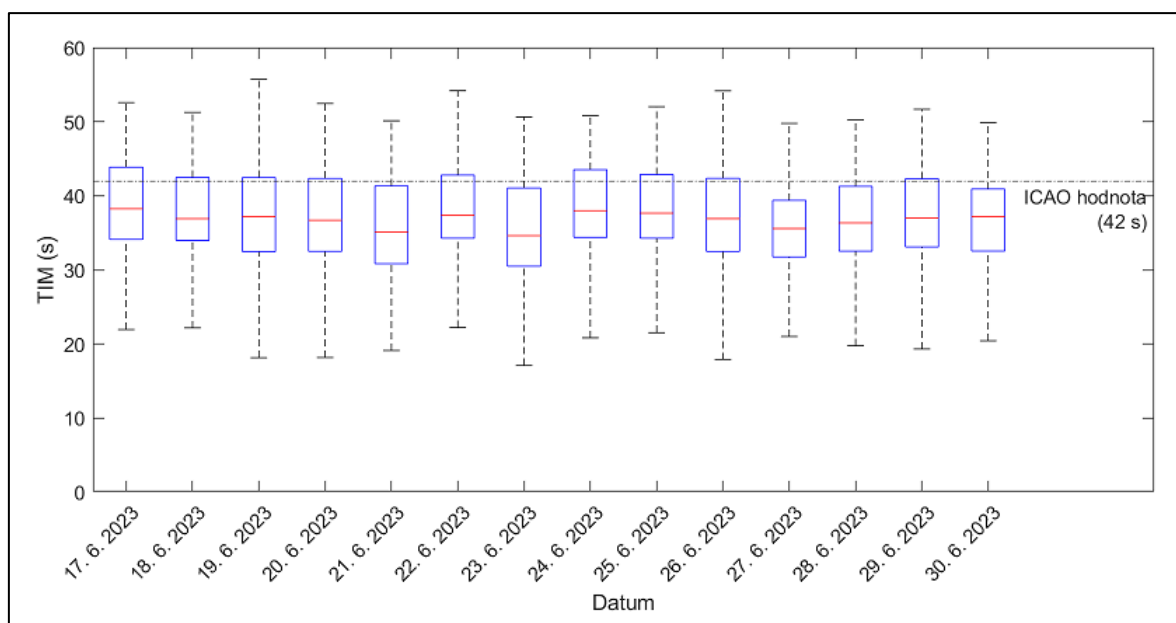


Obrázek 28: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ pro jednotlivé dny (bez odlehých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO

Tabulka 10 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Vzlet“ pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období. Rozdělení hodnot TIM je poté ukázáno pomocí boxplotů pro jednotlivé dny na obr. 29.

Tabulka 10: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Vzlet“ pro jednotlivé dny

Datum	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
Sobota 17. 6. 2023	38,25	9,75	34
Neděle 18. 6. 2023	36,91	8,47	35
Pondělí 19. 6. 2023	37,17	9,97	33
Úterý 20. 6. 2023	36,70	9,84	35
Středa 21. 6. 2023	35,12	10,48	34
Čtvrtek 22. 6. 2023	37,41	8,51	36
Pátek 23. 6. 2023	34,63	10,57	31
Sobota 24. 6. 2023	38,00	9,13	38
Neděle 25. 6. 2023	37,66	8,58	37
Pondělí 26. 6. 2023	36,92	9,87	37
Úterý 27. 6. 2023	35,58	7,63	36
Středa 28. 6. 2023	36,35	8,75	35
Čtvrtek 29. 6. 2023	37,02	9,20	36
Pátek 30. 6. 2023	37,22	8,37	39

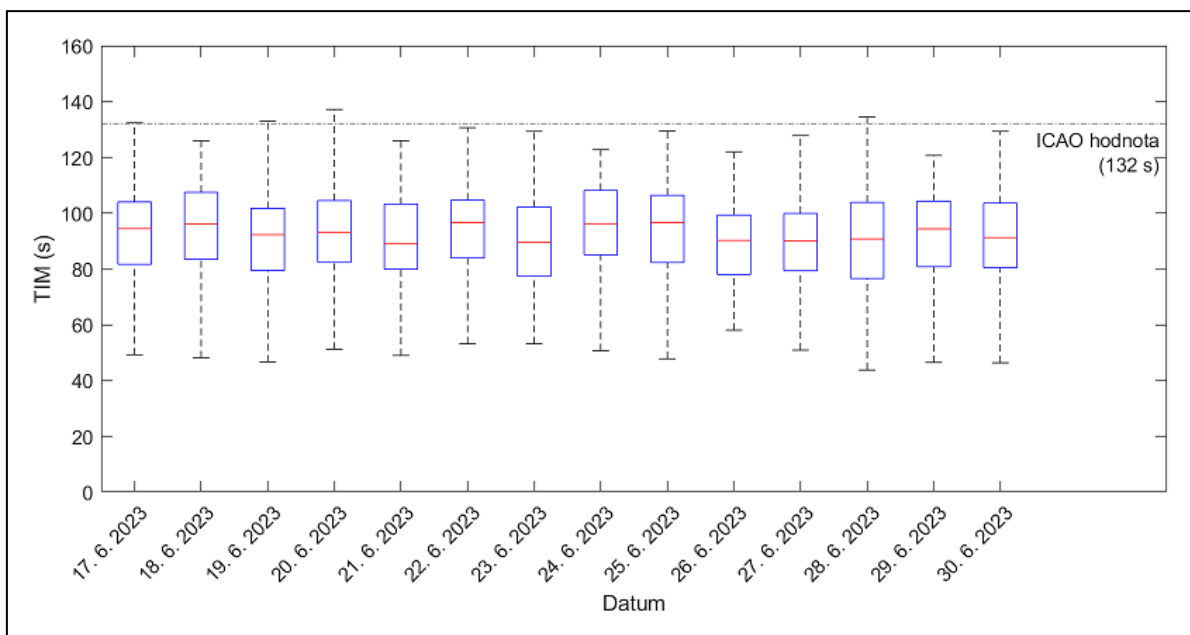


Obrázek 29: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Vzlet“ pro jednotlivé dny (bez odlehých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO

Tabulka 11 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Stoupání“ pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období. Rozdělení hodnot TIM je poté ukázáno prostřednictvím boxplotů pro jednotlivé dny na obr. 30.

Tabulka 11: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Stoupání“ pro jednotlivé dny

Datum	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Podíl využitých hodnot (%)
Sobota 17. 6. 2023	94,47	22,36	89	100,00
Neděle 18. 6. 2023	96,23	23,99	105	100,00
Pondělí 19. 6. 2023	92,35	22,32	85	100,00
Úterý 20. 6. 2023	93,24	22,16	101	100,00
Středa 21. 6. 2023	89,19	23,42	84	100,00
Čtvrtek 22. 6. 2023	96,57	20,70	100	100,00
Pátek 23. 6. 2023	89,61	24,92	73	100,00
Sobota 24. 6. 2023	96,28	23,08	108	100,00
Neděle 25. 6. 2023	96,64	24,07	108	100,00
Pondělí 26. 6. 2023	90,27	21,29	78	99,46
Úterý 27. 6. 2023	90,10	20,57	96	100,00
Středa 28. 6. 2023	90,81	27,24	79	99,47
Čtvrtek 29. 6. 2023	94,38	23,52	103	100,00
Pátek 30. 6. 2023	91,27	23,16	81	100,00



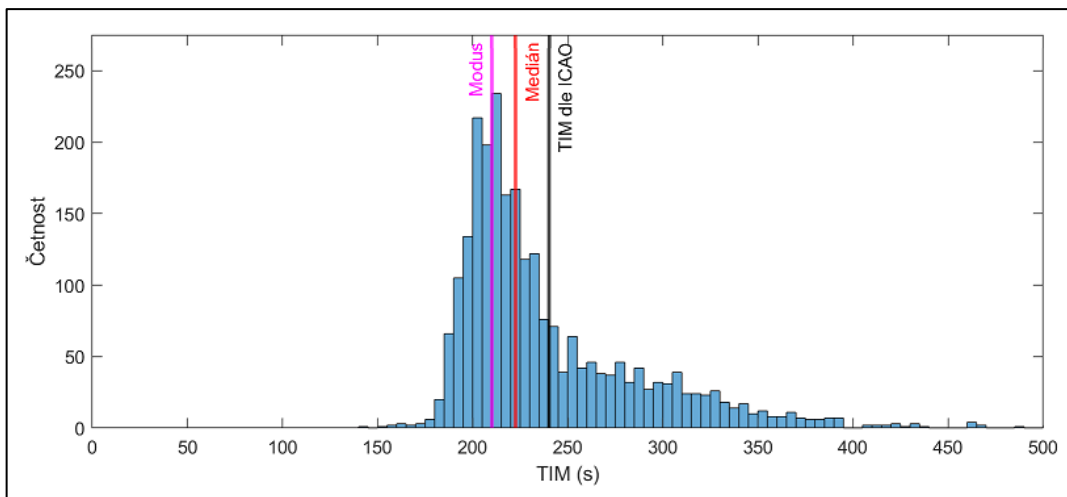
Obrázek 30: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Stoupání“ pro jednotlivé dny (bez odlehých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO

Tabulka 12 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM pro všechny provozní režimy LTO cyklu souhrnně za celé sledované 14denní období. Tyto hodnoty vycházejí z dat pro 2 527 přiletů a 2 552 odletů.

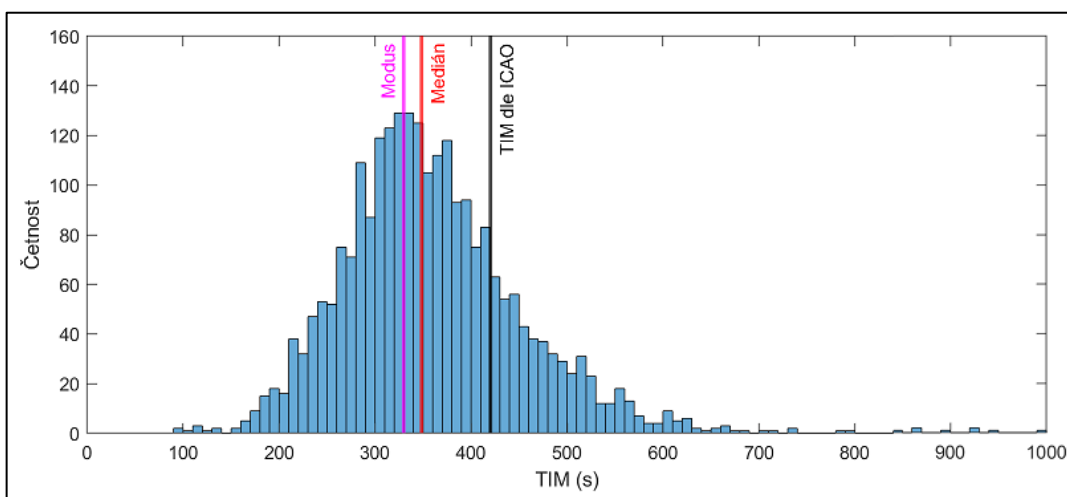
Tabulka 12: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé provozní režimy za celé sledované období

Provozní režim	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Podíl využitých hodnot (%)
Přiblížení	222,62	54,93	210	98,42
Pojíždění (taxi-in)	348,10	113,59	330	98,62
Pojíždění (taxi-out)	411,11	206,60	350	100,00
Vzlet	36,86	9,45	34	100,00
Stoupání	93,37	23,93	99	99,92

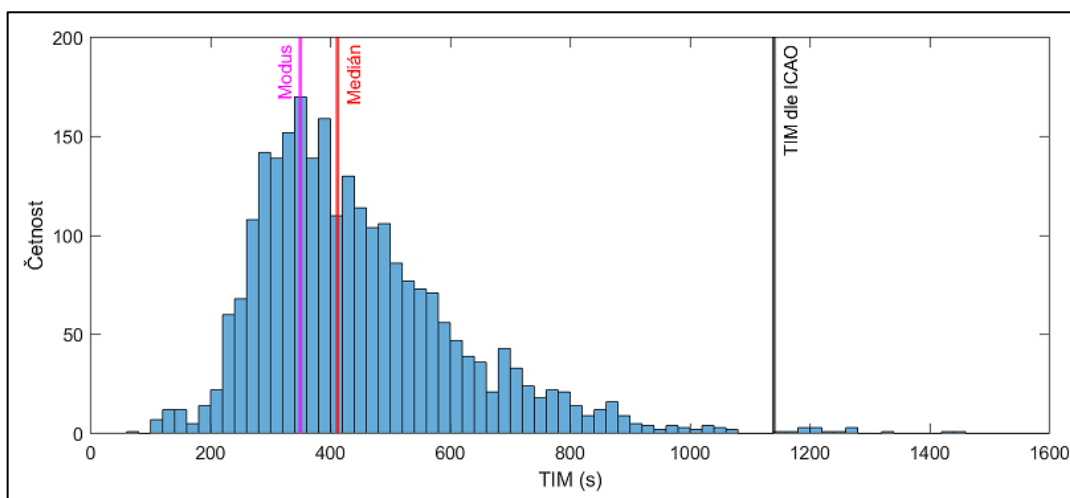
Na následujících obrázcích (obr. 31 až 35) jsou zobrazeny histogramy ukazující rozdělení všech využitých hodnot TIM jednotlivých provozních režimů v rámci celého sledovaného období. Součástí každého histogramu je vyznačená standardní hodnota TIM pro daný provozní režim definovaná ICAO (černá svíslá čára), dále vyhodnocená mediánová hodnota TIM (červená svíslá čára) a modus zaokrouhlených hodnot (magenta svíslá čára).



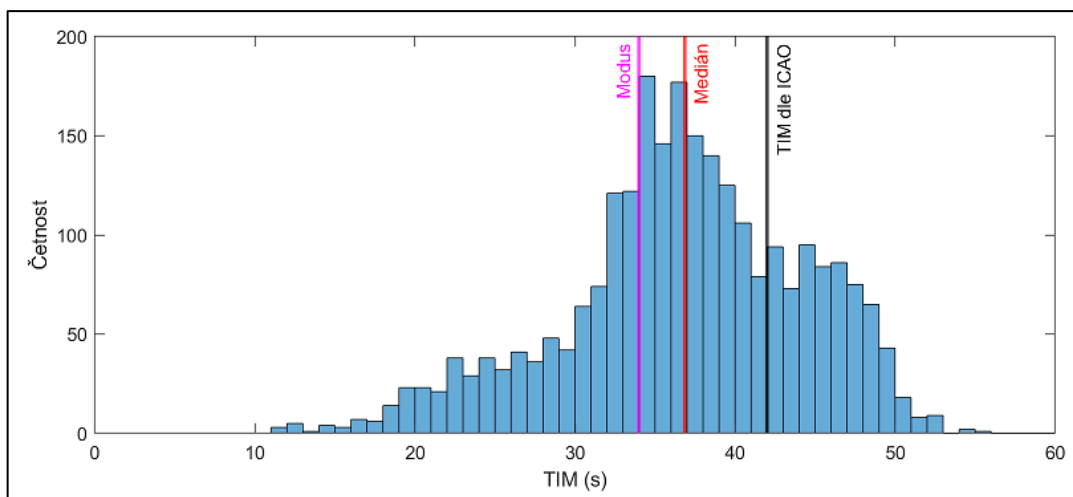
Obrázek 31: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Přiblížení“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (240 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot



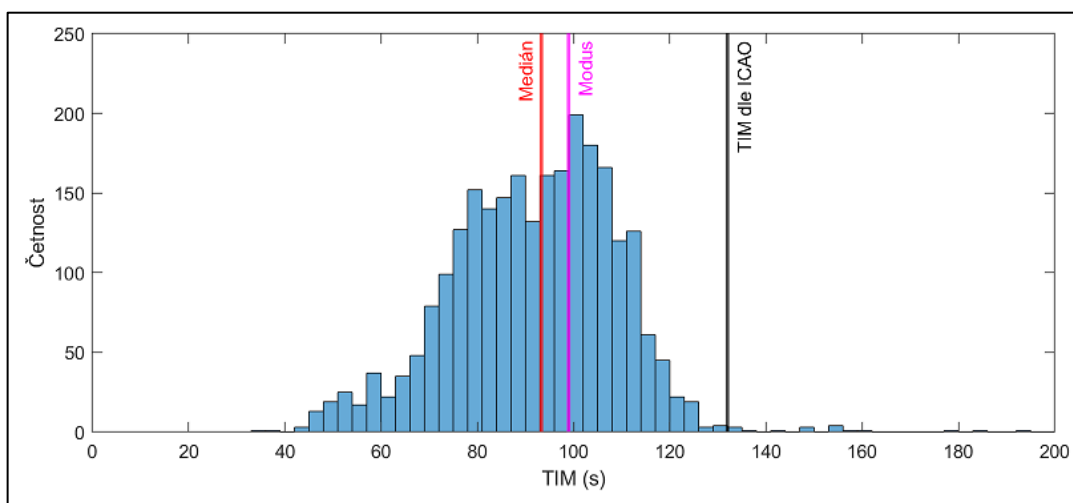
Obrázek 32: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (420 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot



Obrázek 33: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (1 140 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot

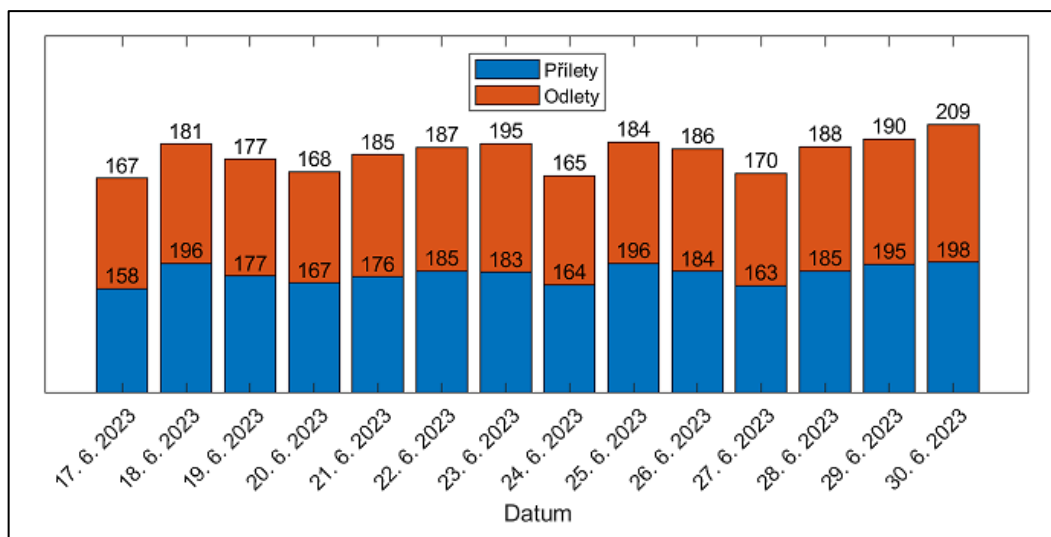


Obrázek 34: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Vzlet“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (42 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot



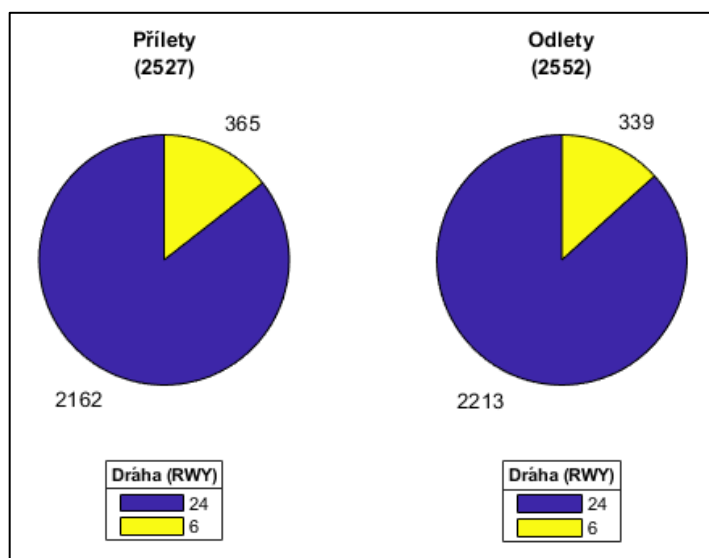
Obrázek 35: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Stoupání“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (132 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot

Součástí základní úrovně analýzy bylo také vyhodnocení některých základních letištních provozních statistik. Tou první byl počet zaznamenaných odletů a přiletů pro každý ze sledovaných dní, což je prezentováno skládaným sloupcovým grafem na obr. 36.

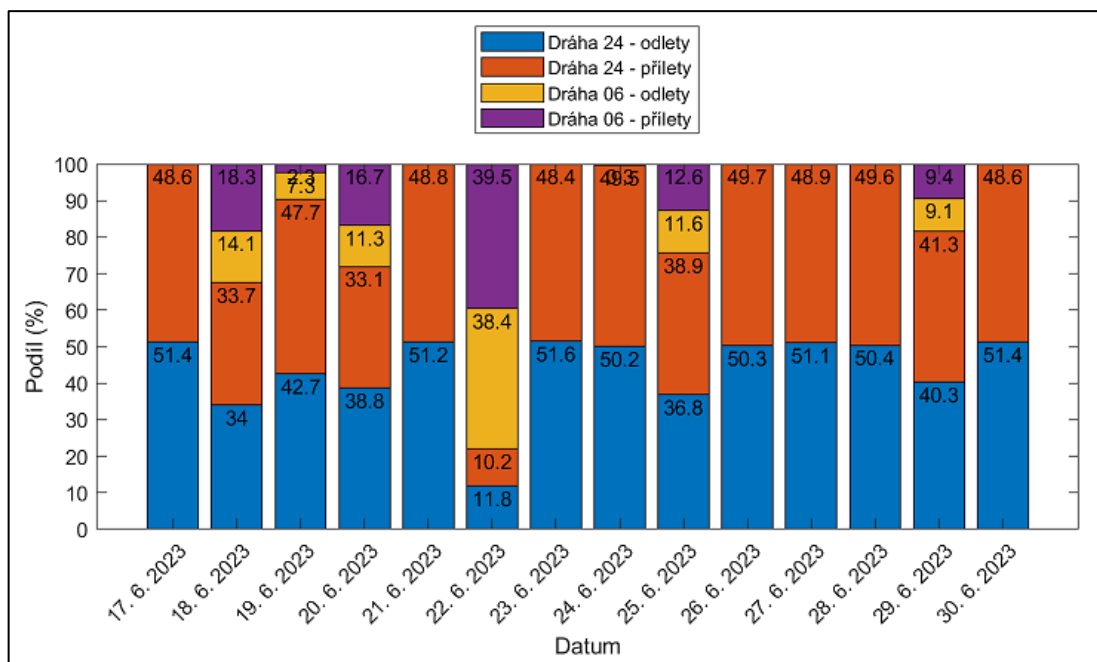


Obrázek 36: Počet zaznamenaných odletů a přiletů pro každý den sledovaného období

Další z vyhodnocovaných statistik bylo využití jednotlivých drah letištními pohyby. Toto je prezentováno na obr. 37 ve formě dvou koláčových grafů (pro přiletý a odlety zvlášť), přičemž jsou zde zahrnuta data za celé sledované období. Na obr. 38 je prezentováno procentuální využití jednotlivých drah odlety a přiletý pro každý den v rámci celého sledovaného období.

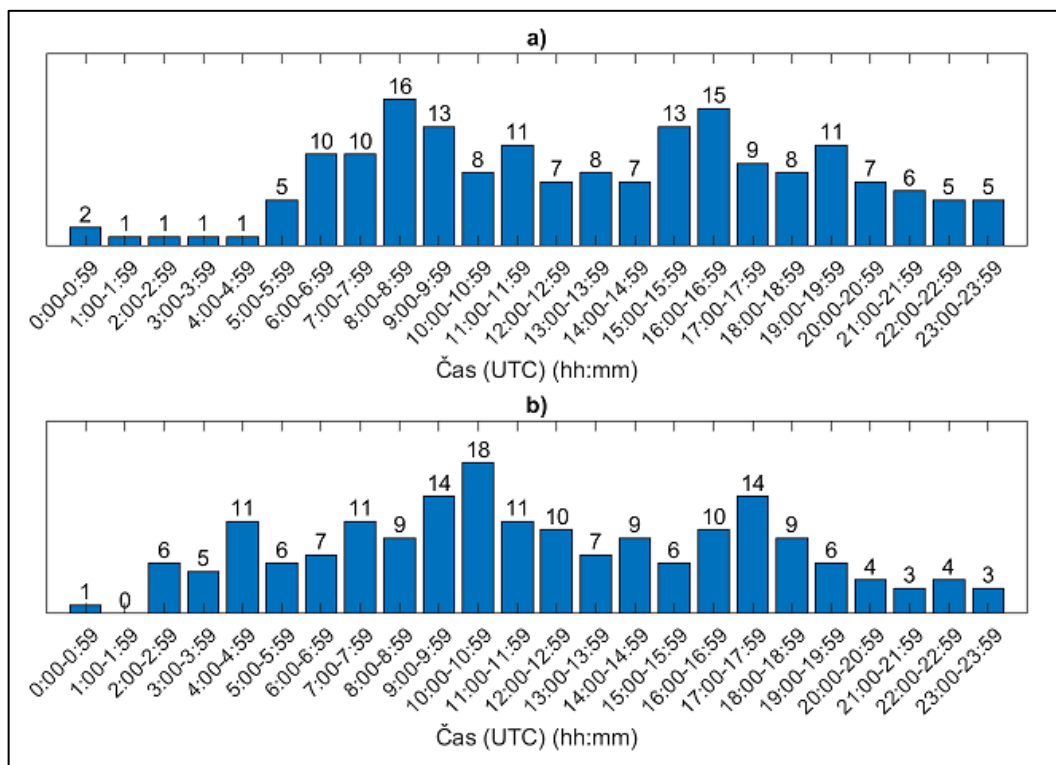


Obrázek 37: Využití letištních drah pohyby (přiletý a odlety zvlášť) za celé sledované období



Obrázek 38: Procentuální podíl využití jednotlivých drah odlety a přílety pro každý den sledovaného období

Poslední z vyhodnocených základních provozních statistik byl hodinový počet pohybů (respektive příletů a odletů) na letišti. Na obr. 39 je znázorněn průměrný počet příletů a odletů pro každou hodinu během dne (čas UTC) na základě dat za celé sledované období; uvedené hodnoty byly pro lepší prezentaci zaokrouhleny na jednotky.



Obrázek 39: Zaokrouhlený průměrný počet příletů (a) a odletů (b) pro každou hodinu během dne v rámci sledovaného období



3.2 Pokročilá úroveň analýzy

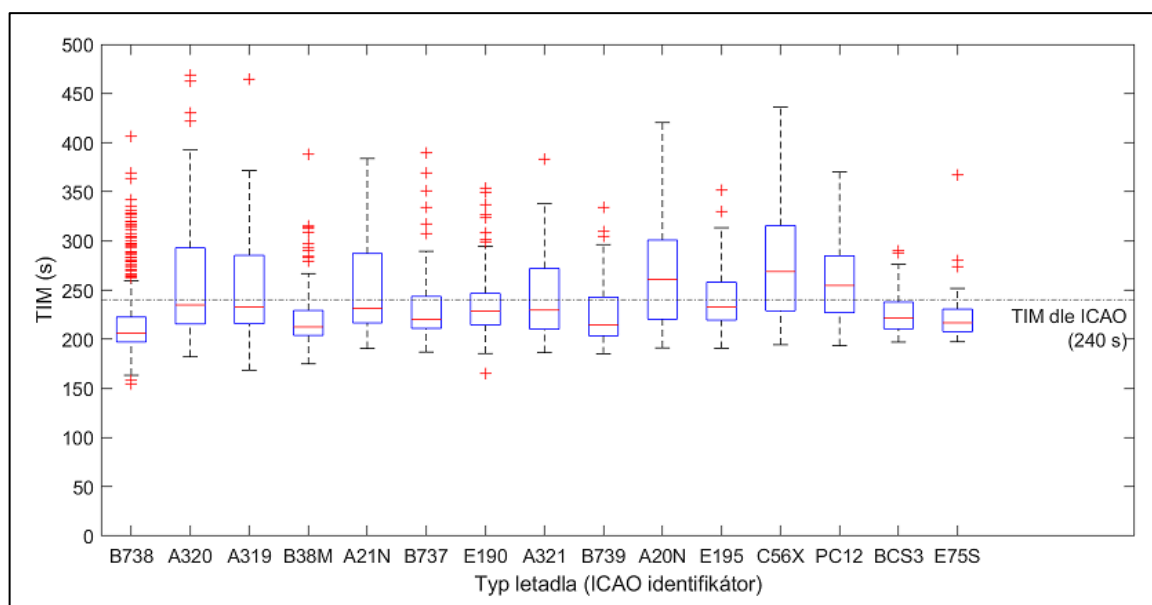
V této podkapitole budou prezentovány výsledky pokročilé úrovně analýzy vyhodnocovaných hodnot TIM. Podkapitola bude pro lepší přehlednost rozdělena podle jednotlivých provozních režimů. Z důvodu omezení rozsahu a zřejmých výhod spojených s využitím celého souboru dat oproti menším vzorkům po jednotlivých dnech zde budou představeny výsledky pouze souhrnně za celé sledované období.

3.2.1 Provozní režim „Přiblížení“

Tabulka 13 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Přiblížení“ pro nejčastější typy letadel za celé sledované období. Rozdělení těchto hodnot pro jednotlivé typy je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 40.

Tabulka 13: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro nejčastější typy letadel za celé sledované období – provozní režim „Přiblížení“

Typ letadla	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Podíl využitých hodnot (%)
B738	763	206,39	25,41	200	99,09
A320	425	234,90	77,41	220	98,38
A319	186	233,02	69,70	210	98,94
B38M	158	212,56	25,36	210	98,75
A21N	85	231,34	70,49	220	98,84
B737	75	220,12	32,47	220	100,00
E190	69	228,38	32,10	220	98,57
A321	66	229,59	61,70	210	98,51
B739	63	214,48	39,26	200	98,44
A20N	57	261,13	80,42	220	96,61
E195	48	232,81	38,44	230	100,00
C56X	42	268,80	86,65	220	100,00
PC12	34	254,67	58,04	250	97,14
BCS3	34	221,40	27,03	220	97,14
E75S	29	216,71	22,96	210	100,00

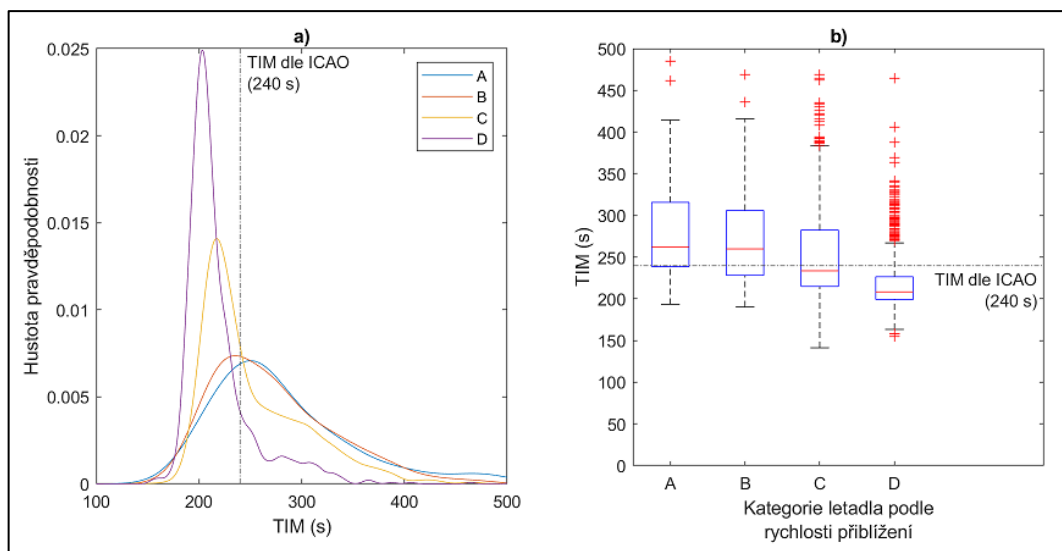


Obrázek 40: Boxploty hodnot TIM pro nejčastější typy letadel za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Přiblížení“

Tabulka 14 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Přiblížení“ pro jednotlivé kategorie letadel podle rychlosti přiblížení za celé sledované období. Na obr. 41 jsou následně vykresleny odhady hustoty pravděpodobnosti pro každou kategorii (kernel-ploty) spolu s příslušnými boxploty.

Tabulka 14: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel podle rychlosti přiblížení za celé sledované období – provozní režim „Přiblížení“

Kategorie letadla podle rychlosti přiblížení	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Kernel PDF maximum (s)	Podíl využitých hodnot (%)
A	48	261,92	77,08	250	250,15	96,00
B	118	259,83	77,78	230	235,20	95,93
C	1 311	233,61	67,48	220	217,21	98,35
D	1 010	208,33	27,29	200	203,25	98,92

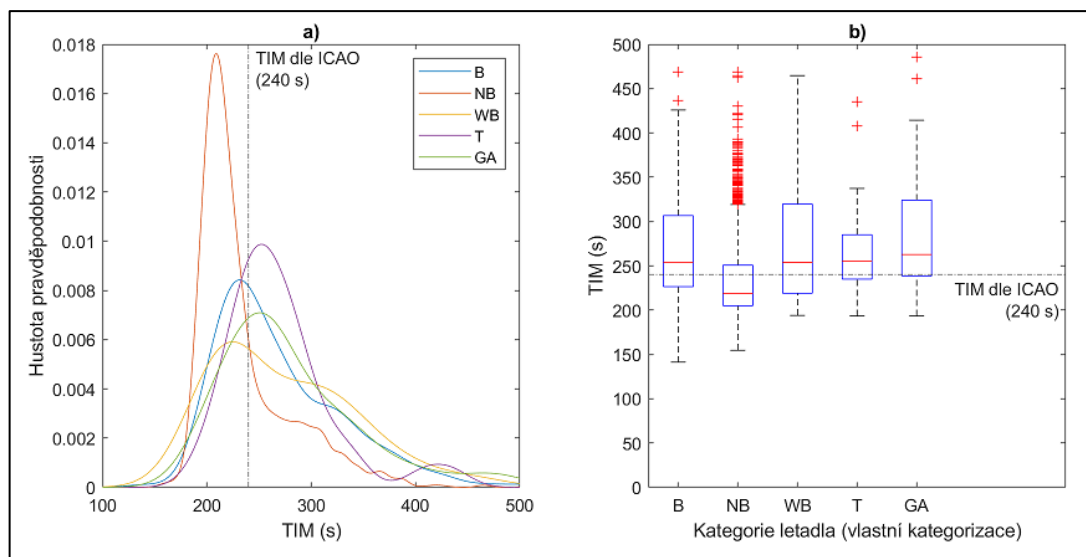


Obrázek 41: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel podle rychlosti přiblížení za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Přiblížení“

Tabulka 15 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Přiblížení“ pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období. Na obr. 42 jsou následně vykresleny odhady hustoty pravděpodobnosti pro každou kategorii (kernel-ploty) spolu s příslušnými boxploty.

Tabulka 15: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období – provozní režim „Přiblížení“

Kategorie (vlastní)	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Kernel PDF maximum (s)	Podíl využitých hodnot (%)
B	215	254,06	80,20	230	231,43	97,29
NB	2 133	218,78	45,70	210	208,88	98,70
WB	55	254,04	100,53	210	224,86	98,21
T	35	255,28	50,17	230	252,31	92,11
GA	49	262,76	85,62	250	250,65	96,08



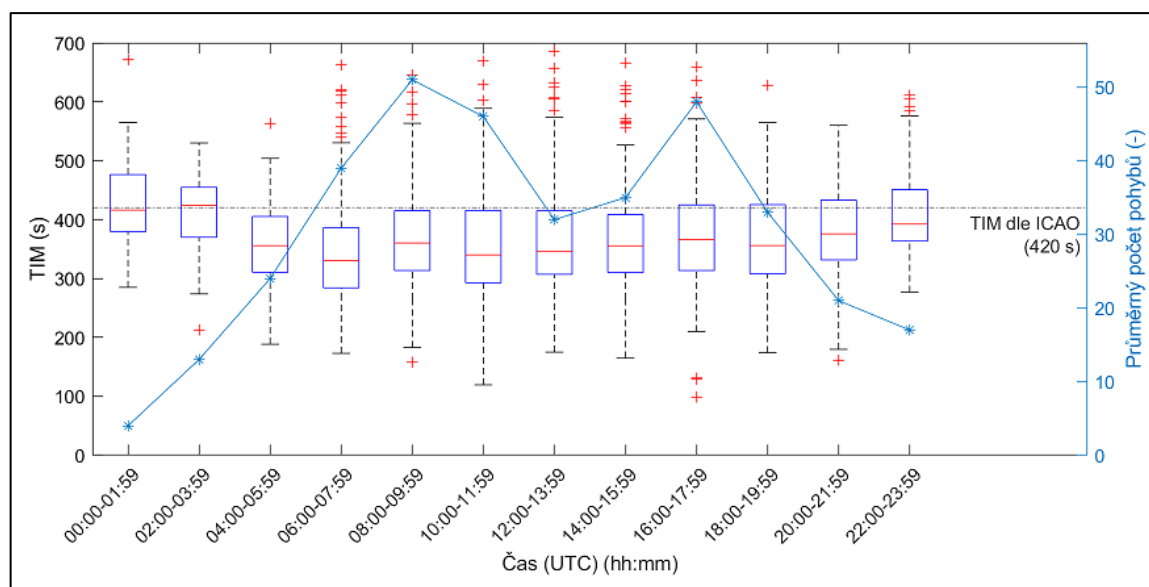
Obrázek 42: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Přiblížení“

3.2.2 Provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

Tabulka 16 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky za celé sledované období týkající se hodnot TIM v rámci dvouhodinových intervalů v průběhu dne pro provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“ a dráhu (RWY) 24. Rozdělení těchto hodnot včetně naznačené provozní situace na letišti (celkový počet pohybů) je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 43.

Tabulka 16: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

Čas (UTC)	Průměrný celkový počet pohybů	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
00:00-01:59	4	416,27	96,69	390
02:00-03:59	13	424,45	84,87	370
04:00-05:59	24	355,74	94,66	370
06:00-07:59	39	330,54	102,05	310
08:00-09:59	51	360,38	101,48	330
10:00-11:59	46	340,20	122,82	340
12:00-13:59	32	346,64	107,72	310
14:00-15:59	35	355,69	98,33	320
16:00-17:59	48	365,90	111,30	340
18:00-19:59	33	355,91	117,35	340
20:00-21:59	21	375,90	101,56	340
22:00-23:59	17	392,38	87,28	370

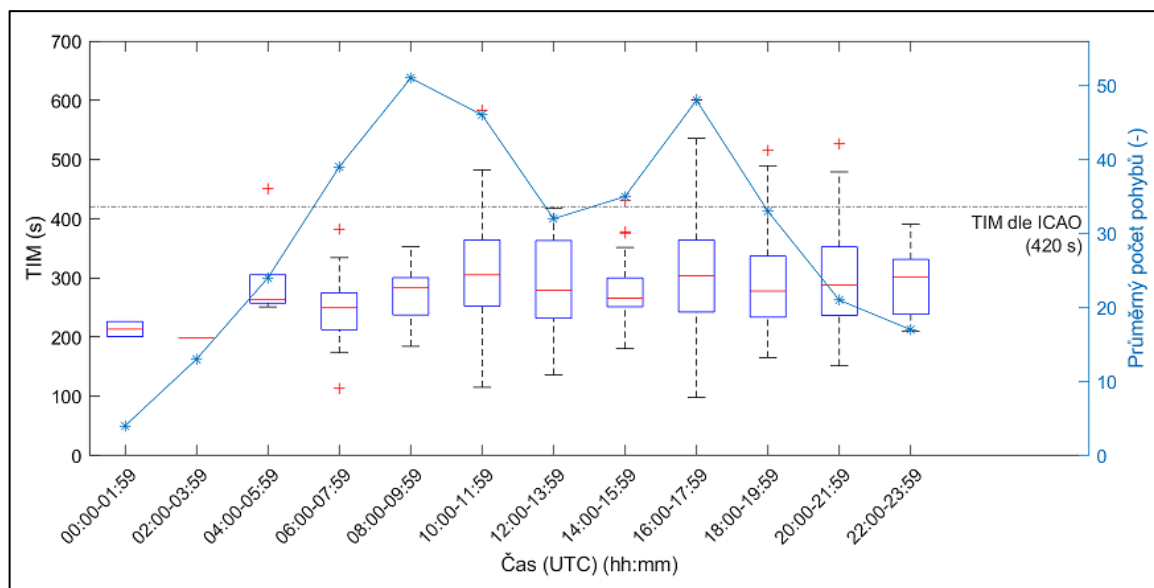


Obrázek 43: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

Tabulka 17 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky za celé sledované období týkající se hodnot TIM v rámci dvouhodinových intervalů v průběhu dne pro provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“ a dráhu (RWY) 06. Rozdělení těchto hodnot včetně naznačené provozní situace na letišti (celkový počet pohybů) je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 44.

Tabulka 17: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

Čas (UTC)	Průměrný celkový počet pohybů	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
00:00-01:59	4	213,50	25,67	200
02:00-03:59	13	198,39	0,00	200
04:00-05:59	24	263,96	47,88	260
06:00-07:59	39	249,41	62,36	250
08:00-09:59	51	284,07	62,97	300
10:00-11:59	46	305,15	111,66	270
12:00-13:59	32	279,19	131,27	280
14:00-15:59	35	265,43	48,76	260
16:00-17:59	48	303,91	121,40	330
18:00-19:59	33	277,91	103,15	240
20:00-21:59	21	287,66	115,59	220
22:00-23:59	17	300,89	92,98	330

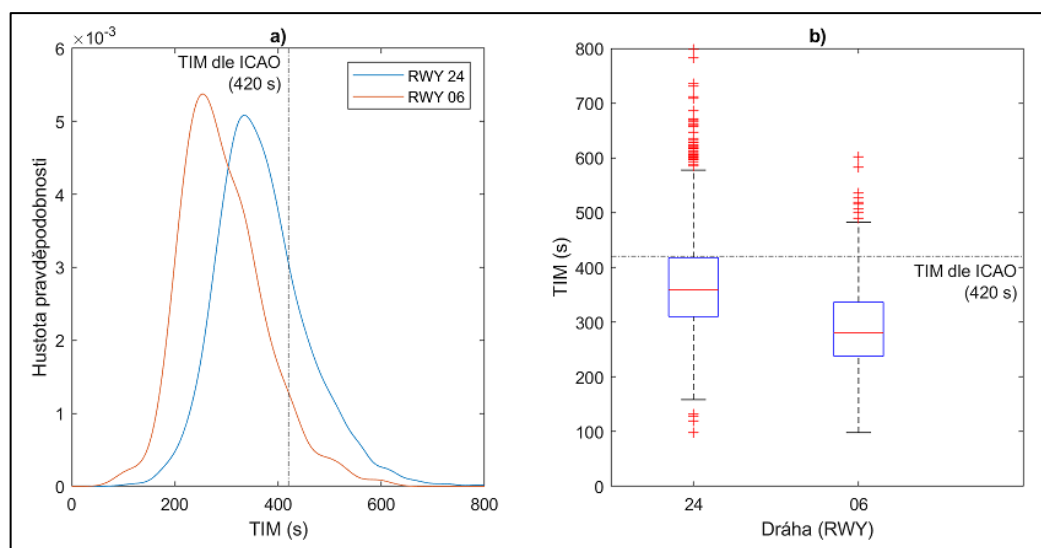


Obrázek 44: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

Tabulka 18 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-in)“ pro jednotlivé dráhy za celé sledované období. V rámci obr. 45 jsou následně vykresleny odhady hustoty pravděpodobnosti pro každou dráhu (kernel-ploty) spolu s příslušnými boxploty.

Tabulka 18: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé dráhy za celé sledované období – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

Dráha (RWY)	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Kernel PDF maximum (s)	Podíl využitých hodnot (%)
24	2 134	359,13	107,70	310	334,47	98,70
06	358	280,72	98,67	330	253,97	98,08



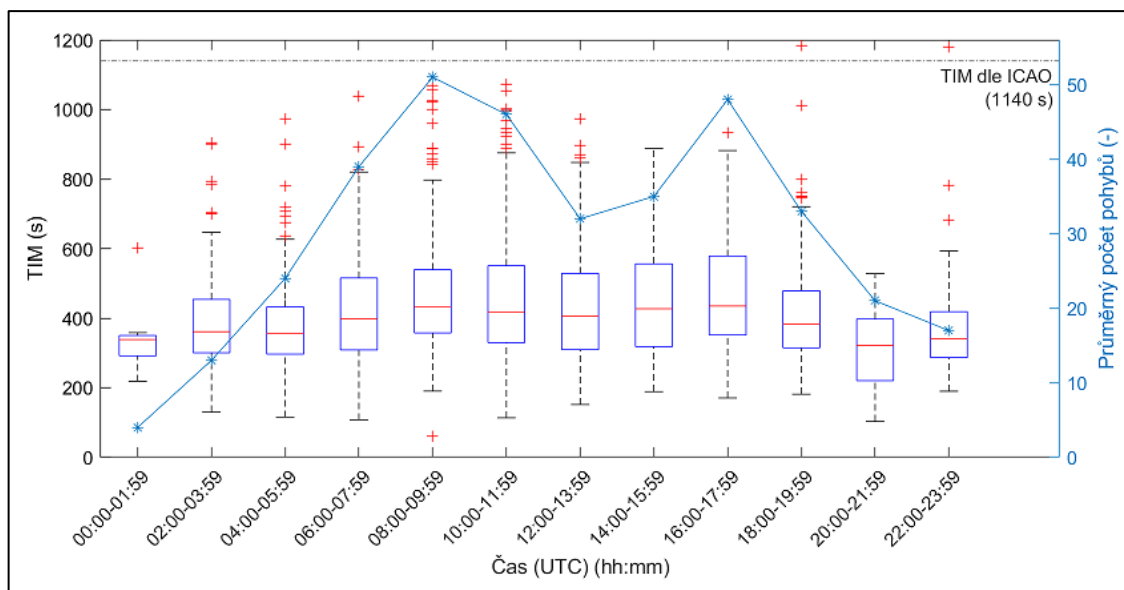
Obrázek 45: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé dráhy za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“

3.2.3 Provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

Tabulka 19 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky za celé sledované období týkající se hodnot TIM v rámci dvouhodinových intervalů v průběhu dne pro provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“ a dráhu (RWY) 24. Rozdělení těchto hodnot včetně naznačené provozní situace na letišti (celkový počet pohybů) je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 46.

Tabulka 19: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

Čas (UTC)	Průměrný celkový počet pohybů	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
00:00-01:59	4	338,32	58,30	340
02:00-03:59	13	361,01	153,49	260
04:00-05:59	24	356,88	135,80	360
06:00-07:59	39	398,12	207,03	350
08:00-09:59	51	433,33	181,71	370
10:00-11:59	46	418,10	220,74	340
12:00-13:59	32	405,59	219,37	310
14:00-15:59	35	426,98	238,03	460
16:00-17:59	48	434,89	227,52	360
18:00-19:59	33	383,40	164,07	290
20:00-21:59	21	322,23	177,03	320
22:00-23:59	17	340,15	132,06	310

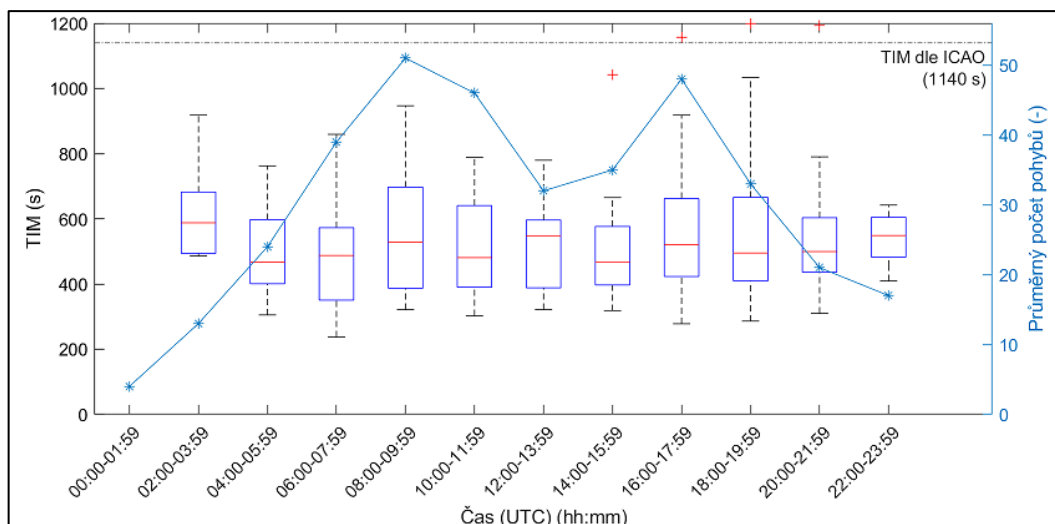


Obrázek 46: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

Tabulka 20 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky za celé sledované období týkající se hodnot TIM v rámci dvouhodinových intervalů v průběhu dne pro provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“ a dráhu (RWY) 06. Rozdělení těchto hodnot včetně naznačené provozní situace na letišti (celkový počet pohybů) je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 47.

Tabulka 20: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

Čas (UTC)	Průměrný celkový počet pohybů	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
00:00-01:59	4	NaN	NaN	NaN
02:00-03:59	13	587,68	188,25	490
04:00-05:59	24	467,41	197,21	400
06:00-07:59	39	487,44	222,36	350
08:00-09:59	51	527,78	310,47	380
10:00-11:59	46	480,78	250,88	500
12:00-13:59	32	548,18	208,05	540
14:00-15:59	35	467,72	179,69	400
16:00-17:59	48	521,21	239,12	460
18:00-19:59	33	495,08	256,44	330
20:00-21:59	21	499,36	167,17	490
22:00-23:59	17	548,70	122,48	550

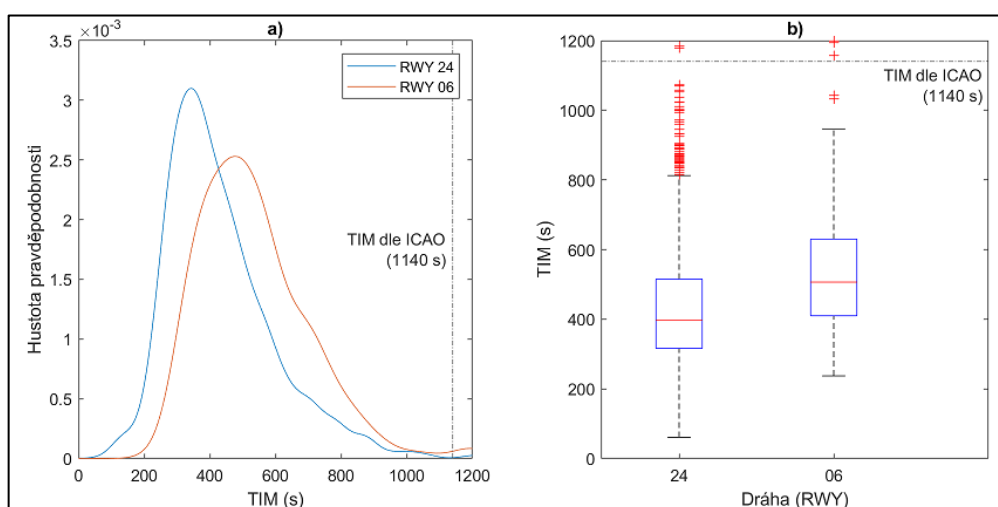


Obrázek 47: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

Tabulka 21 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ pro jednotlivé dráhy za celé sledované období. Na obr. 48 jsou následně vykresleny odhady hustoty pravděpodobnosti pro každou dráhu (kernel-ploty) spolu s příslušnými boxploty.

Tabulka 21: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé dráhy za celé sledované období – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

Dráha (RWY)	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Kernel maximum (s)	PDF
24	2 213	396,37	199,08	350	342,80	
06	339	506,48	220,36	400	476,85	



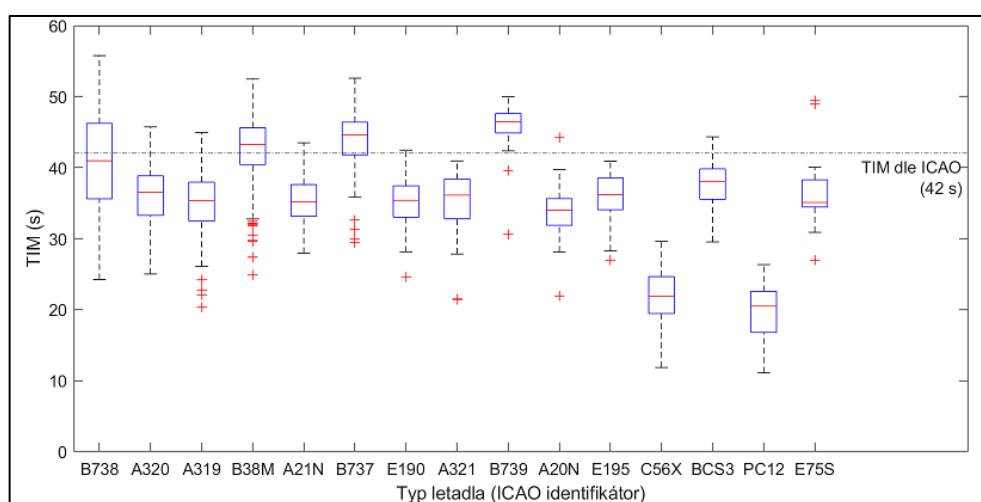
Obrázek 48: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé dráhy za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“

3.2.4 Provozní režim „Vzlet“

Tabulka 22 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Vzlet“ pro nejčastější typy letadel za celé sledované období. Rozdělení těchto hodnot pro jednotlivé typy je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 49.

Tabulka 22: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro nejčastější typy letadel za celé sledované období – provozní režim „Vzlet“

Typ letadla	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)
B738	790	40,96	10,62	36
A320	437	36,55	5,57	38
A319	189	35,35	5,48	35
B38M	163	43,25	5,18	44
A21N	86	35,18	4,47	34
B737	74	44,62	4,60	43
E190	70	35,39	4,42	34
A321	66	36,12	5,61	37
B739	65	46,47	2,73	47
A20N	57	34,02	3,74	35
E195	49	36,18	4,48	34
C56X	42	21,87	5,20	21
BCS3	35	38,00	4,29	36
PC12	31	20,48	5,79	22
E75S	30	35,09	3,84	35

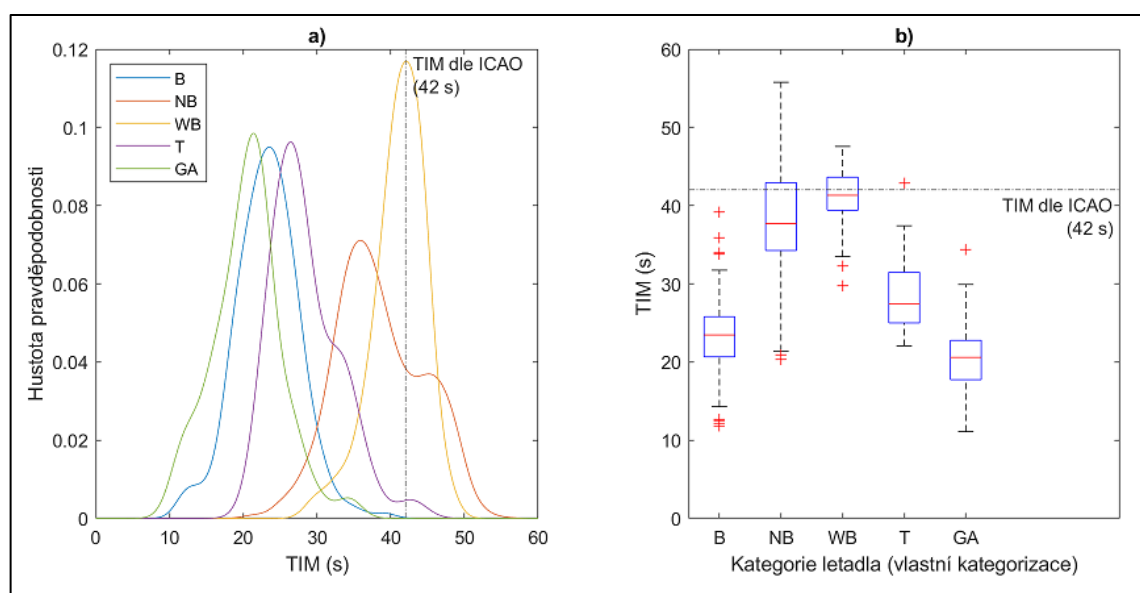


Obrázek 49: Boxploty hodnot TIM pro nejčastější typy letadel za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Vzlet“

Tabulka 23 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Vzlet“ pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období. Na obr. 50 jsou následně vykresleny odhady hustoty pravděpodobnosti pro každou kategorii (kernel-ploty) spolu s příslušnými boxploty.

Tabulka 23: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období – provozní režim „Vzlet“

Kategorie (vlastní)	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Kernel PDF maximum (s)
B	217	23,46	5,14	25	23,54
NB	2 189	37,68	8,67	36	35,89
WB	57	41,32	4,23	41	42,11
T	43	27,46	6,48	26	26,43
GA	46	20,59	5,03	20	21,39



Obrázek 50: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Vzlet“

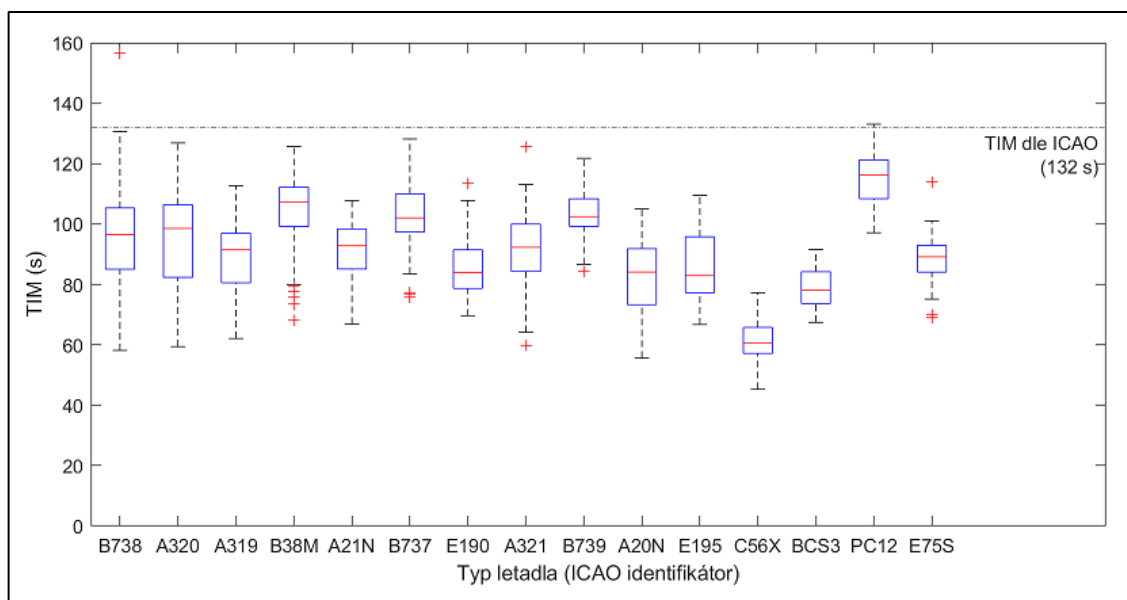
3.2.5 Provozní režim „Stoupání“

Tabulka 24 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Stoupání“ pro nejčastější typy letadel za celé sledované období. Rozdělení těchto hodnot pro jednotlivé typy je poté ukázáno pomocí boxplotů na obr. 51.



Tabulka 24: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro nejčastější typy letadel za celé sledované období – provozní režim „Stoupání“

Typ letadla	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Podíl využitých hodnot (%)
B738	790	96,55	20,28	99	100,00
A320	437	98,54	24,03	105	100,00
A319	189	91,42	16,37	95	100,00
B38M	163	107,38	13,04	106	100,00
A21N	86	92,77	13,30	93	100,00
B737	74	102,03	12,67	100	100,00
E190	70	84,01	12,75	81	100,00
A321	66	92,28	15,69	89	100,00
B739	65	102,46	9,13	102	100,00
A20N	57	84,11	18,55	76	100,00
E195	49	82,91	18,49	77	100,00
C56X	42	60,68	8,62	61	100,00
BCS3	35	78,11	10,52	72	100,00
PC12	29	116,32	12,87	126	93,55
E75S	30	89,12	8,86	92	100,00

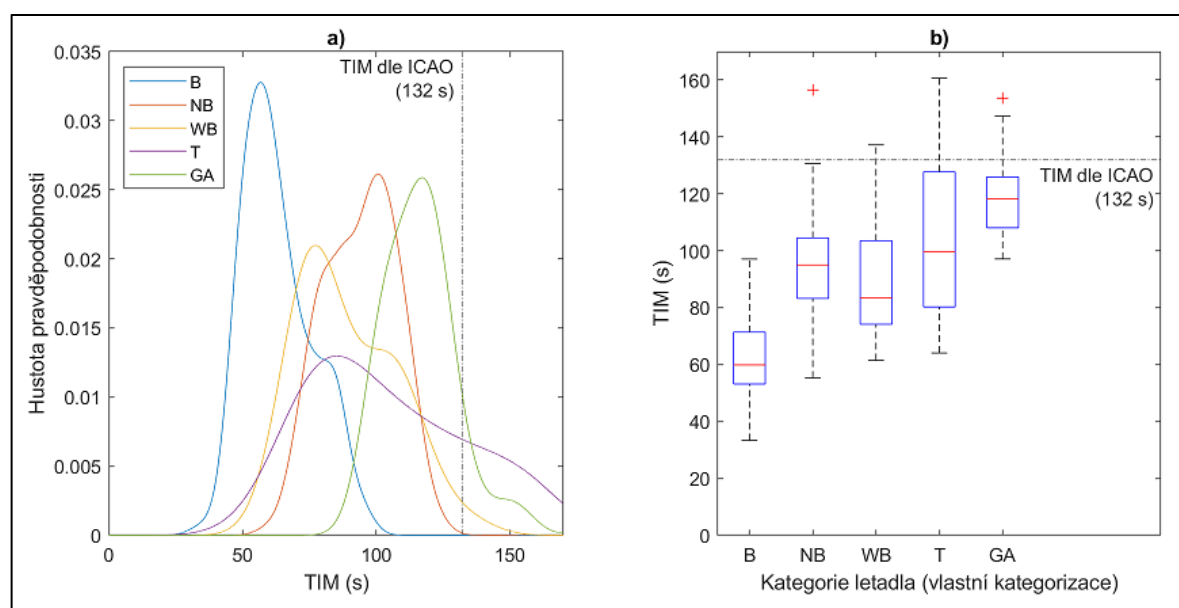


Obrázek 51: Boxploty hodnot TIM pro nejčastější typy letadel za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Stoupání“

Tabulka 25 obsahuje vyhodnocené statistické charakteristiky týkající se hodnot TIM provozního režimu „Stoupání“ pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období. Na obr. 52 jsou následně vykresleny odhady hustoty pravděpodobnosti pro každou kategorii (kernel-ploty) spolu s příslušnými boxploty.

Tabulka 25: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období – provozní režim „Stoupání“

Kategorie (vlastní)	Počet	Mediánová hodnota TIM (s)	IQR (s)	Modus zaokrouhlených hodnot (s)	Kernel PDF maximum (s)	Podíl využitých hodnot (%)
B	217	59,88	18,21	59	56,77	100,00
NB	2 189	95,02	21,29	99	100,70	100,00
WB	57	83,48	29,40	81	77,26	100,00
T	43	99,62	47,42	81	85,28	100,00
GA	44	118,19	17,89	121	117,14	95,65



Obrázek 52: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Stoupání“



4 Diskuze výsledků

Cílem této kapitoly je interpretace výsledků prezentovaných v předchozí kapitole, a to zejména v kontextu hlavních cílů této práce. Pozornost bude věnována také srovnání s výsledky předchozích prací zaměřených na podobnou problematiku, tedy zpřesnění časových hodnot TIM jednotlivých režimů LTO cyklu. Kromě výsledků bude rovněž diskutována zvolená metodika řešení, a to z hlediska vhodnosti jejího nastavení i případných limitací.

Hlavním cílem práce kromě obecného představení problematiky byl návrh vlastního postupu zpřesnění LTO cyklu pro účely zlepšení výpočtů emisí letištních pohybů, založeného na technologii ADS-B. Jak bylo zmíněno, v současné době je implementace této technologie v rámci Evropy z velké části dokončená; také v některých dalších regionech světa je v důsledku různých mandátů značně rozšířená. Z tohoto pohledu se tedy jedná o vhodnou technologii, přičemž v budoucnu lze očekávat, že její perspektivnost bude s dalším jejím rozšířením růst. V rámci této práce byl nejprve navržen postup dekodování a zpracování poskytnutých ADS-B zpráv, přičemž byl kladen důraz na kompatibilitu s datovým formátem ASTERIX, jenž je v současnosti používán k výměně nejrůznějších přehledových dat mezi systémy řízení letového provozu napříč státy. Tímto postupem byly seskupeny ADS-B zprávy po jednotlivých letištních pohybech, načež byl navržen postup analýzy zpráv týkajících se těchto pohybů, jenž měl v konečném důsledku vést ke zpřesnění hodnot TIM jednotlivých provozních režimů LTO cyklu původně definovaného ICAO. Slovní popis postupu byl podle vhodnosti doplněn ukázkami použitého kódu v prostředí MATLAB, aby byla navrhovaná metodika snadněji replikovatelná. Finálním krokem bylo ověření funkčnosti navrhované metodiky na základě využití skutečných ADS-B zpráv z provozu, které pocházely z dvoutýdenního období mezi 17. a 30. červnem 2023. Z tohoto ověření vzešly výsledky, jež byly prezentovány v předchozí kapitole a které zde budou nyní pro jednotlivé provozní režimy LTO cyklu postupně interpretovány a diskutovány.

V případě provozního režimu „Přiblížení“ byly výsledky základní úrovně analýzy následující. Jak vyplývá z tab. 7 a obr. 26, mediánové hodnoty TIM pro jednotlivé dny byly kromě jediného případu menší než standardní hodnota TIM podle definice ICAO (240 sekund). Rozmezí těchto hodnot bylo mezi 210,15 a 248,48 sekundami. Modus, jenž byl vyhodnocován kvůli šikmosti rozdělení hodnot TIM, byl obecně menší než mediánová hodnota, přičemž se pohyboval mezi 200 a 220 sekundami. Při posouzení celého souboru dat byla mediánová hodnota TIM pro tento režim 222,62 sekund a modus zaokrouhlených hodnot 210 sekund (viz tab. 12). Tyto hodnoty vycházely z 98,42 % všech přiletů (použity byly ty, které měly kompletní hodnotu TIM pro tento provozní režim), tudíž je lze považovat za vypovídající. Pakliže by tedy pro zpřesnění LTO cyklu byly využity tyto hodnoty, mohlo by být usouzeno, že původní definice LTO cyklu



nadhodnocuje emise v rámci přiblížení, což plyne i z histogramu na obr. 31. Tento závěr je však v rozporu s výsledky některých studií; například hodnota TIM uvedená ve studii od Dissanayaka et al. [33] činí zhruba 5,5 minut, Nowak et al. [34] na základě simulace zjistili hodnotu 5 minut. Další studie obecně uvádějí hodnoty od 4 minut výše (viz tab. 2).

Nicméně, je nutné dodat, že tento závěr o nadhodnocení emisí původním LTO cyklem není zcela jednoznačný. Kromě mediánu a modu bylo rovněž vyhodnoceno IQR, jež představuje charakteristiku variability. Pro celé sledované období vyšla hodnota IQR necelých 55 sekund, přičemž při rozdílu mezi standardní hodnotou TIM a určenou mediánovou hodnotou pouhých 18 sekund (necelých 8 % standardní hodnoty) tedy odchylka od LTO cyklu není natolik významná. Navíc, pohledem na boxploty na obr. 26 je vidět, že pro některé dny (například 23., 27. a 28. června) byla odchylka od standardní hodnoty TIM mnohem menší než v jiných dnech (např. 20. června). Je zřejmé, že toto bylo ovlivněno proměnlivostí skladby provozu, která, jak ukazují výsledky pokročilé analýzy pro tento provozní režim, měla na hodnotu TIM vliv. Tento výsledek nepochybně ovlivnila také zvolená metodika určení hodnoty TIM pro tento provozní režim, jenž začíná podklesáním směšovací výšky a končí snížením nastavení tahu motorů na volnoběh bezprostředně před dosednutím letadla na dráhu. Zatímco jeho konec lze určit poměrně spolehlivě (např. podle výšky letadla nad zemí a jeho vertikální rychlosti, jak bylo provedeno v této práci), s chybou zpravidla do několika sekund, nalezení jeho začátku závisí na definici směšovací výšky. V této práci byla využita definice ICAO, tedy 3 000 ft nad úrovní letiště, zatímco v některých ze zmíněných studií byla použita jiná hodnota, tudíž jejich výsledky nelze porovnávat přímo. Pro některé pohyby byly zaznamenány nezvykle vysoké hodnoty TIM, což, jak bylo ověřeno, zpravidla souviselo s vykonáním postupu nezdařeného přiblížení. Toto se však týkalo pouze malého procenta příletů, tudíž vyhodnocované statistiky nebyly ovlivněny.

Sledování souhrnných statistik za jednotlivé dny, potažmo vícedenní období, na jednu stranu poskytuje přímočaré výsledky, ovšem za cenu značného zjednodušení a zanedbání některých faktorů. Je zřejmé, že s ohledem na rozmanitost výkonnostních i jiných charakteristik sledovaných letadel byla data do jisté míry multimodální. Z toho důvodu byla definována pokročilá úroveň analýzy hodnot TIM, která zaznamenané pohyby rozdělila podle různých kritérií a kategorií, jež byly sledovány zvlášť. Jak vyplývá z tab. 13 a obr. 40, standardní hodnota TIM podle ICAO některým typům letadel odpovídá lépe než jiným. Pro jednoduché srovnání lze například uvést mediánovou hodnotu 234,90 sekund pro Airbus A320, respektive 206,39 sekund pro Boeing 737-800; právě tyto dva typy se v datech vyskytovaly nejčastěji. V souladu s očekáváním se jako vhodné dále ukázalo rozdělení pohybů podle kategorie letadel podle rychlosti přiblížení, kde například rozdíl mezi mediány pro kategorie A a D činil



téměř minutu (208,3 sekund oproti 261,9 sekundám; viz tab. 14 a obr. 41). V případě kategorie C, která byla v rámci pohybů nejvíce zastoupená, byla odchylka mediánové hodnoty od standardní hodnoty TIM pouze necelých 7 sekund. V případě rozdělení podle vlastní kategorizace byl nejpatrnější rozdíl mezi úzkotrupými letadly, pro které byla mediánová hodnota TIM menší než standardní hodnota, a ostatními kategoriemi, kde byla standardní hodnota TIM naopak mírně podhodnocená (viz tab. 15 a obr. 42). Jelikož právě tato kategorie letadel představovala více než čtyři pětiny všech zaznamenaných příletů, lze pomocí ní do velké míry vysvětlit výsledky souhrnných statistik. U letišť s větším zastoupením širokotrupých letadel by tedy bylo možné očekávat odlišné výsledky těchto statistik.

V případě provozních režimů „Pojíždění (taxi-in)“ a „Pojíždění (taxi-out)“ se standardní hodnoty TIM ukázaly jako značně nadhodnocené, a to především u druhého jmenovaného režimu. Jak vyplývá z tab. 8 a 12, v případě provozního režimu „Pojíždění (taxi-in)“ se mediánové hodnoty pro jednotlivé dny pohybovaly v rozmezí mezi 299,90 a 369,50 sekundami; za celé období byl medián roven 348,10 sekundám (necelých 83 % standardní hodnoty). Stejně tak se hodnoty modu pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období pohybovaly mezi 270 a 360 sekundami; za celé období byl modus roven 330 sekundám (necelých 79 % standardní hodnoty). O tom, že je standardní hodnota TIM podle ICAO mírně nadhodnocená, svědčí i pohled na jednotlivé boxploty na obr. 27; stejně tak je vidět, že rozdělení hodnot patrně z histogramu na obr. 32 je vůči ní posunutě o zhruba 100 sekund. Jak již bylo zmíněno, doba pojíždění je ovlivněna mnohem větším množstvím faktorů než ostatní provozní režimy; lze zde tedy očekávat značnou neurčitost, kterou potvrzují i hodnoty IQR, které se zpravidla pohybovaly kolem 100 sekund. Tato variabilita je patrná i ze zmiňovaného histogramu, jenž se jeví jako značně „roztáhlý“ (např. oproti histogramu pro provozní režim „Přiblížení“ na obr. 31). Pokročilá úroveň analýzy rozdělila pohyby podle použité dráhy, což se ukázalo jako vhodné kritérium. Sledován byl např. vývoj hodnot TIM pro jednotlivé dráhy během dne spolu s intenzitou provozu na letišti, jež byla reprezentovaná průměrným počtem pohybů za jednotlivé dvouhodinové intervaly. Větší variabilita hodnot byla zaznamenána pro dráhu 06, avšak zde bylo k dispozici výrazně méně dat, než pro dráhu 24 (viz tab. 16 a 17 a obr. 43 a 44). Z obr. 45 je patrný rozdíl mezi těmito drahami, kdy podle tab. 18 byl rozdíl mezi mediány pro obě dráhy zhruba 80 sekund; velice podobné bylo i vzájemné posunutí obou odhadnutých hustot pravděpodobností. Dle očekávání byla doba pojíždění po přistání kratší v případě dráhy 06, což lze vysvětlit umístěním odbavovací plochy Sever na letišti LKPR, kam po přistání směřuje většina pohybů.

Jak již bylo zmíněno, v případě provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ byl rozdíl mezi zaznamenanými hodnotami TIM a standardní hodnotou TIM podle ICAO mnohem výraznější; vůbec největší ze všech provozních režimů LTO cyklu. Rozpětí mediánových hodnot pro



jednotlivé dny se pohybovalo mezi 371,96 a 479,97 sekundami; rozpětí mezi mody bylo ještě větší, a to mezi 260 a 460 sekundami (viz tab. 9). Všimnout si zde lze také značné variability v datech, která se projevila hodnotami IQR, které byly až dvojnásobné oproti provoznímu režimu „Pojíždění (taxi-in)“. Jak uvádí tab. 12, mediánová hodnota TIM za celé sledované období byla 411,11 sekund, tedy pouhých 36 % standardní hodnoty TIM, s hodnotou IQR 206,60 sekund. Pohledem na histogram obsahující všechny hodnoty TIM za celé sledované období (obr. 33) si lze povšimnout, že oproti provoznímu režimu „Pojíždění (taxi-in)“ zde bylo rozdělení hodnot o něco šikmější. I zde byl v rámci pokročilé úrovně analýzy sledován vývoj hodnot TIM během dne. Především v případě dráhy 24 (obr. 46) byla patrná proměnlivost hodnot, která do určité omezené míry kopírovala průběh intenzity provozu na letišti. Ačkoli podrobnější kvantifikace vztahu těchto dvou veličin byla mimo rámec této práce; v rámci budoucího výzkumu by bylo vhodné se na ni zaměřit. I pro tento provozní režim byl zaznamenán rozdíl v souhrnných statistikách pro obě dráhy; podle tab. 21 se mediánové hodnoty TIM lišily o zhruba 110 sekund. Jak vyplývá z obr. 48, hodnoty TIM byly tentokrát obecně menší v případě dráhy 24, což odpovídá teoretickému očekávání, kdy umístění zmiňované odbavovací plochy Sever je výrazně blíže prahu této dráhy (odkud typicky letadla zahajují vzlet), než je tomu u dráhy 06.

V případě těchto dvou provozních režimů nelze porovnávat výsledky této práce s výsledky dostupnými v literatuře, pakliže se nejedná o studie ze stejného letiště (LKPR). Důvodem je, že hodnota TIM je v tomto případě ovlivněna faktory spojenými s letištem, nikoli letadly. Pro srovnání lze využít například obecné statistiky týkající se LKPR za letní sezónu 2023, zveřejněné organizací EUROCONTROL [113]. Podle nich činila mediánová doba pojíždění po přistání 5,0 minut (zde 5,8 minut), přičemž pro pojíždění před vzletem byla 10,0 minut (zde 6,9 minut). Zmínit lze rovněž dvě závěrečné práce [35] [36] řešící prostředí LKPR, podle nichž výsledné hodnoty TIM režimu „Pojíždění (taxi-in)“ činily 5,9, respektive 6,1 minut, což je velmi podobné výsledkům v této práci. Pro režim „Pojíždění (taxi-out)“ se jednalo o 10,2, respektive 10,1 minut; rozdíl oproti této práci zde byl větší. V rámci přehledu studií v tab. 2 si lze všimnout značné variability zaznamenané celkové doby pojíždění. Tyto studie se zaměřovaly na velká letiště (např. Šanghaj) i menší letiště (např. Poznaň), i proto přímé srovnání mezi jednotlivými studii nemá pro tyto provozní režimy smysl. Jak bylo ukázáno, dobu pojíždění ovlivňuje například dráha použitá daným pohybem, což lze vysvětlit rozdílnou vzdáleností, kterou musí letadlo překonat během pojíždění. Případné další faktory zde však nebyly zohledněny, což lze považovat za určitou limitaci této práce, na niž by bylo vhodné se zaměřit v navazujícím výzkumu. Další limitace spojená s určením hodnoty TIM pro tyto provozní režimy spočívala v přesném určení času spuštění motorů, respektive jejich vypnutí po příjezdu na stání. Tato limitace byla způsobena absencí určitých podstatných informací, které mnohdy ani nejsou



součástí ADS-B vysílání, např. o okamžité spotřebě paliva či nastavení tahu motorů – tyto údaje by však bylo možné získat např. z palubních FDR či QAR. Postup, jenž byl popsán v rámci kapitoly 2, byl založený pouze na určitých empirických předpokladech, které byly zformulovány mj. na základě pozorování určitého vzorku dat. Chyba přesného určení tohoto okamžiku se pravděpodobně u většiny pohybů pohybovala řádově kolem jednotek procent celkové doby poježdění, což však lze na této úrovni považovat za dostačující.

Výsledky týkající se provozního režimu „Vzlet“ v případě základní úrovně analýzy byly následující. Vypočítané mediánové hodnoty TIM pro jednotlivé dny v rámci sledovaného období se dle tab. 10 pohybovaly v rozmezí 34,63 až 38,25 sekund; souhrnný medián podle tab. 12 byl 36,86 sekund, což představuje necelých 88 % standardní hodnoty TIM pro tento režim (42 sekund). Podobně hodnoty modu se pohybovaly mezi 31 a 39 sekundami, respektive 34 sekund za celé období. Jak je vidět na boxplotech na obr. 29, variabilita hodnot nebyla natolik značná, jako v případě předchozích provozních režimů, přičemž pro jednotlivé dny se příliš neměnila; hodnota IQR se pohybovala zhruba mezi 9 a 10 sekundami, za celé období byla 9,45 sekund. Na základě této skutečnosti lze usoudit, že faktory ovlivňující hodnotu TIM se u tohoto provozního režimu mění spíše dlouhodobě. Z doposud uvedených výsledků vyplývá, že standardní hodnota TIM pro tento provozní režim je spíše nadhodnocená. Ostatní studie se však s touto hodnotou víceméně shodují; nejnižší hodnotu udává studie od Weijun et al. [27], jež uvádí hodnotu 0,64 minut (38,4 sekund), což je stále o téměř dvě sekundy více, než jaký byl souhrnný medián v této práci. Stejně jako v případě provozního režimu „Přiblížení“ je však i zde na místě uvážení, o jak významný rozdíl se jedná, mj. s ohledem na skutečnost, že odchylka zde je pouze několik sekund. Pohledem na histogram na obr. 34 je navíc vidět, že data jsou do jisté míry multimodální – vedle „hlavního“ modu kolem 35 sekund lze rovněž uvažovat přítomnost druhého, nevýrazného modu kolem 45 sekund. I zde se tedy ukazuje, že detailnější analýza těchto dat, jejíž výsledky budou nyní popsány, byla žádoucí.

Jak je patrné z tab. 22 a obr. 49, hodnoty TIM pro tento provozní režim se mezi některými typy letadel značně lišily, přičemž někde se takřka shodovaly s hodnotou standardní. Jako příklad lze uvést varianty letounu Boeing 737, které se standardní hodnotě podle ICAO blížily vůbec nejvíce; v některých případech (např. varianta MAX 8 či -700) byla tato hodnota dokonce překročena. Naopak u typu Cessna 560X (C56X) a Pilatus PC-12 (PC12) byla výsledná hodnota TIM poloviční oproti standardní hodnotě; v rámci nejčastějších typů letadel byly právě tyto dva typy jediné, které nepředstavovaly úzkotrupá dopravní letadla. Za povšimnutí stojí také hodnoty IQR, které byly v případě rozdělení pohybů na jednotlivé typy obecně o polovinu menší (až na jednu výjimku) než v případě souhrnných statistik popisovaných v předchozím odstavci. To může naznačovat vhodnost uplatnění tohoto kritéria v rámci analýzy hodnot.



V rámci tohoto provozního režimu bylo dále uplatněno rozdělení pohybů podle vlastní kategorizace, které se v tomto případě ukázalo jako poměrně výhodné. Jak vyplývá z tab. 23 a obr. 50, hodnoty TIM pro širokotrupá letadla (kategorie WB) se do značné míry shodovaly se standardní hodnotou podle ICAO, a to z hlediska mediánu, modu i vrcholu odhaduté hustoty pravděpodobnosti (kernel PDF). Standardní hodnotě se poté ještě blížila kategorie úzkotrupých letadel, která svými charakteristikami do velké míry odpovídala souhrnným statistikám – toto bylo pravděpodobně dáno tím, že podíl těchto letadel v rámci souboru dat byl většinový. Nižší hodnoty TIM vyšly pro turbovtulová letadla a vůbec nejnižší pro kategorie soukromých letadel a letadel všeobecného letectví, do nichž patřily oba výše zmíněné typy (C56X a PC12). V případě odhadovaných hustot pravděpodobnosti pro jednotlivé kategorie na obr. 50 si lze především u kategorie úzkotrupých letadel (NB) všimnout jisté přetrvávající multimodality, nicméně její objasnění již bylo nad rámec této práce.

Pro určení hodnoty TIM provozního režimu „Vzlet“ bylo zapotřebí nalézt oba časové mezníky, které režim vymezují, a to čas zahájení vzletu, respektive rozjezdu (čas t_{BOTR}), a čas rotace letadla (čas t_{ROT}). V případě prvního jmenovaného mezníku bylo využito principu odhadu okamžiku nastavení tahu motorů na vzlet prostřednictvím informace o zrychlení letadla, což lze v kombinaci s požadavkem na rychlost menší než 50 uzlů považovat za poměrně robustní kritérium. Z hlediska definice konce tohoto provozního režimu, která vychází z původní definice LTO cyklu podle ICAO, byl odhadnut čas rotace letadla na základě kombinace informací o barometrické vertikální rychlosti letadla a jeho geometrické výšce, což lze považovat za vyhovující. Předpokladem kromě jiného totiž bylo, že současné využití více parametrů zvýší robustnost metodiky. Volba metodiky pro tuto práci tedy sice splňovala původní definici podle ICAO, je však otázkou, do jaké míry tato původní definice reflektuje skutečný stav, kdy ke snížení tahu mnohdy nedochází ihned po vzletu, ale až po dosažení určité výšky nad zemí – této problematice se věnuje například článek od Patterson et al. [30]. Je zřejmé, že změna rozhraní provozních režimů „Vzlet“ a „Stoupání“ daného snížením tahu by měla vliv na vypočítanou celkovou spotřebu paliva, potažmo množství emisí sledovaných látek. V takovémto případě by bylo nutné rozhraní identifikovat nepřímo na základě kinematických parametrů letadla, což však je vysoko nad možností této práce. Toto zvýšení přesnosti však v budoucnu může být žádoucí s ohledem na stále větší vnímání významu emisí jiných látek než CO_2 ; v případě tohoto provozního režimu především emisí NO_x .

Posledním ze sledovaných provozních režimů byl režim „Stoupání“. Vyhodnocené mediánové hodnoty TIM pro jednotlivé dny v rámci základní úrovně analýzy se nacházely v rozmezí mezi 89,19 a 96,64 sekundami, přičemž hodnoty IQR indikující variabilitu hodnot TIM se pohybovaly mezi 20,57 a 27,24 sekundami (viz tab. 11). Významnější rozpětí bylo v případě modů



zaokrouhlených hodnot, kdy minimální a maximální hodnota byla 73, respektive 108 sekund. Jak udává tab. 12, souhrnný medián byl 93,37 sekund (tj. necelých 71 % standardní hodnoty TIM podle ICAO) s hodnotou IQR 23,93, přičemž modus byl 99 sekund. Podíl využitých hodnot v rámci jednotlivých dní byl velmi vysoký; nejnižší hodnota byla 99,46 %, přičemž souhrnně bylo využito 99,92 % hodnot; výsledky lze tedy považovat za reprezentativní. I z grafického znázornění těchto výsledků pomocí boxplotů na obr. 30 vyplývá, že standardní hodnota TIM pro tento provozní režim je nadhodnocená, což dokládá také histogram na obr. 35. Tento závěr podporují také některé ze zkoumaných studií, jež někdy došly k ještě nižším hodnotám. Například hodnota TIM podle Głowacki et al. [31] byla 76,2 sekund; podle studie od Turgut et al. [29] pouhých 70,8 sekund a podle Jungmanna [35] dokonce pouze 60,6 sekund. Nejvyšší zaznamenaná hodnota byla 128,4 sekund podle Dissanayaka et al. [33], což je stále o necelé čtyři sekundy méně, než jaká je standardní hodnota TIM podle ICAO. Je zřejmé, že hodnota TIM bude stejně jako v případě provozního režimu „Přiblížení“ závislá na použité směšovací výšce, což je tedy při porovnávání studií nutné zohlednit. Výsledné nižší hodnoty TIM oproti té standardní (i při zachování směšovací výšky 3 000 ft) pravděpodobně souvisejí se skutečností, že současná letadla jsou mnohem výkonnější než v době, ze které tato standardní hodnota pochází. Z toho důvodu by bylo žádoucí aktualizovat tuto hodnotu tak, aby více odpovídala současnému provozu.

V rámci pokročilé úrovně analýzy byly stejně jako u předchozích provozních režimů sledovány hodnoty TIM pro jednotlivé typy letadel, přičemž byl kladen důraz na typy s nejvyšší četností výskytu v rámci sledovaného období. Jak vyplývá z tab. 24 a obr. 51, mediánová hodnota TIM se pohybovala v rozmezí mezi 60,68 a 116,32 sekundami. Vyšší hodnoty byly zaznamenány u typu Boeing 737 MAX 8, 737-700 a 737-900. Vůbec nejvyšší medián patřil typu PC-12, jenž patří do kategorie všeobecného letectví; naopak vůbec nejnižší medián odpovídal typu Cessna 560X (C56X), což je soukromé letadlo. Hodnoty modů pro tyto typy byly 126, respektive 61 sekund, přičemž se jednalo o maximální a minimální hodnotu této charakteristiky. I s ohledem na tyto výsledky se tedy následné rozdělení pohybů podle vlastní kategorizace ukázalo jako praktické. Jak vyplývá z tab. 25 a boxplotů na obr. 52, vůbec největší rozdíl byl právě mezi kategoriemi B (soukromá letadla) a GA (všeobecné letectví), kde rozdíl mediánů činil 58,31 sekund. Značná variabilita hodnot byla zaznamenána v případě kategorie turbovrtulových letadel (T), což je patrné i z odhadnuté hustoty pravděpodobnosti na obr. 52 nebo příslušné hodnoty IQR v tab. 25, která byla významně větší než u ostatních kategorií. V případě kategorií B, WB a NB je z odhadnutých hustot pravděpodobností patrná určitá multimodalita; řešením pro tento provozní režim by tedy v rámci budoucího výzkumu mohla být například podrobnější kategorizace letadel.



Zvolená metodika určení hodnoty TIM tohoto provozního režimu u jednotlivých odletů byla založená na sledování vysílané geometrické výšky letadlem. Jelikož bylo sledováno dosažení směšovací výšky, přičemž tato vycházela z výšky letiště, lze využití pouze tohoto kritéria považovat za dostačující pro určení konce tohoto provozního režimu. Začátek tohoto režimu navazoval na konec režimu „Vzlet“, jenž již byl diskutován výše. Hodnota směšovací výšky byla stanovena pro každý let zvlášť, přičemž vycházela z minimální vysílané geometrické výšky. Vzhledem k tomu, že letadla začínala svoji geometrickou výšku vysílat již během vzletu, kdy byla stále na zemi, lze předpokládat, že výsledné hodnoty TIM by se v případě, kdy by byla směšovací výška daná jedinou společnou geometrickou výškou a nikoli individuálně pro každý odlet, od těch stávajících významně nelišily. Pro tento provozní režim platí to stejné, jako pro režim „Přiblížení“, a sice že ke zvýšení validity výsledků by mohlo vést zohlednění skutečné směšovací výšky namísto standardní hodnoty 3 000 ft, kterou použilo ICAO jakožto průměrnou hodnotu. Letiště by pro tyto účely mohla buďto využívat průběžně aktualizovaná data, případně by mohla své výpočty založit na dlouhodobých statistikách (např. průměrná směšovací výška za daný měsíc). V každém případě by toto obnášelo nutnost pořízení dodatečného vybavení pro vlastní měření, případně pravidelnou spolupráci s místní meteorologickou agenturou či jiným subjektem provádějícím příslušná měření.

Kromě jednotlivých provozních režimů byly rovněž vyhodnoceny některé doplňující letištní provozní statistiky. Například obr. 36 obsahuje počet zaznamenaných odletů a příletů pro každý den sledovaného období. Výhodou této statistiky může být například umožnění zaměřit se na dny s větším počtem pohybů; kromě toho může samozřejmě posloužit také obecné provozní analytice. V rámci těchto statistik byla značná pozornost věnována sledování využití jednotlivých drah na letišti. Zatímco na obr. 37 byl prezentován souhrnný stav za celé sledované období, na obr. 38 bylo prezentováno využití drah v jednotlivých dnech. Toto je výhodné zejména za situace, kdy je cílem analýzy některá konkrétní dráha. Jak z obrázku vyplývá, například v případě zaměření se na dráhu 06 se jako nejvhodnější nabízí využití dat z 22. června 2023. Údaj o použité dráze byl relevantní v případě sledování hodnot TIM pro oba režimy týkající se pojiždění; pakliže by tedy cílem zkoumání byly emise vzniklé při pojiždění letadel, je výhoda těchto statistik zřejmá. V rámci provozních statistik byla dále vyhodnocena intenzita provozu po hodinách v průběhu dne. Jak již bylo popsáno výše, tuto statistiku lze využít při sledování doby pojiždění, nicméně se nabízí i řada jiných účelů nesouvisejících s výpočty emisí, jako je například dimenzování kapacit letištních procesorů.

Jak již bylo několikrát zmíněno, v rámci této práce bylo pracováno s ADS-B daty za 14 dní provozu. Součástí postupu zpracování těchto dat po jejich dekódování byla filtrace podle různých kritérií; například byly odstraněny ADS-B zprávy týkající se traťového provozu či



letadel, která se nacházela či letěla na jiné letiště než LKPR. Následné seskupení zbývajících zpráv po jednotlivých pohybech bylo realizováno prostřednictvím shlukové analýzy, kdy byla zároveň vyhodnocena kvalita tohoto přiřazení, přičemž nekvalitní výsledky odpovídající definovanému Scénáři F byly odstraněny. Účelem definovaných scénářů bylo zohlednit různé situace (např. nákladní linky vysílající stejný volací znak na příletu i následném odletu), a tedy co nejvíce zvýšit podíl pohybů zahrnutých do následné analýzy. Dále byly zkontrolovány jednotlivé pohyby z hlediska toho, zda jsou vyhovující pro další analýzu – tedy zda skutečně představují jeden odlet či přílet, což bylo realizováno prostřednictvím několika různých kontrolních kritérií či testů. Zároveň bylo dbáno na zajištění co největší přesnosti polohy obsažené v jednotlivých zprávách; z tohoto důvodu byly pro jednotlivé nalezené pohyby rovněž kontrolovány příslušné indikátory kvality dat. Cílem všech těchto úkonů bylo maximálně zvýšit robustnost definované metodiky, která tak měla poskytnout spolehlivý vzorek letištních pohybů při zahrnutí jejich maximálního možného počtu. Příloha 1 obsahuje informace o vývoji počtu zaznamenaných ICAO 24bitových adres i jednotlivých pohybů v průběhu zpracování dekódovaných ADS-B zpráv. Jak je vidět, ve všech dnech byla zachována naprostá většina pohybů, tudíž lze hovořit o správném nastavení citlivosti metodiky z hlediska detekce chyb.

Příloha 2 uvádí výsledný počet zaznamenaných odletů a příletů, přičemž tyto hodnoty jsou porovnány se statistikami organizace EUROCONTROL o denních počtech IFR odletů a příletů na LKPR [114]. V rámci těchto statistik byly sledovány pouze hodnoty pocházející od provozovatele letiště, nikoli síťového manažera. Jak vyplývá z tabulky, každý den bylo v průměru zohledněno 96,28 % všech IFR odletů a 95,25 % všech IFR příletů (při uvážení zanedbatelného objemu VFR provozu). Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, metodiku zpracování dekódovaných ADS-B zpráv lze považovat za vhodně nastavenou z pohledu citlivosti na detekci chybného rozlišení jednotlivých pohybů, což je zde do značné míry potvrzeno. Cílem nutně nemusí být vyhodnotit hodnoty TIM pro všechny letištní pohyby (tj. mít 100% pokrytí), ale pouze pro dostatečně velký vzorek dat, z něž lze následně odvodit závěry pro zbytek pohybů. Pakliže v rámci takového vzorku chyběl v průměru pouze každý dvacátý pohyb, lze jej považovat za dostatečně reprezentativní. Nicméně, za určitou limitaci použitých dat lze považovat skutečnost, že v rámci sledovaného 14denního období byla zastoupena pouze hlavní dráha na LKPR, tedy dráha 06/24; nikoli vedlejší dráha 12/30. Zejména v případě vyhodnocení hodnot TIM pro provozní režimy „Pojíždění (taxi-in)“ a „Pojíždění (taxi-out)“ tak nebylo možné metodiku otestovat pro všechny dráhy na LKPR. Ovšem s ohledem na rozdílný význam obou drah toto nelze považovat za rozhodující limitaci.

V rámci této práce bylo pracováno s daty za období 14 dní během června roku 2023, na nichž byl demonstrován postup zpracování ADS-B zpráv vedoucí k nalezení hodnot TIM pro



jednotlivé letištní pohyby s cílem zpřesnění výpočtů jejich emisí. Na tomto místě je důležité zmínit, že uplatnitelnost prezentovaných výsledků není časově neomezená. Aby bylo možné získat dlouhodobě validní závěry, je zřejmé, že by bylo nutné pracovat s více takovými vzorky dat v průběhu roku a vyhodnocování průběžně opakovat. Například lze očekávat, že hodnota TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ bude v období zimních měsíců, kdy před vzletem mnohdy probíhá odmrazování letadel, delší než v případě léta. Jak bylo ukázáno, i hodnoty TIM ostatních provozních režimů jsou ovlivněné řadou faktorů, například typem letadla či uplatněnou kategorizací (např. podle rychlosti přiblížení). Pakliže by pro zpřesnění místního LTO cyklu byly využity souhrnné hodnoty nezohledňující tato dílčí kritéria, bylo by například v případě dlouhodobější změny podílu jednotlivých typů letadel na letišti nutné tyto hodnoty určit znovu. Metodika definovaná v této práci pracovala pouze v režimu „off-line“, tj. na principu zpětného vyhodnocení určitého souboru ADS-B zpráv. Pakliže by se jednalo o „on-line“ metodiku, bylo by možné ji aplikovat neustále a sledovat tak dynamický vývoj hodnot TIM. Nicméně, vzhledem k tomu, že výpočty emisí letištních pohybů není nutné provádět okamžitě, lze za dostačující považovat například scénář, kdy by byla metodika definovaná v této práci aplikována každý den v noci, přičemž by byla zpracována ADS-B data za uplynulý den.

Přestože lze na základě dosavadní diskuze považovat v kontextu cílů této práce nastavenou metodiku řešení za vhodnou (a prezentované výsledky za validní), existují bezesporu možnosti jejího vylepšení. Za perspektivní lze považovat například využití strojového učení k rozpoznání jednotlivých provozních režimů LTO cyklu, respektive příslušných časových mezníků; například pro přesnější určení času rotace letadla (t_{ROT}) či podrovnání letadla během přistání (t_{LDG}). Postup jejich určení se v této práci opíral o určité empirické/teoretické předpoklady, které nevyhnutelně vedly k určité odchylce (byť v řádu pouze sekund). Další možností zpřesnění navrhované metodiky je využití dalších technologií a zdrojů dat kromě samotného ADS-B. Například určenou dobu pojíždění pro daný pohyb lze porovnat a validovat na základě informace od letištního přehledového systému A-SMGCS. Z hlediska polohové informace lze data ze zpráv ADS-B doplnit například o výstupy z MLAT. Dále lze využívat různé provozní informace, které má k dispozici provozovatel letiště, týkající se například času příjezdu letadla na stání či jeho opuštění (mj. lze v tomto ohledu využívat časové mezníky určované v rámci konceptu A-CDM). Jak se tedy ukazuje, v případě snahy o přesné výpočty emisí letištních pohybů je spolupráce mezi jednotlivými zúčastněnými stranami velmi důležitá. Nicméně, využití samotných ADS-B zpráv z provozu pro účely zpřesnění těchto výpočtů se ukázalo jako perspektivní řešení, tudíž lze cíl práce v tomto ohledu považovat za splněný.



5 Závěr

V rámci této práce byla nejprve shrnuta problematika emisí letadel na letištích. Na úvod byly v kontextu této problematiky představeny jednotlivé emise, načež byl popsán rámeček jejich regulace. V souvislosti s tím byl představen LTO cyklus, jenž byl hlavním předmětem této práce. Kromě obecného úvodu byly představeny limitace jeho současné definice a s tím spojené možnosti jeho vylepšení, na což se zaměřila i tato práce. Následovalo představení problematiky sledování emisí letadel na letištích, a to z hlediska hlavních výpočetních přístupů a nejnámějších softwarových nástrojů. Po krátkém úvodu do problematiky směšovací výšky, na kterou lze navázat v dalším výzkumu, byly představeny relevantní myšlenky týkající se technologie ADS-B, a to konkrétně z pohledu jejích výhod, přehledu stavu implementace ve světě či předchozího využití v problematice emisí letadel. Závěrem teoretické části byl představen datový formát ASTERIX, v němž byla poskytnuta data, s nimiž bylo pracováno v rámci praktické části práce. Cílem praktické části byl návrh postupu zpracování a následné analýzy poskytnutých ADS-B zpráv z letištního provozu, jenž měl vést ke zpřesnění hodnot TIM jednotlivých provozních režimů LTO cyklu, a jeho následné otestování na skutečných datech. Tento postup byl podrobně popsán, přičemž jeho praktická aplikace na poskytnutých datech prokázala potenciál z hlediska lokálního zpřesnění hodnot TIM, a tedy LTO cyklu jako takového. Lze tedy konstatovat, že cíle této práce byly splněny.

Práci lze považovat za ověření konceptu (*proof-of-concept*) co se týče využití přehledových dat pro přesnější výpočty emisí letištních pohybů, respektive lokální zpřesnění LTO cyklu, které může být praktické například pro výzkumné pracovníky či letištní inženýry zabývající se touto problematikou. Je zřejmé, že především pro druhou jmenovanou skupinu se může jednat o přínosnou metodiku, která může významným způsobem pomoci se zpřesněním místních emisních výpočtů, což je žádoucí zejména za situace, kdy jsou dopady letecké dopavy na životní prostředí stále více vnímané. Pro práci byl poskytnut vzorek ADS-B dat za 14denní období na počátku léta roku 2023. V rámci podrobnějšího testování metodiky by bylo vhodné pracovat s více vzorky, respektive i s daty pocházejícími z jiných ročních období. Do budoucna lze definovanou metodiku rozšířit o další datové zdroje, jež by mohly mj. sloužit k validaci hodnot TIM vypočítaných čistě na základě ADS-B, a tedy obecně k jejich přesnějšímu určení. V tomto ohledu by mohly být využity další přehledové systémy, například A-SMGCS či MLAT, či různá provozní data shromažďovaná provozovatelem letiště pro jiné účely. Pro další zpřesnění LTO cyklu by bylo vhodné zohlednit faktory, jako je například směšovací výška, která ovlivňuje hodnoty TIM některých provozních režimů. Budoucí výzkum by se měl rovněž zaměřit na případnou redefinici LTO cyklu pro účely letištních emisních výpočtů, například z pohledu rozeznání více provozních režimů.



Seznam použitých zdrojů

- [1] LIEUWEN, Timothy C. a YANG, Vigor. *Gas turbine emissions*. 1st edition. New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 9781139015462
- [2] STLOUKAL, Bo. *Kvalita ovzduší v okolí letišť během pandemie COVID-19*. Praha, 2022. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.
- [3] TAIT, Kieran N.; KHAN, Mohammad Anwar H.; BULLOCK, Steve; LOWENBERG, Mark H. a SHALLCROSS, Dudley E. Aircraft Emissions, Their Plume-Scale Effects, and the Spatio-Temporal Sensitivity of the Atmospheric Response: A Review. *Aerospace* [online]. 2022, roč. 9, č. 7. ISSN 2226-4310. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/aerospace9070355>.
- [4] MASIOL, Mauro a HARRISON, Roy M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment* [online]. 2014, roč. 95, s. 409-455. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>.
- [5] International Civil Aviation Organization (ICAO). *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology*, Version 11.1 [online]. 2018 [cit. 2023-08-25]. Dostupné z: https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v11-2018.pdf
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Aviation and the Global Atmosphere* [online]. 1999 [cit. 2023-09-10]. Dostupné z: <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.php?idp=0>
- [7] JAKOVLJEVIĆ, Ivan; MIJAILOVIĆ, Radomir a MIROSAVLJEVIĆ, Petar. Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft. *Energy* [online]. 2018, roč. 148, s. 866-875. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.022>.
- [8] RUPCIC, Lea; PIERRAT, Eleonore; SAAVEDRA-RUBIO, Karen; THONEMANN, Nils; OGUGUA, Chizoba et al. Environmental impacts in the civil aviation sector: Current state and guidance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2023, roč. 119. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103717>.
- [9] RITCHIE, Hannah. Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation? In: *Our World in Data* [online]. 2023 [cit. 2023-08-22]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>
- [10] BLOCKLEY, Richard; AGARWAL, Ramesh; COLLIER, Fayette; SCHAEFER, Andreas a SEABRIDGE, Allan. *Green Aviation*. 1st edition. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016. ISBN 9781118866351.
- [11] DALEY, Ben. *Air Transport and the Environment*. Ashgate, 2010. ISBN 978-0-7546-7286-9.
- [12] MACIEJEWSKA, Marta; GALANT, Marta a FUĆ, Paweł. Comparison of exhaust emission from the most commonly used aircrafts with implementation LTO cycle to operating conditions. *Combustion Engines* [online]. 2019, roč. 179, č. 4, s. 198-203. ISSN 2300-9896. Dostupné z: <https://doi.org/10.19206/CE-2019-433>.
- [13] Chevron. *Aviation Fuels: Technical Review* [online]. 2007 [cit. 2023-09-05]. Dostupné z: <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/aviation-tech-review.pdf>
- [14] RILEY, Karie; COOK, Rich; CARR, Edward a MANNING, Bryan. A systematic review of the impact of commercial aircraft activity on air quality near airports. *City and Environment Interactions* [online]. 2021, roč. 11. ISSN 2590-2520. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100066>.
- [15] CABRERA, Eduardo a DE SOUSA, João M. Melo. Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. *Energies* [online]. 2022, roč. 15, č. 7. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en15072440>.
- [16] MOKALLED, Tharwat; ADJIZIAN GÉRARD, Jocelyne; ABBOUD, Maher; TROCQUET, Claire; NASREDDINE, Rouba et al. VOC tracers from aircraft activities at Beirut Rafic Hariri International Airport.



- Atmospheric Pollution Research* [online]. 2019, roč. 10, č. 2, s. 537-551. ISSN 1309-1042. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.009>.
- [17] BENDTSEN, Katja M.; BENGTSSEN, Elizabeth; SABER, Anne T. a VOGEL, Ulla. A review of health effects associated with exposure to jet engine emissions in and around airports. *Environmental Health* [online]. 2021, roč. 20, č. 1. ISSN 1476-069X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00690-y>.
- [18] OWEN, Bethan; ANET, Julien G.; BERTIER, Nicolas; CHRISTIE, Simon; CREMASCHI, Michele et al. Review: Particulate Matter Emissions from Aircraft. *Atmosphere* [online]. 2022, roč. 13, č. 8. ISSN 2073-4433. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos13081230>.
- [19] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP)* [online]. 2023 [cit. 2023-09-14]. Dostupné z: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- [20] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Smart environmental standards* [online]. 2023 [cit. 2023-09-14]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/smart-environmental-standards>
- [21] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Doc 9889: Airport Air Quality Manual*. 2nd edition. Montréal: ICAO, 2020. ISBN 978-92-9258-963-9.
- [22] Letecký předpis L16 – Ochrana životního prostředí – Svazek II – Emise letadlových motorů. In: *Letecká informační služba ŘLP ČR* [online]. Ministerstvo dopravy České republiky, 1. 4. 2022. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-16ii/index.htm>
- [23] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation – Environmental Protection – Volume III – Aeroplane CO2 Emissions*. 1st edition. Montréal: ICAO, 2017. ISBN 978-92-9258-232-6.
- [24] Letecký předpis L16 – Ochrana životního prostředí – Svazek III – Emise CO2 letounů. In: *Letecká informační služba ŘLP ČR* [online]. Ministerstvo dopravy České republiky, 1. 4. 2022. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-16iii/index.htm>
- [25] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (v29B) (dataset)* [online]. 2023 [cit. 2023-09-14]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/131424/en>
- [26] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Introduction to the ICAO Engine Emissions Databank* [online]. 2023 [cit. 2023-09-05]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/45576/en>
- [27] WEIJUN, Pan; HENGHENG, Zhang; XIAOLEI, Zhang a TIANYI, Wu. Calculation and analysis of pollutants during takeoff and landing based on airborne data. *Environmental Progress & Sustainable Energy* [online]. 2022, roč. 41, č. 2. ISSN 1944-7442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ep.13743>.
- [28] XU, Hao; XIAO, Kai; CHENG, Jinping; YU, Yamei; LIU, Qizhen et al. Characterizing aircraft engine fuel and emission parameters of taxi phase for Shanghai Hongqiao International Airport with aircraft operational data. *Science of The Total Environment* [online]. 2020, roč. 720. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137431>.
- [29] TURGUT, Enis T.; CAVCAR, Mustafa; USANMAZ, Oznur; YAY, Ozan D.; DOGEROGLU, Tuncay et al. Investigating actual landing and takeoff operations for time-in-mode, fuel and emissions parameters on domestic routes in Turkey. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2017, roč. 53, s. 249-262. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.018>.
- [30] PATTERSON, Judith; NOEL, George J.; SENZIG, David A.; ROOF, Christopher J. a FLEMING, Gregg G. Analysis of Departure and Arrival Profiles Using Real-Time Aircraft Data. *Journal of Aircraft* [online]. 2009, roč. 46, č. 4, s. 1094-1103. ISSN 0021-8669. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.42432>.
- [31] GŁOWACKI, Paweł; KALINA, Piotr a KAWALEC, Michał. Estimating Emissions of Harmful Exhaust Components by Aircraft Engines During the Takeoff and Landing Cycle in Airport Space. *Transactions on*



- Aerospace Research* [online]. 2021, roč. 2021, č. 2, s. 63-70. ISSN 2545-2835. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/tar-2021-0011>.
- [32] PARK, Dong Kie a KIM, Jin Ki. Influential factors to aircraft taxi time in airport. *Journal of Air Transport Management* [online]. 2023, roč. 106. ISSN 0969-6997. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102321>.
- [33] DISSANAYAKA, D. M. M. S.; ADIKARIWATTAGE, V. V. a PASINDU, H. R. Evaluation of CO2 Emission at Airports from Aircraft Operations within the Landing and Take-Off Cycle. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2020, roč. 2674, č. 6, s. 444-456. ISSN 0361-1981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0361198120919411>.
- [34] NOWAK, M; JASIŃSKI, R a GALANT, M. Implementation of the LTO cycle in flight conditions using FNPT II MCC simulator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, roč. 421. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/421/4/042060>.
- [35] JUNGSMANN, Aleš. *Emise z leteckého provozu v rámci LTO cyklu na letišti Praha Ruzyně*. Praha, 2009. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.
- [36] JUNGSMANN, Aleš. *Kompletní emise z leteckého provozu na letišti Praha Ruzyně*. Praha, 2011. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.
- [37] ZHOU, Ying; JIAO, Yufang; LANG, Jianlei; CHEN, Dongsheng; HUANG, Cheng et al. Improved estimation of air pollutant emissions from landing and takeoff cycles of civil aircraft in China. *Environmental Pollution* [online]. 2019, roč. 249, s. 463-471. ISSN 0269-7491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.088>
- [38] STETTLER, M.E.J.; EASTHAM, S. a BARRETT, S.R.H. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment* [online]. 2011, roč. 45, č. 31, s. 5415-5424. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.012>.
- [39] ZHU, Changxin; HU, Rong; LIU, Bowen a ZHANG, Junfeng. Uncertainty and its driving factors of airport aircraft pollutant emissions assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2021, roč. 94. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102791>.
- [40] PASARIBU, H. M.; MEDIANTO, R.; JUSUF, J.; OKTAFIANTO, R. a ATIQAHA, R. ADS-B data processing to develop aircraft kinematics model parameters. In: *The 8th International Seminar on Aerospace Science and Technology – ISAST 2020* [online]. 2021, 020011-1–020011-12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0060611>.
- [41] DISSANAYAKA, Manori; RYLEY, Tim; SPASOJEVIC, Bojana a CALDERA, Savindi. Evaluating Methods That Calculate Aircraft Emission Impacts on Air Quality: A Systematic Literature Review. *Sustainability* [online]. 2023, roč. 15, č. 12. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su15129741>.
- [42] KURNIAWAN, Jermanto S. a KHARDI, S. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. *Environmental Impact Assessment Review* [online]. 2011, roč. 31, č. 3, s. 240-252. ISSN 0195-9255. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.09.001>.
- [43] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *About the IPCC* [online]. 2023 [cit. 2023-09-21]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/about/>
- [44] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [online]. 2006 [cit. 2023-09-22]. Dostupné z: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- [45] WINTHER, Morten a RYPDAL, Kristin. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: 1.A.3.a, 1.A.5.b Aviation* [online]. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské unie, 2023 [cit. 2023-10-25]. Dostupné



- z: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-2023/view>
- [46] Federal Aviation Administration (FAA). *Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Version 3e Technical Manual* [online]. 2022 [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT3e_TechManual.pdf
- [47] Janicke Consulting. *LASPORT: A program system for the calculation of airport-related pollutant emissions and concentrations in the lower atmosphere* [online]. 2018 [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://www.janicke.de/data/lasport/lasport-2.3.pdf>
- [48] Cambridge Environmental Research Consultants (CERC). *ADMS-Airport: World leading software for air quality management for airports* [online]. 2023 [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-Airport-model.html>
- [49] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *AEM: Advanced emission model* [online]. 2023 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/model/advanced-emission-model>
- [50] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *AEM Advanced Emissions Model Flight Emissions assessments* [online]. 8.-9. 12. 2022 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-12/ectl_env_impact_assessment_forum_-_aem.pdf
- [51] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *OPEN-ALAQS: Airport local air quality studies* [online]. 2023 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/online-tool/airport-local-air-quality-studies>
- [52] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *EUROCONTROL Environmental Impact Assessment Forum: OPEN-ALAQS* [online]. 8.-9. 12. 2022 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-12/ectl_env_impact_assessment_forum_-_open-alaqs.pdf
- [53] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *IMPACT: Integrated aircraft noise and emissions modelling platform* [online]. 2023 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/platform/integrated-aircraft-noise-and-emissions-modelling-platform>
- [54] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *EUROCONTROL Environmental Impact Assessment Forum: IMPACT* [online]. 8.-9. 12. 2022 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-12/ectl_env_impact_assessment_forum_-_impact.pdf
- [55] WANG, Kai; WANG, Xiaoqi; CHENG, Shuiyuan; CHENG, Long a WANG, Ruipeng. National emissions inventory and future trends in greenhouse gases and other air pollutants from civil airports in China. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2022, roč. 29, č. 54, s. 81703-81712. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21425-1>.
- [56] DALKIRAN, Alper. Determination of airports' atmospheric mixing height boundaries using operational data. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* [online]. 2021, roč. 93, č. 8, s. 1278-1286. ISSN 1748-8842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2021-0111>.
- [57] Česká meteorologická společnost (ČMeS). Vrstva směšovací. In: *Elektronický meteorologický slovník* [online]. 2023 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/4441>
- [58] SPELLMAN, Frank R. *The Handbook of Meteorology*. 1st edition. Blue Ridge Summit: Scarecrow Press, Incorporated, 2012. ISBN 9780810886124.
- [59] DE VISSCHER, Alex. *Air dispersion modeling: foundations and applications*. 1st edition. Newark: Wiley, 2013. ISBN 9781118723074.
- [60] BRANIŠ, Martin a HŮNOVÁ, Iva. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. Praha: Karolinum, 2009. ISBN 9788024615981.



- [61] SAXENA, Pallavi a NAIK, Vaishali. *Air pollution: sources, impacts and controls*. 1st edition. Wallingford: CABI, 2019. ISBN 9781786393913.
- [62] VALLERO, Daniel. *Fundamentals of Air Pollution*. 4th edition. Londýn: Academic Press, 2008. ISBN 978-0-12-373615-4.
- [63] WebMET.com. *6.5.1 The Holzworth Method* [online]. 2002 [cit. 2023-10-30]. Dostupné z: http://www.webmet.com/met_monitoring/651.html
- [64] YANG, Xiaowen; CHENG, Shuiyuan; LANG, Jianlei; XU, Ran a LV, Zhe. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport. *Journal of Environmental Sciences* [online]. 2018, roč. 72, s. 198-207. ISSN 1001-0742. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.01.007>.
- [65] KOTTHAUS, Simone; BRAVO-ARANDA, Juan Antonio; COLLAUD COEN, Martine; GUERRERO-RASCADO, Juan Luis; COSTA, Maria João et al. Atmospheric boundary layer height from ground-based remote sensing: a review of capabilities and limitations. *Atmospheric Measurement Techniques* [online]. 2023, roč. 16, č. 2, s. 433-479. ISSN 1867-8548. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/amt-16-433-2023>.
- [66] TOOLEY, Mike a WYATT, David. *Aircraft Communications and Navigation Systems*. Second edition. Routledge, 2018. ISBN 978-0-415-82775-1.
- [67] SUN, Junzi. *The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals*. Second edition. Delft: TU Delft OPEN Publishing, 2021. ISBN 978-94-6366-402-8.
- [68] Letecký předpis L10 – O civilní letecké telekomunikační službě – Svazek IV – Přehledový a protisrážkový systém. In: *Letecká informační služba ŘLP ČR* [online]. Ministerstvo dopravy České republiky, 3. 11. 2022. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10iv/index.htm>
- [69] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Doc 9924: Aeronautical Surveillance Manual*. 2nd edition. Montréal: ICAO, 2017. ISBN 978-92-9258-270-8.
- [70] NAV CANADA. *ADS-B Performance Requirements* [online]. 2024 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.navcanada.ca/en/air-traffic/space-based-ads-b/ads-b-performance-requirements.aspx>
- [71] Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1207/2011 ze dne 22. listopadu 2011, kterým se stanoví požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledu v jednotném evropském nebi. In: *EUR-Lex [právní informační systém]*. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R1207>
- [72] Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1028/2014 ze dne 26. září 2014 o změně prováděcího nařízení (EU) č. 1207/2011, kterým se stanoví požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledu v jednotném evropském nebi. In: *EUR-Lex [právní informační systém]*. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1028>
- [73] Prováděcí nařízení Komise (EU) 2020/587 ze dne 29. dubna 2020, kterým se mění prováděcí nařízení (EU) č. 1206/2011, kterým se stanoví požadavky na identifikaci letadla pro účely přehledu v jednotném evropském nebi, a prováděcí nařízení (EU) č. 1207/2011, kterým se stanoví požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledu v jednotném evropském nebi. In: *EUR-Lex [právní informační systém]*. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0587>
- [74] Prováděcí nařízení Komise (EU) 2023/1770 ze dne 12. září 2023, kterým se stanoví ustanovení týkající se vybavení letadel požadovaného k užívání vzdušného prostoru jednotného evropského nebe a provozní pravidla související s užíváním vzdušného prostoru jednotného evropského nebe a kterým se zrušuje nařízení (ES) č. 29/2009 a prováděcí nařízení (EU) č. 1206/2011, (EU) č. 1207/2011 a (EU) č. 1079/2012. In: *EUR-Lex [právní informační systém]*. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1770>



- [75] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *Automatic dependent surveillance – broadcast airborne equipage monitoring* [online]. 2024 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/service/adsb-equipage>
- [76] Federal Aviation Administration (FAA). *Equip ADS-B* [online]. 2024 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/technology/equipadsb/research/airspace
- [77] CFR Title 14, Chapter I, Part 91, § 91.225 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out equipment and use. In: *Code of Federal Regulations* [online]. 18. 12. 2023 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91/subpart-C/section-91.225>
- [78] Civil Aviation Authority of New Zealand. *Equipment & installation requirements* [online]. 2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://ads-b.aviation.govt.nz/equipment-and-installation-requirements>
- [79] Civil Aviation Safety Authority. *How ADS-B works* [online]. 2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://www.casa.gov.au/operations-safety-and-travel/airspace/automatic-dependent-surveillance-broadcast-ads-b/how-ads-b-works>
- [80] Civil Aviation Safety Authority of Fiji. *FIJI AERONAUTICAL INFORMATION CIRCULAR AIC 03-23: AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE BROADCAST (ADS-B) OUT EXCLUSIVE AIRSPACE WITHIN THE FIJI DOMESTIC SECTOR* [online]. 2023 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://caaf.org.fj/sites/default/files/2023-01/AIC%2003-23%20ADS-B.pdf>
- [81] General Civil Aviation Authority of UAE. *CAR PART IV OPERATIONS REGULATIONS CAR-OPS 1 COMMERCIAL & PRIVATE AIR TRANSPORTATION (AEROPLANES)* [online]. 2020 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: [https://www.gcaa.gov.ae/en/epublication/EPublications/Civil%20Aviation%20Regulations%20\(CARs\)/CAR%20IV%20-%20FLIGHT%20OPERATIONS%20REGULATIONS/AIRCRAFT%20OPERATIONS/CAR-OPS%201%20-%20COMMERCIAL%20AND%20PRIVATE%20AIR%20TRANSPORTATION-AEROPLANES%20-%20ISSUE%2008.pdf](https://www.gcaa.gov.ae/en/epublication/EPublications/Civil%20Aviation%20Regulations%20(CARs)/CAR%20IV%20-%20FLIGHT%20OPERATIONS%20REGULATIONS/AIRCRAFT%20OPERATIONS/CAR-OPS%201%20-%20COMMERCIAL%20AND%20PRIVATE%20AIR%20TRANSPORTATION-AEROPLANES%20-%20ISSUE%2008.pdf)
- [82] Civil Aviation Safety Authority of Singapore. *AERONAUTICAL INFORMATION CIRCULAR AIC 03/2020-1: AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE BROADCAST (ADS-B) OUT EXCLUSIVE AIRSPACE IMPLEMENTATION PLAN WITHIN SINGAPORE FIR* [online]. 9. 11. 2020 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: [https://www.caas.gov.sg/docs/default-source/pdf/singapore-aic-2020-03---automatic-dependent-surveillance-broadcast-\(ads-b\)-out-exclusive-airspace-implementation-plan-within-singapore-fir.pdf](https://www.caas.gov.sg/docs/default-source/pdf/singapore-aic-2020-03---automatic-dependent-surveillance-broadcast-(ads-b)-out-exclusive-airspace-implementation-plan-within-singapore-fir.pdf)
- [83] Airports Authority of India. *AIP SUPPLEMENT 148/2018: AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE – BROADCAST (ADS-B) OUT EQUIPAGE MANDATE IN INDIA* [online]. 25. 10. 2018 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: https://aim-india.aai.aero/sites/default/files/aip_supplements/AIPS_2018_148.pdf
- [84] WANG, Bing; LI, Jie; LI, Chi a WU, Di. A Method for Computing Flight Operation Fuel Burn and Emissions Based on ADS-B Trajectories. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation* [online]. 2020, roč. 52, č. 2, s. 183-196. ISSN 1990-7710. Dostupné z: [https://doi.org/10.6125/JoAAA.202006_52\(2\).05](https://doi.org/10.6125/JoAAA.202006_52(2).05)
- [85] FILIPPONE, A.; PARKES, B.; BOJDO, N. a KELLY, T. Prediction of aircraft engine emissions using ADS-B flight data. *The Aeronautical Journal* [online]. 2021, roč. 125, č. 1288, s. 988-1012. ISSN 0001-9240. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.2>.
- [86] FILIPPONE, Antonio a PARKES, Ben. Evaluation of commuter airplane emissions: A European case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2021, roč. 98. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102979>.
- [87] SUN, Junzi a DEDOUSSI, Irene. Evaluation of Aviation Emissions and Environmental Costs in Europe Using OpenSky and OpenAP. In: *The 9th OpenSky Symposium* [online]. Basel Switzerland: MDPI, 2021, 5-. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/engproc2021013005>.



- [88] FILIPPONE, Antonio; BOJDO, Nicholas; MEHTA, Shreya a PARKES, Ben. Using the OpenSky ADS-B Data to Estimate Aircraft Emissions. In: *The 9th OpenSky Symposium* [online]. Basel Switzerland: MDPI, 2022, 11-. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/engproc2021013011>.
- [89] QUADROS, Flávio D. A.; SNELLEN, Mirjam; SUN, Junzi a DEDOUSSI, Irene C. Global Civil Aviation Emissions Estimates for 2017–2020 Using ADS-B Data. *Journal of Aircraft* [online]. 2022, roč. 59, č. 6, s. 1394-1405. ISSN 1533-3868. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.C036763>.
- [90] KLENNER, Jan; MURI, Helene a STRØMMAN, Anders H. High-resolution modeling of aviation emissions in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2022, roč. 109. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103379>.
- [91] ZHANG, Jingran; ZHANG, Shaojun; ZHANG, Xiaole; WANG, Jing; WU, Ye et al. Developing a High-Resolution Emission Inventory of China's Aviation Sector Using Real-World Flight Trajectory Data. *Environmental Science & Technology* [online]. 2022, roč. 56, č. 9, s. 5743-5752. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08741>.
- [92] ZHANG, Xiaole; CHEN, Xi; ZHANG, Luchi a WANG, Jing. A number-based inventory of particle emissions by civil aviation and the influences on the particle number concentration near Zurich airport. In: *Proceedings of the 7th OpenSky Workshop 2019* [online]. 2019, roč. 67, s. 109-116.
- [93] OLIVE, Xavier; SUN, Junzi; BASORA, Luis; SPINIELLI, Enrico a LOLLI, Simone. Environmental inefficiencies for arrival flights at European airports. *PLOS ONE* [online]. 2023, roč. 18, č. 6. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287612>.
- [94] TAIT, Kieran N.; ROOME, Stephen a HOOLE, Joshua. Investigating the Occurrence of Aircraft Exhaust Plume Intersections Using Open-Source Air Traffic Data. In: *10th OpenSky Symposium* [online]. Basel Switzerland: MDPI, 2022, 16-. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/engproc2022028016>.
- [95] XUE, Dabin; LIU, Zhizhao; WANG, Bing a YANG, Jian. Impacts of COVID-19 on aircraft usage and fuel consumption: A case study on four Chinese international airports. *Journal of Air Transport Management* [online]. 2021, roč. 95. ISSN 0969-6997. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102106>.
- [96] HILPERT, Hendrik; FRIEDEMANN, Stefan a SCHUMANN, Matthias. Improved Emission Data Collection in Air Cargo Processes using ADS-B. In: *ACIS 2011 Proceedings* [online]. Dostupné z: <http://aisel.aisnet.org/acis2011/16>
- [97] SUN, Junzi; OLIVE, Xavier a STROHMEIER, Martin. Environmental Footprint of Private and Business Jets. In: *10th OpenSky Symposium* [online]. Basel Switzerland: MDPI, 2022, 13-. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/engproc2022028013>.
- [98] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange – Part 1 – All Purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange (ASTERIX)* [online]. 2013 [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/part_1_-_eurocontrol_specification_asterix_spec-149_ed_2.1.pdf
- [99] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *ASTERIX: All-purpose structured EUROCONTROL surveillance information exchange* [online]. 2023 [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/asterix>
- [100] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *EUROCONTROL STANDARD DOCUMENT FOR SURVEILLANCE DATA EXCHANGE – Part 12: Category 021 – ADS-B Reports* [online]. 2011 [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/asterix/part2-cat021-asterix-ads-b-messages-part-12.pdf>



- [101] MathWorks. *fread* [online]. 2024 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fread.html>
- [102] ŘEZANKOVÁ, Hana; HÚSEK, Dušan a SNÁŠEL, Václav. *Shluková analýza dat*. Praha: Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-26-9.
- [103] IKOTUN, Abiodun M.; EZUGWU, Absalom E.; ABUALIGAH, Laith; ABUHAJJA, Belal a HEMING, Jia. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data. *Information Sciences* [online]. 2023, roč. 622, s. 178-210. ISSN 0020-0255. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139>.
- [104] SUN, Junzi; ELLERBROEK, Joost a HOEKSTRA, Jacco. Flight Extraction and Phase Identification for Large Automatic Dependent Surveillance–Broadcast Datasets. *Journal of Aerospace Information Systems* [online]. 2017, roč. 14, č. 10, s. 566-572. ISSN 1940-3151. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.1010520>.
- [105] SCHUBERT, Erich; SANDER, Jörg; ESTER, Martin; KRIEGEL, Hans Peter a XU, Xiaowei. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems* [online]. 2017, roč. 42, č. 3, s. 1-21. ISSN 0362-5915. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3068335>.
- [106] MATEJOVIE, Michael. *Cykličnost parametru NACp ve zprávách ADS-B a jejich možná příčina*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.
- [107] PLENINGER, S.; HOSPODKA, J.; KRAUS, J.; NAGY, I.; STEINER, J.; TOPKOVÁ, T.; LUKEŠ, P.; PILMANNOVÁ, T. *Metodika detekce nezákonného ovlivňování signálu GNSS prostřednictvím využití systému ADS-B* [online]. Projekt CK01000183. Praha: Technologická agentura ČR. 2023 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Letecka-doprava/Vyzkumna-cinnost/Methodika-detekce-nezakonneho-ovlivnovani-signalu-G/Methodika_detekce_ovlivnovani_signalu_GNSS_prostrednictvim_ADS_B.pdf.aspx
- [108] International Civil Aviation Organization (ICAO) – Asia and Pacific Office. *ADS-B IMPLEMENTATION AND OPERATIONS GUIDANCE DOCUMENT: Edition 15.0* [online]. 2022 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/cns/AIGD%20Edition%2015.0.pdf>
- [109] STLOUKAL, Bo a HOSPODKA, Jakub. Estimating Aircraft Take-Off Roll Time Using ADS-B Data. In: *New Trends in Civil Aviation 2024* [v tisku]. 2024.
- [110] OpenSky Network. *Aircraft database complete 2023-07 (dataset)* [online]. 2023 [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://opensky-network.org/datasets/metadata/aircraft-database-complete-2023-07.csv>
- [111] EUROCONTROL Learning Zone. *Aircraft performance database* [online]. 2024 [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://contentzone.eurocontrol.int/aircraftperformance/default.aspx?>
- [112] Federal Aviation Administration (FAA). *Aircraft Characteristics Database (dataset)* [online]. 7. 9. 2023 [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/FAA-Aircraft-Char-DB-AC-150-5300-13B-App-2023-09-07.xlsx>
- [113] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). *Taxi times – Summer 2023* [online]. 11. 12. 2023 [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/taxi-times-summer-2023>
- [114] EUROCONTROL Aviation Intelligence Unit Portal. *Airport traffic: Daily IFR arrivals and departures by airport (dataset)* [online]. 15. 2. 2024 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/performance/data/download/xls/Airport_Traffic.xlsx

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Emise letadlových motorů (překresleno z [2]).....	13
Obrázek 2: Celkové LTO emise HC a CO vybraných motorů včetně předpisových limitů (limity z [22], data z [25])	24
Obrázek 3: Podrobnější provozní letový cyklus dle manuálu ICAO [21]	29
Obrázek 4: Ukázka uživatelského rozhraní softwaru LASPORT [47].....	39
Obrázek 5: Vizualizace výsledků výpočtů emisí CO ₂ na letišti Paříž-Orly, software Open-ALAQs [52]	41
Obrázek 6: Základní rozdělení CNS systémů včetně vybraných příkladů, se zvýrazněním technologie ADS-B ...	44
Obrázek 7: Časový vývoj vybavenosti ADS-B v2 v rámci oblasti spravované NM (vlevo) a aktuální rozšíření technologie u jednotlivých kategorií letadel (vpravo) (stav k dubnu 2024) (upraveno z [75])	47
Obrázek 8: Počet nalezených článků zaměřených na ADS-B a emise podle roku publikace	49
Obrázek 9: Základní struktura dat ve formátu ASTERIX.....	52
Obrázek 10: Struktura zprávy ve formátu ASTERIX včetně pole FSPEC a obsažených datových položek	53
Obrázek 11: Algoritmus pro kontrolu datových bloků a určení jejich počtu a délek	56
Obrázek 12: Základní princip algoritmu dekódování dat ve formátu ASTERIX	57
Obrázek 13: Základní algoritmus procházení jednotlivých zpráv v rámci datového bloku	59
Obrázek 14: Poloha zpráv obsahujících minimální geometrickou výšku vysílaných 19. 6. 2023 pro všechny adresy před filtrací (červené křížky) a po filtraci (modré kružnice), včetně oblasti filtrace (zelený obdélník)	64
Obrázek 15: Algoritmus identifikace jednotlivých pohybů v datech založený na shlukové analýze	66
Obrázek 16: Ukázka rozdílných výsledků aplikace algoritmu k-means (a) a DBSCAN (b) z pohledu správné identifikace jednotlivých pohybů (c) (Scénář B); adresa 39E681 (F-HZUB), 19. 6. 2023.....	70
Obrázek 17: Ukázka rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě vysílání jediného volacího znaku během celého dne (b) (Scénář C); adresa 49D506 (OK-BOB), 19. 6. 2023	71
Obrázek 18: Ukázka rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě vysílání minimálně dvou volacích znaků během celého dne (b) (Scénář D); adresa A51EDE (N429UP), 19. 6. 2023	72
Obrázek 19: Ukázka rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě přípustné kontaminace některého ze shluků (b) (Scénář E); adresa 4CACB0 (EI-GEA), 17. 6. 2023.....	74
Obrázek 20: Ukázka chybného rozlišení jednotlivých pohybů pomocí algoritmu DBSCAN (a) v případě nevyhovujících dat (b) (Scénář F); adresa 49D253 (OK-OBR), 19. 6. 2023	75
Obrázek 21: Algoritmus určení typu pohybu (přilet = 1, odlet = 2).....	87
Obrázek 22: Ukázka profilu traťové rychlosti přiletu (TVS2825, OK-SWH, 17. 6. 2023) (a) a odletu (TVS2852, OK- SWH, 17. 6. 2023) (b) s vyznačením hraniční hodnoty 50 uzlů (červená čára)	88
Obrázek 23: Rozdělení přiletu na jednotlivé části včetně příslušných LTO provozních režimů a časových mezníků	89
Obrázek 24: Rozdělení odletu na jednotlivé části včetně příslušných LTO provozních režimů a časových mezníků	96
Obrázek 25: Medián a modus u šikmých (vlevo, vpravo) a symetrických (uprostřed) dat.....	106
Obrázek 26: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Přiblížení“ pro jednotlivé dny (bez odlehlých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO	112
Obrázek 27: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-in)“ pro jednotlivé dny (bez odlehlých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO	113
Obrázek 28: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Pojíždění (taxi-out)“ pro jednotlivé dny (bez odlehlých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO	114
Obrázek 29: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Vzlet“ pro jednotlivé dny (bez odlehlých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO	115



Obrázek 30: Boxploty hodnot TIM provozního režimu „Stoupání“ pro jednotlivé dny (bez odlehých hodnot), včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO	116
Obrázek 31: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Přiblížení“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (240 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot	117
Obrázek 32: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (420 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot	117
Obrázek 33: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (1 140 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot	117
Obrázek 34: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Vzlet“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (42 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot	118
Obrázek 35: Histogram hodnot TIM pro provozní režim „Stoupání“ za celé sledované období, včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO (132 s), mediánu a modu zaokrouhlených hodnot	118
Obrázek 36: Počet zaznamenaných odletů a příletů pro každý den sledovaného období	119
Obrázek 37: Využití letištních drah pohyby (přilety a odlety zvlášť) za celé sledované období	119
Obrázek 38: Procentuální podíl využití jednotlivých drah odlety a přílety pro každý den sledovaného období	120
Obrázek 39: Zaokrouhlený průměrný počet příletů (a) a odletů (b) pro každou hodinu během dne v rámci sledovaného období	120
Obrázek 40: Boxploty hodnot TIM pro nejčastější typy letadel za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Přiblížení“	122
Obrázek 41: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel podle rychlosti přiblížení za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Přiblížení“ ...	123
Obrázek 42: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Přiblížení“	124
Obrázek 43: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	125
Obrázek 44: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	126
Obrázek 45: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé dráhy za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	127
Obrázek 46: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	128
Obrázek 47: Boxploty hodnot TIM po dvouhodinových intervalech v průběhu dne za celé sledované období, včetně průměrného celkového počtu pohybů na letišti (modře) a vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	129
Obrázek 48: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé dráhy za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	129
Obrázek 49: Boxploty hodnot TIM pro nejčastější typy letadel za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Vzlet“	130
Obrázek 50: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Vzlet“	131
Obrázek 51: Boxploty hodnot TIM pro nejčastější typy letadel za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Stoupání“	132
Obrázek 52: Kernel-ploty (a) a boxploty hodnot TIM (b) pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období včetně vyznačené standardní hodnoty TIM dle ICAO – provozní režim „Stoupání“	133



Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: LTO cyklus původně definovaný ICAO pro podzvuková letadla [22]	26
Tabulka 2: Výsledky vybraných studií a prací odhadujících reálné hodnoty TIM v rámci LTO cyklu.....	28
Tabulka 3: Rozšířený LTO cyklus podle studie Stettler et al. [38].....	30
Tabulka 4: Povolené kategorie zařízení vysílajících ADS-B zprávy dle formátu ASTERIX [100].....	62
Tabulka 5: Ukázka z vlastní databáze letadel vytvořené pro účely pokročilé úrovně analýzy.....	108
Tabulka 6: Sledovaná kritéria u jednotlivých provozních režimů v rámci pokročilé úrovně analýzy.....	109
Tabulka 7: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Přiblížení“ pro jednotlivé dny	111
Tabulka 8: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“ pro jednotlivé dny ..	112
Tabulka 9: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“ pro jednotlivé dny	113
Tabulka 10: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Vzlet“ pro jednotlivé dny	114
Tabulka 11: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro provozní režim „Stoupání“ pro jednotlivé dny.....	115
Tabulka 12: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé provozní režimy za celé sledované období .	116
Tabulka 13: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro nejčastější typy letadel za celé sledované období – provozní režim „Přiblížení“	121
Tabulka 14: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel podle rychlosti přiblížení za celé sledované období – provozní režim „Přiblížení“	122
Tabulka 15: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období – provozní režim „Přiblížení“	123
Tabulka 16: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	124
Tabulka 17: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	125
Tabulka 18: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé dráhy za celé sledované období – provozní režim „Pojíždění (taxi-in)“	126
Tabulka 19: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 24 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	127
Tabulka 20: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro dvouhodinové intervaly v průběhu dne za celé sledované období; dráha (RWY) 06 – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	128
Tabulka 21: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé dráhy za celé sledované období – provozní režim „Pojíždění (taxi-out)“	129
Tabulka 22: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro nejčastější typy letadel za celé sledované období – provozní režim „Vzlet“	130
Tabulka 23: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období – provozní režim „Vzlet“	131
Tabulka 24: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro nejčastější typy letadel za celé sledované období – provozní režim „Stoupání“	132
Tabulka 25: Vyhodnocené statistické charakteristiky pro jednotlivé kategorie letadel dle vlastní kategorizace za celé sledované období – provozní režim „Stoupání“	133



Přílohy

Příloha č. 1: Počty 24bitových adres a identifikovaných pohybů v průběhu zpracování ADS-B zpráv

Datum	Původní počet 24bit adres	Počet adres mimo traťový provoz	Počet adres spojených s letištěm LKPR	Počet adres zbylých po shlukování pohybů	Počet pohybů nalezených shlukováním	Výsledný počet pohybů s určenými hodnotami TIM
Sobota 17. 6. 2023	403	156	139	138	331	325
Neděle 18. 6. 2023	450	186	162	160	384	377
Pondělí 19. 6. 2023	462	181	157	154	360	354
Úterý 20. 6. 2023	463	187	154	154	340	335
Středa 21. 6. 2023	461	182	166	163	368	361
Čtvrtek 22. 6. 2023	454	181	161	159	380	372
Pátek 23. 6. 2023	451	189	165	163	386	378
Sobota 24. 6. 2023	425	151	136	134	333	329
Neděle 25. 6. 2023	452	189	166	163	387	380
Pondělí 26. 6. 2023	453	187	166	163	377	370
Úterý 27. 6. 2023	458	175	154	152	337	333
Středa 28. 6. 2023	502	188	166	165	377	373
Čtvrtek 29. 6. 2023	484	194	168	166	389	385
Pátek 30. 6. 2023	520	214	192	188	416	407



Příloha č. 2: Denní počty odletů a příletů zahrnutých v práci a podle statistik EUROCONTROL

Datum	Vlastní práce		IFR statistiky EUROCONTROL (data od provozovatele letiště)		Pokrytí odletů (%)	Pokrytí příletů (%)
	Počet odletů	Počet příletů	Počet odletů	Počet příletů		
Sobota 17. 6. 2023	167	158	173	164	96,53	96,34
Neděle 18. 6. 2023	181	196	185	201	97,84	97,51
Pondělí 19. 6. 2023	177	177	190	189	93,16	93,65
Úterý 20. 6. 2023	168	167	174	178	96,55	93,82
Středa 21. 6. 2023	185	176	190	179	97,37	98,32
Čtvrtek 22. 6. 2023	187	185	198	200	94,44	92,50
Pátek 23. 6. 2023	195	183	199	196	97,99	93,37
Sobota 24. 6. 2023	165	164	170	172	97,06	95,35
Neděle 25. 6. 2023	184	196	192	205	95,83	95,61
Pondělí 26. 6. 2023	186	184	194	194	95,88	94,85
Úterý 27. 6. 2023	170	163	177	173	96,05	94,22
Středa 28. 6. 2023	188	185	194	186	96,91	99,46
Čtvrtek 29. 6. 2023	190	195	197	205	96,45	95,12
Pátek 30. 6. 2023	209	198	218	212	95,87	93,40
				Průměr:	96,28	95,25