



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy

Vliv řízení letového provozu na efektivitu letu ve fázi přiblížení
Influence of Air Traffic Control on Flight Efficiency in the Approach Phase

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Ing. Terézia Pilmannová, MBA

Bc. Erik Ingeduld

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Erik Ingeduld

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Vliv řízení letového provozu na efektivitu letu ve fázi přiblížení**

Název tématu (anglicky): Influence of Air Traffic Control on Flight Efficiency in the Approach Phase

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je analyzovat a zhodnotit vliv řízení rychlosti ze strany Air Traffic Control na spotřebu paliva a dobu letu a identifikovat klíčové prvky pro snížení těchto parametrů v TMA Praha.
- Analyzujte faktory mající vliv na efektivitu letu na přiblížení v souvislosti s řízením rychlosti jak z pohledu ŘLP, tak z pohledu leteckého dopravce pro různé postupy na přiblížení.
- Navrhnete scénáře, na základě kterých vliv řízení rychlosti v různých scénářích, na příkladu letounu A320 otestujete.
- Provedte simulaci scénářů na simulátoru A320 a v prostředí simulátoru ATC Escape light.
- Výsledky z obou simulátoru porovnejte, zhodnotte parametry spotřeby paliva a dobu letu (flight time) pro jednotlivé postupy.
- Stanovte limitace experimentu a výsledky diskutujte.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: PANS-ATC Doc. 4444
European Route Network Improvement Plan (ERNIP) -
Part 1, Eurocontrol
ICAO Doc. 8168
Base of aircraft data, Eurocontrol

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Terézia Pilmannová, MBA**

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**
(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 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia
a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Erik Ingeduld
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....15. července 2022

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce paní Ing. Terézii Pilmannové, MBA společně s panem Stanislavem Schmidtem za odborné vedení, cenné rady, konzultace a metodické vedení práce. Zároveň bych také poděkoval své rodině za podporu během celého studia. Nakonec bych touto formou poděkoval řídícím letového provozu, kteří ve svém volném čase vyplnili elektronický dotazník, který byl nezbytnou součástí této práce.

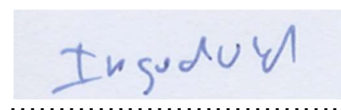
Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou 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.

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. 5. 2023



.....
Erik Ingeduld

Abstrakt

Tlak na ekonomičnost a zároveň minimalizaci dopadu letového provozu na životní prostředí je hlavní motivací pro neustálou optimalizaci letových postupů nejen z pohledu poskytovatele letových navigačních služeb, ale také z pohledu dopravce. Poskytovatelé Leteckých navigačních služeb (LNS) se tomuto tlaku snaží dostát optimalizací letových postupů v koncové řízené oblasti (TMA), kde je vliv letového provozu nejmarkantnější. Letecké společnosti pro ekonomičnost letu určují tzv. cost index, kde řeší poměr doby letu a spotřeby paliva pro jednotlivé linky. Cílem této práce je analyzovat a zhodnotit vliv řízení rychlosti ze strany řízení letového provozu (ATC) na spotřebu paliva a dobu letu na příkladu letounu A320.

Klíčová slova

Řízení letového provozu, ATC, řídící letového provozu, ATCO, řízení rychlosti, simulace letu, A320, Escape ATC, BADA

Abstract

Economy of air-traffic management and minimisation of its impact on environment are of paramount importance to both air navigation services and airline carriers. Air navigation service providers continuously seek for innovative approaches to the flight control procedures at the terminal control area where the impact of air traffic is significant. Airline carries in regard of minimizing costs and improving the overall flight economics provide cost index that defines the relation between the flight duration, in terms of a nominal speed profile, and fuel consumption. The goal of this diploma thesis is to analyse impact of ATC speed control procedures on the flight during approach phase, subsequent fuel consumptions and flight duration. The Airbus A320 airliner was used in the computer assisted flight simulations.

Key words

Air Traffic Control, ATC, Air speed control Officer, ATCO, speed control, flight simulation, A320, Escape ATC, BADA

Obsah

Seznam použitých zkratk	6
Úvod	8
1 Teorie a analýza současného stavu	9
1.1 Postupy řízení letového provozu (ATC)	10
1.1.1 Standardní postupy	10
1.1.2 Jiné než standardní postupy	12
1.2 Faktory mající vliv na efektivitu letu během přiletu a přiblížení	13
1.3 Řízení rychlosti (speed control)	13
Výcvik ATCO	15
1.3.1 Praxe řízení rychlosti v TMA Praha	16
1.4 Optimální rychlostní profil ze strany provozovatele	17
1.4.1 Cost index	17
1.5 Optimální profil klesání a přiblížení	19
1.5.1 Profil klesání letounu A320	19
1.6 Systém BADA	21
1.7 Současný stav studií	21
1.7.1 Projekt DYNCAT	22
1.8 Limitace současného stavu	22
2 Metodika	23
2.1 Dotazníkové šetření	23
2.1.1 Popis otázek	24
2.1.2 Popis odpovědí	26
2.1.3 Vyhodnocení určitých otázek na základě seniority	31
2.2 Stanovení scénářů	32
2.3 Scénáře	33
2.3.1 Popis příletové tratě	34
2.3.2 Popis přiblížení	35
2.3.3 Scénář 1	36

2.3.4	Scénář 2.....	36
2.3.5	Scénář 3.....	36
3	Simulace-experiment.....	39
3.1	Simulátory	39
3.1.1	Simulátor Airbus A320.....	39
3.1.2	Simulátor ATC Escape Light	41
3.1.3	Výkonnostní model BADA	41
3.2	Sběr dat	43
3.2.1	Kolekce a vyhodnocení dat	44
4	Prezentace výsledků	49
4.1	Výsledky simulací ze simulátoru A320	49
4.1.1	Porovnání výsledků simulací ze simulátoru A320.....	56
4.2	Výsledky simulací z Escape ATC	59
4.3	Výsledky simulací z databáze BADA.....	60
4.4	Porovnání simulačních prostředků	63
5	Diskuse	65
6	Závěr.....	66
	Zdroje.....	67

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam	Český překlad
ALT	Altitude	Výška nad mořem
ANS	Air Navigation Service	Letecké navigační služba
APCH	Approach	Přiblížení
APP	Approach Control Service	Přibližovací služba řízení
AoR	Area of Responsibility	Oblast odpovědnosti
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
ATCSMA	Air Traffic Control Surveillance Minimum Altitude	Mapa minimálních nadmořských výšek pro poskytování přehledových služeb ATC
ATCO	Air Traffic Control Officer	Řídící letového provozu
ATM	Air Traffic Management	Management toku letového provozu (ATM)
BADA	Base of Aircraft Data	
CTR	Control Zone	Řízený okrsek
DME	Distance Measuring Equipment	Měřic vzdálenosti
DYNCAT	Dynamic Configuration Adjustment in TMA	Dynamická úprava konfigurace letadla v TMA
ECAC	European Civil Aviation Conference	Evropská konference civilního letectví
FAF	Final Approach Fix	Fix konečného přiblížení
FL	Flight level	Letová hladina
FMC	Flight Management Computer	Počítač pro řízení a optimalizaci letu
FMS	Flight Management System	Systém pro řízení a optimalizaci letu
HDG	Heading	Kurz
IAF	Initial Approach Fix	Fix počátečního přiblížení
IAS	Indicated Airspeed	Indikovaná vzdušná rychlost
IF	Intermediate Approach Fix	Fix středního přiblížení
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla pro let podle přístrojů
ILS	Instrument Landing System	Systém pro přesné přiblížení a přistání
ISA	International Standard Atmosphere	Mezinárodní standardní atmosféra
KIAS	Knots Indicated Airspeed	Indikovaná vzdušná rychlost v uzlech
KT	Knot	Uzel
LNS	Air Navigation Service	Letecká navigační služba

NM	Nautical Mile	Námořní míle
MEA	Minimum En-route Altitude	Minimální nadmořská výška na trati
RNAV	Area Navigation	Prostorová navigace
SID	Standard Instrument Departure	Standardní přístrojový odlet
SARPs	Standards And Recommended Practices (ICAO)	Standardy a Doporučené postupy (ICAO)
SES	Single European Sky	Jednotného evropské nebe
SESAR	Single European Sky ATM Research	Součást iniciativy Jednotného evropského nebe
STAR	Standard Instrument Arrival	Standardní přístrojový přilet
TMA	Terminal Control Area	Koncová řízená oblast
T/D, TOD	Top of Descent	Vrchol (začátek) klesání

Úvod

Stále se rozvíjející letecká doprava se dostává do konfliktu se všeobecnou snahou o snižování dopadu lidské činnosti na životní prostředí. V rámci prosazování cílů evropské politiky v této oblasti se ocitá letecká doprava v hledáčku coby producent významné části emisí. Zároveň narůstá tlak spotřebitelů na ceny letenek, dobu přepravy a hustotu spojů. To vše směřuje ke snižování spotřeby paliva a doby letu, tedy ke snižování provozních nákladů leteckých společností a zároveň snižování produkovaných emisí.

V poslední době byla učiněna řada kroků a opatření, které mají za cíl minimalizovat dopady hustého provozu na životní prostředí, zpoždění letů a náročnost na zajištění minimálních rozstupů mezi letadly.

Díky modernějším navigačním prostředkům umožňující prostorovou navigaci (RNAV) je v dnešní době možné vést letové tratě i mimo pokrytí konvenčních navigačních prostředků. Moderní letové tratě tak mohou být více přímé a k jejich vytyčení není nutné zřizovat pozemní navigační prostředky. Požadavek na vybavení RNAV má dnes většina ATC tratí i vzdušných prostorů [24]. Navíc se dnes v Evropě na území stále většího počtu států uplatňuje koncept Free Route Airspace (FRA), který umožňuje volné plánování trasy mezi definovaným vstupním a výstupním bodem bez nutnosti použití sítě stávajících ATS tratí.

Při vysoké hustotě provozu se dříve stávalo, že se do určitého vzdušného prostoru potřebovalo dostat více letadel, než je jeho kapacita a muselo tak daný prostor obléhat nebo před prostorem vyčkávat, než budou do prostoru vpuštěna. Tento problém je řešen mj. organizací EUROCONTROL v rámci systému Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM), který koordinuje časy vzletů letadel ze zúčastněných letišť takovým způsobem, aby mohla po vzletu dokončit let bez dalších zpoždění. Posádky letadel dostávají časy (sloty) spuštění motorů, začátku pojiždění a vzletu v tzv. slotové koordinaci [13].

V důsledku vysoké hustoty provozu jsou poskytovatelé letových navigačních služeb (ANSPs) nuceni vytvářet stále komplikovanější letové tratě, které zajišťují dostatečné rozstupy od okolních tratí, jsou v souladu s místními protihlukovými požadavky a v neposlední řadě usnadní řízení letového provozu (ATC) řídit horizontální a vertikální rozstupy mezi letadly. V okolí rušných letišť tak často vznikají tratě, které nejsou zdaleka efektivní s ohledem na optimální profil letu konkrétních dopravních letounů [21].

Stanoviště řízení letového provozu (ATC) mají za úkol řídit a zajistit tok letadel, tak aby byl plynulý, aby byla minimalizována zpoždění a byly dodrženy minimální rozstupy mezi letadly dané předpisem. Tyto požadavky jsou nejzřetelnější zejména na příletu a přiblížení, kde je nutno poskytnout adekvátní sekvencování letadel. To je v této fázi letu dosaženo omezováním

dopředné rychlosti letadel, případně změnou příletové trasy např. zkracováním na určité body anebo radarovým vektorováním. Uvedené postupy ATC mají vliv na dobu letu a množství spotřebovaného paliva.

Cílem této diplomové práce je analyzovat a zhodnotit vliv řízení rychlosti ze strany Air Traffic Control na spotřebu paliva a dobu letu a identifikovat klíčové prvky pro snížení těchto parametrů v TMA Praha.

V rámci zpracování tohoto úkolu byly nejprve analyzovány faktory mající vliv na efektivitu letu ve fázi přiblížení v souvislosti s řízením rychlosti, jak z pohledu ŘLP, tak z pohledu leteckého dopravce. Bylo provedeno také dotazníkové šetření, které vedlo k lepšímu pochopení pracovních postupů a strategií rozhodování řídicích letového provozu. Tato část úkolu je popsána v kapitolách „Teorie a analýza současného stavu“ a „Metodika“.

Dále byly navrženy scénáře, na základě kterých, byl vliv rozdílných způsobů řízení rychlosti otestován na simulátoru Ústavu Letecké Dopravy (ÚLD). Experiment (simulace scénářů) byl proveden na letounu A320, v prostředí simulátoru Escape ATC Light a s využitím databáze BADA. Výsledky simulací byly porovnány a vyhodnoceny pro parametry spotřeby paliva a doby letu (flight time) pro jednotlivé scénáře. Tato část práce je uvedena v kapitolách „Metodika“, „Simulace-experiment“, „Prezentace výsledků“ a „Diskuse“.

1 Teorie a analýza současného stavu

Vliv na reálné řízení dopředné rychlosti letadel ve fázi přiblížení mají systémy řízení a postupy ATC, postupy a systémy provozovatelů, dále systémy modelování na vyšší úrovni řízení, ale také povětrnostní podmínky a další nepredikovatelné faktory (havárie, stávky apod.). Způsob řízení stran konkrétního ATC a provozovatele ovlivňují přímo také individuality, tzn. jednotliví řídící letového provozu a piloti.

Za současného stavu je řízení dopředné rychlosti provozováno na základě standardních stanovených postupů ATC, interního dokumentu (a know-how) ze strany řízení letového provozu a ze strany provozovatele se opírá o ekonomické ukazatele (a cíle společnosti) (Cost index).

Jak již bylo řečeno v úvodu, letecká doprava se v dnešní době potýká s řadou problémů (vytíženost, náklady, emise, hluk atd.), které vyzývají ke snižování spotřeby paliva a doby letu. Konkrétní faktory mající vliv na efektivitu letu (doba, spotřeba) budou, jak se strany ATC, tak ze strany provozovatele (letecké společnosti) podrobněji popsány v této kapitole.

Environmentální podmínky a další faktory pro řízení rychlosti nejsou předmětem posouzení v této práci.

K predikci výkonnostních parametrů letadel je využíván systém BADA, což je výkonnostní databáze, která umí simulovat vertikální profily trajektorie letadel [17]. Systém BADA byl také použit pro simulace scénářů klesání v praktické části práce (viz kapitola 3.1.3).

1.1 Postupy řízení letového provozu (ATC)

V této kapitole jsou uvedeny postupy řízení letového provozu (ATC) na přeletu a přiblížení. Postupy řízení letového provozu pro fázi přeletu a přiblížení jsou zavedeny pro bezpečné vedení letadel od cestovního letu k přistání na dráze s ohledem na požadavky ATC a minimální dopad na životní prostředí. V České republice, kde se nachází zkoumané oblasti TMA a CTR Praha, se problematikou z legislativního hlediska zabývají předpisy L 4444 (Postupy pro letové navigační služby) a L 8168 (Provoz letadel), ve kterých najdeme více informací postupech ATC a posádek letadel [15], [16].

Tato práce se zabývá provozem dopravních letadel v obchodní letecké dopravě (CAT), která jsou z pravidla provozována podle pravidel letu podle přístrojů (IFR). Směrové (laterální) vedení letadla ve fázi přeletu IFR je zajištěno tratěmi Standardních přístrojových přiletů (STAR) a tratěmi přiblížení. Součástí tratí jsou vertikální omezení ve smyslu nejnižší traťové výšky letu. Traťe jsou vytvořeny s ohledem na rozstupy od překážek (OC), dalších standardních tratí a s ohledem na hluková omezení. Traťe a postupy s nimi spojené jsou publikovány leteckou informační službou (AIM) ČR.

1.1.1 Standardní postupy

Standardní postupy předpokládají, že všechny motory letadla pracují. Za stanovení postupů pro nenadálé situace (vysazení motoru apod) je zodpovědný provozovatel [16]. Pro konstrukci tratí s ohledem na rozstup od překážek (OC) platí rychlostní omezení pro skupiny letadel závislé na jejich kategorii A–E (viz Tabulka 1). Kategorie třídí letouny do skupin na základě indikované rychlosti nad prahem dráhy. Zkoumaný letoun typu Airbus A320-200 spadá do kategorie C a platí pro něj zvýrazněné hodnoty v tabulce (viz Tabulka 1).

Tabulka 1: Rozsah rychlostí letadel pro postupy přiblížení. Zdroj: Předpis L 8168

Kategorie letadel	v_{at}	Rozsah rychlostní pro		Maximální rychlosti pro		
		počáteční přiblížení	konečné přiblížení	vizuální manévrování	Nezdařilé přiblížení středí	Nezdařilé přiblížení konečné
A	<91	90-150 (110*)	70-100	100	100	100
B	91-120	120-180 (140*)	85-130	135	130	150
C	121-140	160-240	115-160	180	160	240
D	141-165	185-250	130-185	205	185	265
E	166/210	185-250	155-230	240	230	275
*maximální rychlosti pro postupy „racetrack“ a „reversal“ (viz předpis L 8168)						

Součástí tratě STAR bývají v přilehlých prostorech zejména rušných letišť i další omezení, která vyplývají z přísnějších požadavků na snižování hluku, zajištění rozstupů letadel na jednotlivých ATC tratích a OC pomocí stanovených výškových a rychlostních omezení na vybraných traťových bodech.

Tato omezení jsou stanovená navíc k omezením nebo místo omezení vyplývajících z kategorie letadla. V České republice (FIR PRAHA) je dále k pravidlům stanovenými v předpise L 8168 přidáné omezení maximální rychlosti 210 KIAS po přeletění fixu počátečního přiblížení (IAF), který se nachází v koncové řízené oblasti (TMA) nebo řízeném okrsku (CTR) vyplývající z Letové informační příručky (AIP) v sekci ENR, kapitole 1.5.2 [1].

Tratě STAR a tratě přístrojových přiblížení jsou publikovány v AIP sekci AD pro všechna přístrojová letiště. V této práci jsou používány mapové podklady do firmy Jeppesen, pro jejich přehlednost a dostupnost pro ostatní světová letiště s přístrojovým přiblížením.

V mapových podkladech, které jsou používány v metodice této práce (viz kap. 2) jsou uváděny tyto hlavní informace o výškách, vzdálenostech a rychlostech: Výšky jsou interpretovány třemi možnými způsoby – jako letové hladiny (FL) uváděny po stovkách stop (tzn. FL100 = 10 000 ft) při nastavení standardního tlaku (viz pravidla pro nastavení výškoměru AIP ENR 1.7); jako výšky nad mořem (ALT) uváděny celým číslem ve stopách (např.: 4000) nebo ve stovkách stop (např.: A040); nebo jako výšky nad zemí (AGL) ve stopách (např.: 1000 AGL). Vzdálenosti jsou značeny zpravidla uprostřed tratě v námořních mílích. Rychlosti jsou značeny buď Machovým číslem (např.: M 0,8) nebo údajem indikované rychlosti v uzlech (KT, KIAS) (např.: 220 KT).

1.1.2 Jiné než standardní postupy

Radarové vektorování

Mezi postupy, které jsou hojně využívány na letištích s radarovým pokrytím, patří radarové vektorování (dále vektorování). Jedná se o postup poskytování navigačního vedení letadlům přesně stanovenými kurzy pomocí radaru. Při radarovém vektorování je za rozstup od překážek (OC) zodpovědný řídicí letového provozu (ATCO). Radarové vektorování se uskutečňuje tím, že se pilotovi vydávají určité kurzy (HDG), které letadlu umožní udržovat požadovanou trať [9],[15].

Ve fázi přiblížení se vektorování využívá pro navigaci letadel do polohy, ze které mohou zahájit konečné přiblížení – naletět maják přesného přístrojového přiblížení a přistání ILS (Instrument Landing System), naletět trať konečného přiblížení nebo pokračovat vizuálním přiblížením [6].

Pomocí radarového vektorování je možné dynamicky upravit trajektorii letadla. Je jí tak možné prodloužit, či zkrátit. Postup je často používán i pro zkracování trajektorie, tím se v důsledku zkrátí doba letu a může dojít k úspoře paliva. Je důležité zmínit, že postup radarového vektorování není standardizován a záleží na zkušenostech a dovednostech jednotlivých řídicích (ATCO). ATCO musí dodržovat minimální rozstupy od terénu, hranic řízeného prostoru a mezi letadly, jak je blíže popsáno v předpise L 4444 [15].

Přestože se nejedná o standardizovaný postup, jsou zjevné jeho výhody mající vliv na dynamiku provozu. Řídicí letového provozu (ATCO) může ovládat rozstupy mezi letadly vydáváním vhodných kurzů ve vhodnou dobu. Důkazem je vedení tratě STAR na Ruzyňském letišti, které končí příkazem pokračovat dosavadním směrem a očekávat vektorování (AIP AD 2-LKPR) [1].

Řídicí (ATCO) zajišťují kromě vektorování rozstupy letadel i pomocí tzv. řízení rychlosti (speed control). Omezení jsou posádce vydávána ATCO a může se jednat o konkrétní rychlostní údaj, požadavek o zpomalení o určitou hodnotu nebo snížení rychlosti pod/zvýšení rychlosti nad určitou hodnotu. Řízením rychlosti se podrobněji zabývá kapitola 1.3 této práce.

Na mnoha letištích je také možné provádět přiblížení vizuálně, kde pilot provede konečné přiblížení dle svého uvážení při viditelnosti vizuálních referenčních bodů. Tento postup je ovšem na letišti Ruzyně v Praze až na výjimky zakázaný (AIP AD 2-LKPR) [1].

1.2 Faktory mající vliv na efektivitu letu během přeletu a přiblížení

Tato kapitola je zaměřena na popis faktorů, které mají dopad na efektivitu letu. Pro účely této práce jsou uvažovány především následující dvě metriky pro porovnání efektivity mezi jednotlivými postupy/scénáři.

- Spotřeba paliva (fuel burn)
- Doba letu (flight time)

Na efektivitu letu během všech fází letu ale zejména během klesání má vliv řada faktorů, které jsou *predikované* jako například stanovení tzv. cost indexu (CI), postupy řízení letového provozu (ATC), anebo *nepredikované*, jako například vliv počasí a povětrnostních podmínek.

Optimální trajektorii a rychlosti letu stanovuje provozovatel na základě svých interních postupů cost indexu, který je vypočítán na základě provozních nákladů a nákladů na palivo (viz kap 1.4.1).

1.3 Řízení rychlosti (speed control)

Předmětem této kapitoly je podrobné seznámení postupů řízení dopředné letové rychlosti ze strany ATC.

Postupy řízení rychlosti (speed control) slouží k usnadnění řazení letadel do sledu nebo snížení potřeby vektorování. Řídící smí při splnění podmínek stanovených příslušným úřadem Letové provozní služby (ATS) požádat letadla, aby upravila rychlost určeným způsobem. Řízení rychlosti by se nemělo provádět u letadel na konečném přiblížení, která minula bod ve vzdálenosti 7 km (4 NM) od prahu dráhy (Předpis L 4444) [15].

Povolené fráze používané ATC pro řízení rychlosti jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 2). Zamýšlené použití prvků daných zpráv je blíže popsáno v předpise L 4444 v doplňku 5 [15].

Tabulka 2: Fráze zpráv o rychlosti

EXPECT SPEED CHANGE AT TIME (čas)	MAINTAIN (rychlost) OR LESS	RESUME NORMAL SPEED
EXPECT SPEED CHANGE AT (poloha)	MAINTAIN (rychlost) TO (rychlost)	NO SPEED RESTRICTION
EXPECT SPEED CHANGE AT (jedna hladina)	INCREASE SPEED TO (rychlost)	REPORT (druhy rychlostí) SPEED

MAINTAIN (rychlost)	INCREASE SPEED TO (rychlost) OR GREATER	CONFIRM ASSIGNED SPEED
MAINTAIN PRESENT SPEED	REDUCE SPEED TO (rychlost)	WHEN CAN YOU ACCEPT (rychlost)
MAINTAIN (rychlost) OR GREATER	REDUCE SPEED TO (rychlost) OR LESS	

Pro usnadnění bezpečného a spořádaného toku letového provozu, v závislosti na podmínkách stanovených příslušným úřadem civilního letectví (ÚCL), může být letadlu stanoveným způsobem nařízena úprava rychlosti. Letová posádka by měla být o plánovaném řízení rychlosti patřičně informována. Naopak letová posádka má povinnost informovat ATC, pokud není schopna pokyn k rychlosti splnit [15], [22].

V hladinách FL 250 nebo výše, by měly být úpravy rychlosti vyjádřeny v násobcích hodnoty 0,01 Mach a v hladinách pod FL 250 by měly být úpravy rychlosti vyjádřeny v násobcích hodnoty 10 uzlů (kt) na základě indikované vzdušné rychlosti (IAS). Přilétávajícímu letadlu může být nařízeno, aby udržovalo „maximální rychlost,“ „minimální rychlost v čisté konfiguraci,“ „minimální rychlost“ nebo stanovenou rychlost. Poznámka: „Minimální rychlost v čisté konfiguraci“ znamená minimální rychlost, při které letadlo letí v čisté konfiguraci, např. bez použití zařízení na zvýšení vztlaku, aerodynamických brzd nebo bez vysunutého podvozku [15], [22].

Přilétávajícímu letadlu by mělo být umožněno letět v čisté konfiguraci tak dlouho, jak je jen možné. Příkaz ke snížení rychlosti pod 220 kt je možné vydat posádkám proudových letadel pouze nachází-li se pod FL150. Rychlost 220 kt se za normálních okolností nachází blízko jejich pádové rychlosti [15].

Letová posádka musí dodržet publikovaná omezení rychlosti pro SID a STAR, pokud nebyla řídicím výslovně zrušena nebo změněna. Některá omezení rychlosti pro SID a STAR zajišťují kontrolu postupu odletu nebo přiletu RNAV (např. maximální rychlost na části úseku po oblouku s konstantním poloměrem do fixu (RF). Povolený rozsah rychlostí je definován v předpise L 8168 tabulkou pro výpočty postupů (viz Tabulka 1 na straně 11) [15].

Výcvik ATCO

Vzhledem k tomu, že způsob vykonávání činností ATCO má přímý vliv na předmět této diplomové práce, bylo důležité se v rešeršní části zaměřit i na program výcviku těchto pracovníků. Výcvik řídicích letového provozu zahrnuje souhrn teoretických kurzů, praktických cvičení včetně simulace a provozního výcviku potřebný k získání a zachování dovedností potřebných k bezpečnému, řádnému a plynulému poskytování služeb řízení letového provozu.

Výcvik se řídí pravidly Evropské směrnice, které jsou uvedeny v následujícím výčtu. Výcvik zahrnuje (dle ATCO.D.005 „Nařízení Komise (EU) 2015/340 ze dne 20. února 2015“) tyto druhy výcviku:

1. vstupní výcvik, který poskytuje
 - i) „základní výcvik“ s cílem poskytnout základní znalosti a praktické dovednosti související se základními provozními postupy
 - ii) „výcvik pro udělení kvalifikace“ s cílem poskytnout znalosti a praktické dovednosti související s konkrétní kvalifikací a případně doložkou ke kvalifikaci
2. místní výcvik, po jehož absolvování je vydán průkaz způsobilosti řídicího letového provozu, vydána doložka ke kvalifikaci, prodloužena platnost kvalifikace nebo doložky ke kvalifikaci a/nebo vydána či obnovena místní doložka. Zahrnuje tyto fáze:
 - iii) přechodové přípravy, jejímž cílem je především poskytnout znalosti provozních postupů specifických pro dané stanoviště
 - iv) provozního výcviku, která je konečnou fází místního výcviku
 - v) kromě podbodů i) a ii) se u místní doložky, která vyžaduje řízení situací se složitým a hustým letovým provozem, vyžaduje fáze předprovozního výcviku
3. průběžný výcvik s cílem zachovat platnost doložek k průkazu způsobilosti, který zahrnuje udržovací výcvik, případně přeškolovací výcvik.

Vstupní výcvik

Požadavky na vstupní výcvik (ATCO.D.010 Skladba vstupního výcviku) jsou uvedeny v dodatcích Přílohy I. „Nařízení Komise (EU) 2015/340 ze dne 20. února 2015“, konkrétně:

- 1) požadavky na základní výcvik zahrnující všechny předměty, témata a podtémata, které obsahuje dodatek 2 přílohy I.
- 2) požadavky na výcvik pro udělení kvalifikace – témata a podtémata jsou obsahem dodatků 3 až 8 přílohy I.

Místní výcvik

Místní výcvik (ATCO.D.045 Skladba místního výcviku) zahrnuje výcvikový kurz pro každou místní doložku stanovenou na daném stanovišti ATC, mimo jiné obsahuje výcvik v oblastech:

- 1) provozních postupů,
- 2) specifických prvků jednotlivých úkolů,
- 3) mimořádných a nouzových situací
- 4) lidských činitelů.

Předpis stanovující osnovu výcviku řídicích letového provozu (ATCO): EASA dokument *PART ATCO – Requirements For The Licensing Of Air Traffic Controllers* řízení rychlosti vysloveně nezmiňuje, ale tato tematika je předepsána požadavky na výcvik v dodatcích Přílohy I. „Nařízení Komise EU 2015/340“.

Místní výcvik je založen z velké části na principu výcviku On-The-Job (OTJ), který spočívá ve výcviku ATCO přímo na pracovišti pod dohledem zkušených instruktorů a hodnotitelů (podle ATCO.D.090 a 095).

Není předpisem stanoven jednotný postup k dosažení pravidel ohledně rozstupů letadel a každé stanoviště řízení letového provozu si své konkrétní postupy stanovují sami. Řídicí letového provozu (ATCO) se na stanovišti přiblížení řídí interními dokumenty a návody popisujícími doporučený postup aplikování řízení rychlosti.

1.3.1 Praxe řízení rychlosti v TMA Praha

V této kapitole budou přiblíženy konkrétní postupy řízení rychlosti ATC v TMA Praha přibližovací službou řízení. Následují informace obsažené v Letecké informační příručce AIP, které poskytují náhled do interních postupů řízení rychlosti na zmíněném stanovišti.

Předpokládané hodnoty rychlostních omezení při řízení rychlosti (speed control) v TMA Praha v AIP AD 2 – LKPR [1]:

- 220 KT v poloze po větru;
- 200 KT až 180 KT v poloze base leg/na posledním kurzu do LOC;
- 180 KT až 160 KT po usazení na LOC;
- následně 160 KT do 4 NM DME.

Všechna omezení rychlosti je třeba dodržovat s maximální tolerancí +/- 5 uzlů. Piloti jsou povinni vydaná omezení dodržovat a provádět úpravy rychlosti co nejrychleji. V případě, že nejsou schopni rychlostní omezení dodržet, musí tuto skutečnost oznámit ATC.

Význam následujících pojmů vychází z interní směrnice přibližovací služnou řízení (APP) Praha a jsou zde uvedeny v tabulce (viz Tabulka 3) po osobní konzultaci s řídicím letového provozu na stanovišti APP Praha.

Tabulka 3: Význam určitých frází pro řízení rychlosti na LKPR

Fráze	Význam
Resume normal speed	Vydaná omezení letoun smí pokračovat normálním rychlostním profilem
No ATC speed restriction	Fráze ruší rychlostí omezení vydaná ATC (v případě LKPR i limit 250 kt pod FL 100)
No speed restriction	Fráze ruší veškerá rychlostí omezení vydaná ATC, i rychlostní omezení vycházení z třídy vzdušného prostoru

Jelikož v současnosti neexistuje studie zabývající se postupy řízení rychlosti ATC v TMA/CTR Praha, bylo nutné zjistit informace o řízení rychlosti přímo od řídicích letového provozu pomocí elektronického dotazníku. Dotazník je popsán v metodice této práce v kapitole 2.1.

1.4 Optimální rychlostní profil ze strany provozovatele

Tato kapitola se zabývá rozbořem optimálního rychlostního profil letounu v klesání a přiblížení na přistání. Vertikální rychlostní profil letadla je stanoven výrobcem daného typu letadla a provozovatel ho může ovlivňovat pomocí nastavení hodnoty cost indexu (CI).

1.4.1 Cost index

Cost index je poměr mezi provozními náklady a cenou paliva. Letecké společnosti a výrobci se od 70 let minulého století začali zabývat možnostmi snižování množství spotřebovaného paliva. V některých případech hodnota na palivo představovala až 45 % nákladů na let, postupně se však zmenšila na cca. 20 %, z těchto důvodů hodnota Cost indexu vyjadřuje jako poměr mezi provozními náklady a cenou paliva. Systém pro řízení a optimalizaci letu (Flight Management Systém, FMS) využívající počítačové systémy (FMC) se začal používat od 80 let a umožňuje provádět výpočty v reálném čase, přispívá tak k optimalizace výkonu a snižování celkových nákladů na let, nejen spotřeby. Systém FMC obsahuje funkce pro stoupání, cestovní

režim, klesání a funkce pro různá omezení letu (výšky, čas přiletu, rychlosti) a pro minimální spotřebu paliva nebo minimální dobu letu [2].

Minimální hodnota Cost indexu je „0“, aktuální hodnota pro letouny Airbus v rozsahu 0 do 99 (nebo až 999) záleží na výrobci FMS. Pro Boeing platí hodnoty CI v rozsahu 0-500 (nebo také 200, 999, 9999) [5].

Jedná se o nejdůležitější faktor ovlivňující provozní náklady z pohledu provozovatele. Výpočet hodnoty Cost indexu popisuje rovnice č. 1 (Airbus, 1998), hodnota Cost indexu zahrnuje řadu proměnných nákladů:

$$C = C_F \cdot \Delta F + C_T \cdot \Delta T + C_C \quad (1)$$

kde:

- C_F je cena paliva v kg
- C_T jsou časově závislé náklady na minutu provozu
- C_C jsou fixní náklady nezávislé na čase
- ΔF je spotřebované palivo
- ΔT je letová doba

Pro optimalizaci hodnoty Cost indexu C anebo celkových nákladů na let je proto zapotřebí minimalizovat souhrn proměnných uvedených v rovnici č.2:

$$C_F \cdot \Delta F + C_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

Cenu paliva lze uvažovat neměnnou pro daný sektor a dobu letu. Cenový faktor τ lze popsat rovnicí č. 3:

$$\tau = C/C_F = \Delta F + C_T/C_F \cdot \Delta T, \quad (3)$$

kde $C_T/C_F = CI$ je Cost Index CI.

Náklady, které závisí na době letu (časově závislé náklady) jsou například:

- Hodinové výdaje na údržbu (bez nákladů na údržbu po cyklech)
- Náklady na letovou posádku
- Platy posádky
- Odpočinek posádky
- Efektivní využití posádek
- Amortizace, náklady na leasing
- Minuty nebo hodiny letu navíc
- Přesčasy, nespokojenost cestujících, nenavazující spoje, a podobně

Hodnoty CI některých dopravců obsluhující letiště Ruzyně v Praze letounem Airbus A320 jsou uvedeny v následující tabulce - Tabulka 4. Hodnota CI pro A320 společnosti Wizzair byla navíc ověřena podle skutečných provozních letových plánů (OFP) daného dopravce. Z prostudovaných OFP vychází globální nastavení CI = 15 pro letouny A320 a CI = 10 pro letouny A320Neo [26].

Tabulka 4: Hodnoty CI pro A320 vybraných leteckých společností. Zdroj: TOGA Projects, 2018

Název dopravce	Cost Index	Název dopravce	Cost Index
Air France	10	Eurowings	11
British Airways	15	Lufthansa	30
Easyjet	12	Wizzair	15

1.5 Optimální profil klesání a přiblížení

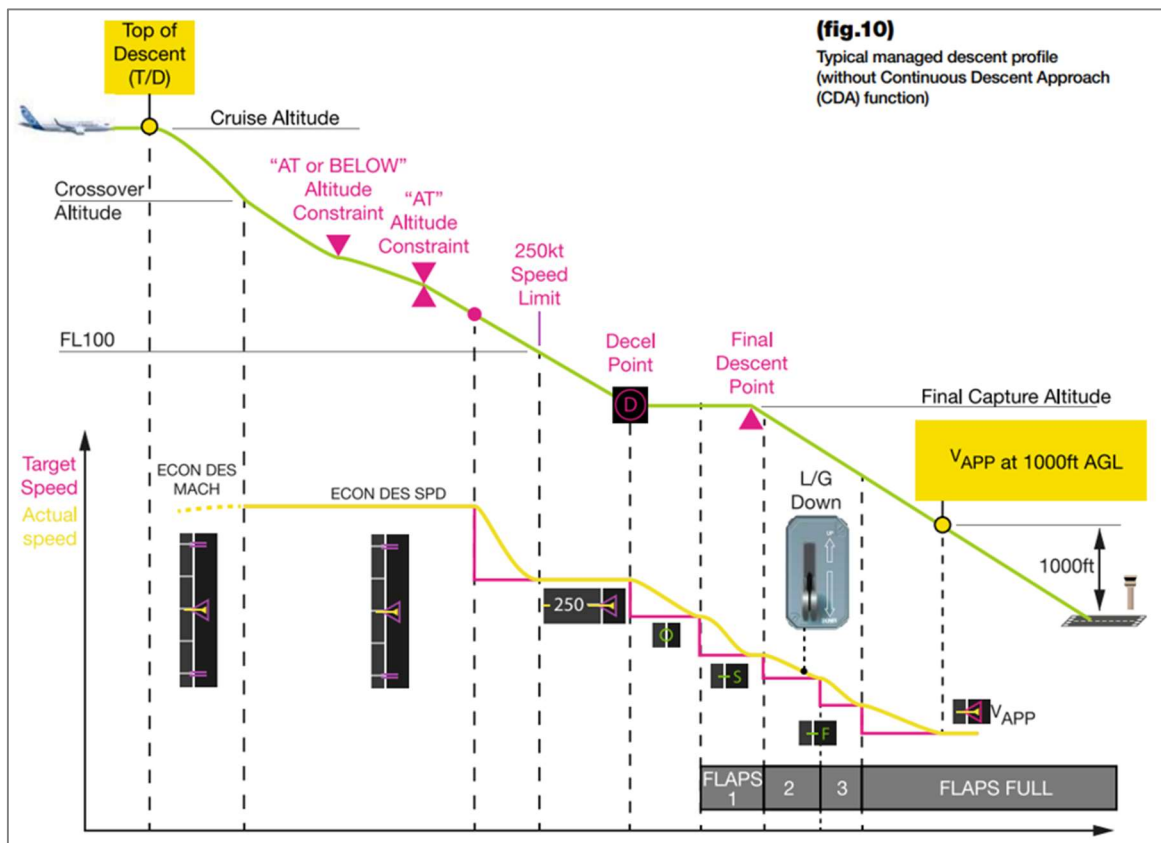
Následující kapitola objasňuje profil klesání na základě optimální křivky dané výrobcem letounu, který pracuje s parametry vložené do letadlového systému pro optimalizaci letu provozovatelem. Profil klesání je ovlivněn hodnotou CI, které je blíže popsána v kapitole 17.

1.5.1 Profil klesání letounu A320

Systém pro řízení a optimalizaci letu (FMS) na základě požadované hodnoty (vstupního) Cost Indexu (CI) určí nominální profil stoupání, rychlost letu v horizontu a profil klesání (také označován jako managed descent). Předmětem této práce je zkoumání ekonomiky letu během klesání a přiblížení. Pro tuto fázi letu je stanovený optimální sestupový profil viz. Obrázek 1.

Systém pro řízení a optimalizaci letu je nástroj, který pomáhá posádce řídit energii letounu během sestupu a přiblížení, vypočítává sestupový profil, optimální rychlosti ECON DES (případně manuální PERF DES), bere ohled na rychlostní a výšková omezení. FMS dále vypočítává bod začátku klesání (T/D) zpětně od bodu nezdařilého přiblížení, kde předpokládá, že letadlo bude splňovat stabilizovaná kritéria (rychlost v_{APP} 1000 ft nad dráhou), počítá s předem vyplněným předpovídaným větrem [3].

FMS systém na letounu A320 neumožňuje prozatím (2018) funkci tzv. kontinuálního sestupu, kde je eliminována fáze letu v horizontu, současně využívána pro snížení rychlosti na „green dot“ ~ minimum clean speed, vysunutí prvního stupně klapek a následně zpomalení na „S speed“. Horizontální část letu končí zachycením/naletěním sestupové roviny [3].



Obrázek 1: Optimální profil sestupu bez funkce CDA. Zdroj: Airbus]

System FMS s funkcí kontinuálního sestupu (CDA function) odstraní segment horizontálního letu mezi body „Decel Point“ a „Final Descent Point“ a umožní tím snížení spotřeby paliva a snížení vyprodukovaného hluku (nižší tah motorů než v horizontálním segmentu). FMS vygeneruje dva pseudo-body (pseudo waypoints), které ukazují místa, ve kterých by mělo dojít k vysunutí vzlakových klapek pro dosažení kritérií pro stabilizované přiblížení (v_{APP} ve výšce 1 000 ft AGL (nad zemí)). Tuto funkci mají v současné době systémy FMS v letounech A350 (v budoucnu bude možné mít tuto funkci i na letounech A320 a A330 od Release2 FMS standardů od Honeywellu).

Jak je patrné z obrázku výše (Obrázek 1), pro správný profil klesání je nutné, aby posádka v některých fázích letu provedla změnu konfigurace letounu (vysunutí klapek, podvozku) na které systém FMS následně reaguje. FMS obvykle obsahuje přednastavený limit 250 KIAS pod FL100.

Jak bylo zjištěno po osobní konzultaci s pilotem letounu A320, horizontální segment letu je v praxi redukován posádkou letounu na základě jejich zkušeností a odhadu v závislosti na povětrnostních podmínkách a znalosti místních zvyklostí řízení ATC.

1.6 Systém BADA

Systém BADA (Base of Aircraft Data) je systém vytvořený pro simulaci trajektorie letu a letových parametrů určitých typů letadel [17]. Jedná se o databázi parametrů popisujících letouny a prostředí, v němž se pohybují a také způsob, jak se pohybují. Tento systém, který slouží jako základ pro data o letadlech, vytvořil a spravuje agentura EUROCONTROL. Cílem systému BADA je realistická simulace a předpověď trajektorií pro výzkum a vývoj v řízení letového provozu ATM (Air Traffic Management) a strategické plánování pozemního provozu.

Jedním ze základních aktérů v ATM systému je letadlo. Pro simulaci realistické výkonnosti letadla se využívá model APM (Aircraft Performance Model). APM je vytvořen pro podporu přesných výpočtů geometrických, kinematických a kinetických aspektů chování letadel. Systém lze použít pro širokou řadu typů letadel, v rámci celé provozní letové obálky a ve všech fázích letu. Systém APM je koncipován s přiměřenou složitostí a s přiměřeným nárokem na výpočetní požadavky.

Systém BADA obsahuje dva modely, Aircraft Performance Model (APM) a Airline Procedure Model (ARPM). Tyto modely využívají charakteristiky letounů – soubory fyzikálních parametrů a koeficientů popisující vlastnosti letadel. Pro účely této diplomové práce byl využit tzv. kinetický model systému BADA [8].

Kinetický model BADA APM je založený na působení sil na hmotný bod, který má proměnlivou hmotnost v čase. Je tedy nutné modelovat i síly působící na letoun, aby bylo možné zjistit výsledný pohyb. Pro výpočet sil působících na letoun je zapotřebí uvažovat a) aerodynamický vztlak a aerodynamický odpor, b) tah motorů, a c) váhu. Jelikož BADA počítá s proměnlivou hmotností, kategorie pohonných akcí (tah motorů) uvažuje podpůrný model sloužící k výpočtu spotřeby paliva [25].

V současné době je k dispozici (nejnovější) verze systému BADA 4, která podporuje cca. 80 % všech typů letadel v oblasti ECAC. Předchozí verze systému, standardní model (BADA 3) pokrývá 100 % typů letadel, není ale tak přesná jako verze BADA 4 [11].

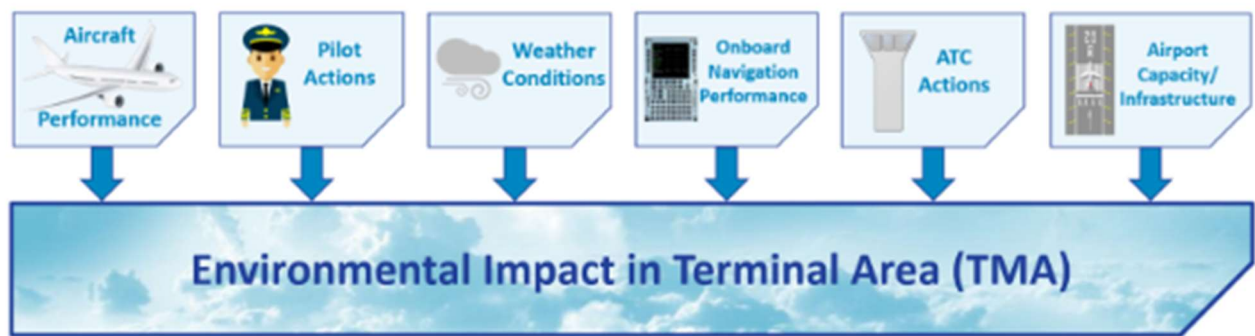
Systém BADA využívají především poskytovatelé řízení letového provozu (ANSP), dodavatelé součástí řízení letového provozu (ATM), ale také výzkumné ústavy a univerzity.

1.7 Současný stav studií

V současné době neexistují žádné významné studie zabývající se danou problematikou. Jediným zásadním projektem v této oblasti je DYN-CAT instituce SESAR zabývající se dynamickou konfigurací letounu v TMA.

1.7.1 Projekt DYNCAAT

Projekt DYNCAAT (Dynamic Configuration Adjustment in the TMA) je iniciativou výzkumné složky Jednotného evropského nebe (SESAR) zaměřenou na dynamickou konfiguraci letounů v koncové řízené oblasti (TMA). Cílem systému je navrhnout letové profily, které budou mít snáze předvídatelný profil a zároveň budou méně náročné na životní prostředí (SESAR. DYNCAAT. 2022). Je známou skutečností, že v blízkosti rušných letišť je provoz hlučnější méně efektivní (vyšší spotřeba paliva) než by bylo nutné. To je způsobeno tím, že tratě ATC v těchto případech obsahují fixní vertikální a rychlostní omezení. Úkolem DYNCAAT je tedy analyzovat nesoulad mezi postupy letadla a ATC, pomoci posádce s konfigurací na přiblížení, aby lépe zvládla omezení ATC a vlivy počasí, udat směr přibližovacích profilů, aby byly snadněji provozovatelné a méně náročné na životní prostředí. Projekt DYNCAAT byl zahájen v roce 2020, v současné době probíhá ověřovací fáze projektu, která je popsána mimo jiné výzkumnou zprávou [19].



Obrázek 2 Schéma systému DYNCAAT

Budoucnost projektu DYNCAAT popisuje zpráva *DYNCAAT D5.1 Advanced Continuous Descent Operations – Recommendations and Roadmap* [20]. Obsahuje zhodnocení dosavadního vývoje, shrnutí doporučení pro budoucí vývoj projektu a stanovení plánu dalšího výzkumu.

1.8 Limitace současného stavu

Dnes se jedná o oddělené koncepty (optimální profil letu z pohledu provozovatele a ATC), které spolu příliš nespolupracují. Postupy řízení rychlosti nejsou žádným jednotným předpisem přímo stanovené nebo nařízené. Často závisí na individuálních rozhodnutích, provozních zkušenostech a kvalitách jednotlivých pracovníků.

Cílem současné snahy odborníků je stávající postupy spolu harmonizovat pro zvýšení efektivity celého systému. Jedinou velkou studií v dané problematice je projekt DYNCAAT popsáný v předchozí kapitole.

2 Metodika

Metodika provedené práce spočívá v porovnání simulace přiletu a přiblížení třemi různými prostředky a zjištění reálných postupů v praxi na základě dotazníkového šetření mezi řídicími letového na stanovišti řízení letového provozu přiblížení (APP) Praha.

Součástí metodiky je sestavení scénářů řízení rychlosti tak, aby co nejvěrněji napodobovaly skutečné situace. Scénáře by měly být co nejvhodnější pro porovnání spotřeby paliva a vyhovovat rovněž porovnání dalších letových parametrů.

2.1 Dotazníkové šetření

Pro podrobnější pochopení postupů řízení rychlosti na stanovišti řízení letového provozu APP Praha bylo provedeno dotazníkové šetření, kterého se zúčastnilo 18 respondentů s praxí na stanovišti ATC APP v Praze. Řídicí letového provozu byli požádáni o vyplnění krátkého elektronického dotazníku, který se zabýval způsobem jejich strategie řízení rychlosti (speedcontrol) a formulací používaných frází. Příprava dotazníku spočívala ve výběru vhodných otázek tak, aby odpovědi ukázaly obvyklé postupy při řízení rychlosti ze strany řízení letového provozu v praxi na stanovišti APP Praha.

Elektronický dotazník byl vytvořen na platformě Google Forms dostupné z docs.google.com/forms a byl pomocí emailu rozeslán mezi řídicí letového provozu na stanovišti Přiblížení v Praze. Ukázka dotazníku je uvedena viz Obrázek 3.

Dotazník obsahuje celkem 10 otázek, a to otázky dvojího typu:

- 1) Otázky, kde je možnost výběru pouze jedné odpovědi. Tyto otázky se týkaly seniority řídicího a preferované fráze nebo pokynu.
- 2) Otázky se zaškrtačnými políčky, kde je možné vybrat zároveň více odpovědí. Do této kategorie patřily otázky týkající se spouštěcích faktorů vedoucích k řízení rychlosti a úseku, ve kterém respondent nejčastěji začíná s řízením rychlosti.

Řízení dopředné rychlosti letadel na přeletu a přiblížení v TMA Praha

Dotazník k diplomové práci, Erik Ingeduld, ČVUT Fakulta dopravní.

1. Jak dlouho přibližně pracujete jako řídící letového provozu na stanovišti Approach? *

Méně než 1 rok.

1 až 3 roky

3 až 5 let

5 a více let

2. Kdy nejčastěji začínáte s řízením dopředné rychlosti letadel?

Před vstupem do AoR

Na hranici AoR

Přibližně na bodu IAF

Na úrovni letiště, přibližně v poloze po větru

V ose dráhy, před bodem FAF

Obrázek 3: Ukázka formuláře google forms dotazníkového šetření

2.1.1 Popis otázek

V první otázce byli respondenti dotazováni na délku své pracovní zkušenosti na stanovišti přiblížení (APP Praha). Cílem bylo rozdělit respondenty, resp. jejich odpovědi do skupin „relevance“ na základě délky jejich pracovní zkušenosti.

Otázka č. 1: Jak dlouho přibližně pracujete jako řídící letového provozu na stanovišti Approach?

- *Méně než 1 rok,*
- *1 až 3 roky,*
- *3 až 5 let,*
- *5 a více let.*

Cílem druhé otázky bylo určení úseku, ve kterém řídící nejčastěji začíná s řízením dopředné rychlosti přilétávajících letadel. Respondenti měli na výběr mezi pěti možnostmi, počínaje úsekem před vstupem do oblastí odpovědnosti (AoR), až po polohu v ose dráhy před bodem FAF. Zde bylo možné zaškrtnout více než jednu odpověď.

Otázka č. 2: Kdy nejčastěji začínáte s řízením dopředné rychlosti letadel?

- Před vstupem do AoR,
- na hranici AoR,
- přibližně na bodu IAF,
- na úrovni letiště, přibližně v poloze po větru,
- v ose dráhy, před bodem FAF.

Následující tři otázky č. 3–5 byly zaměřeny na spouštěcí faktory, které vedou respondenta k zahájení řízení dopředné rychlosti. Otázky se týkaly faktorů v jednotlivých fázích přiletu letadla, od polohy před vstupem do AoR, po polohu za bodem IAF. Znění otázek je následující:

Otázka č. 3: Jaké jsou vaše spouštěcí faktory k zahájení řízení dopředné rychlosti před vstupem do vaší AoR prostřednictvím oblastního řídicího letového provozu?

Otázka č. 4: Jaké jsou vaše spouštěcí faktory k zahájení řízení dopředné rychlosti před bodem IAF?

Otázka č. 5: Jaké jsou vaše spouštěcí faktory k zahájení řízení rychlosti za bodem IAF?

Vzhledem k povaze uvedených otázek sdílely tyto otázky stejnou sadu odpovědí uvedených níže a bylo zde možné zaškrtnout více možností:

- Počasí – nepříznivý vítr,
- počasí – nepříznivé jevy (např.: bouřka, studená fronta),
- počasí – postupy za nízké dohlednosti,
- rozdílné typy letadel dle výkonnostních charakteristik,
- zvýšená hustota provozu,
- jiné provozní situace.

V otázkách č. 6 a 7 byli řídicí letového provozu dotazováni na preferenci způsobu omezení rychlosti v úseku před počátečním přiblížením a ve fázi počátečního a středního přiblížení. Cílem otázky bylo určit, zdali řídicí preferují snížení rychlosti o danou hodnotu nebo na danou hodnotu, a zdali tato preference závisí na poloze letadla. Jelikož se otázka týkala preference řídicího, bylo možné zaškrtnout pouze jednu z uvedených možností:

Otázka č. 6. Jaké rychlostní omezení preferujete před počátečním přiblížením?

- Pokyn snížení rychlosti o danou hodnotu (např.: 20 kt)
- Pokyn snížení rychlosti na danou hodnotu (např.: 220 kt)

Otázka č. 7. Jaké rychlostní omezení preferujete ve fázi počátečního a středního přiblížení?

- Pokyn snížení rychlosti o danou hodnotu (např.: 20 kt)
- Pokyn snížení rychlosti na danou hodnotu (např.: 220 kt)

V otázce č. 8 byli respondenti dotazováni, zdali k řízení dopředné rychlosti využívají pokyn „minimum clean speed“. V odpovědi bylo možné zvolit jednu z možností ano/ne.

Otázka č. 8: Využíváte pokynu „minimum clean speed“?

- *Ano,*
- *ne.*

Otázkou č. 9 bylo zjišťováno, zdali řídící preferují brzdění letounů přilétávajících z určitého směru, například z jedné ze světových stran. Zde bylo opět umožněno zvolit jednu z možností ano/ne.

Otázka č. 9: Preferujete brzdění letounů z jednoho směru (např.: světové strany)?

- *Ano,*
- *ne.*

Cílem poslední otázky č. 10 bylo zjistit využívání jedné z vybraných frází k řízení rychlosti. Tyto fráze mají buď letadlo zbavit rychlostního omezení, které mu bylo přiděleno, nebo osvobodit od jakýchkoli rychlostních omezení popsanych v příletových mapách a postupech. (viz kapitola 1.3.1). Mezi posádkami panuje podle řídících určitá nejasnost ve v jejich významu.

Zde bylo možné vybrat více odpovědí:

Otázka č. 10: Využíváte některé z následujících frází?

- *"No speed restriction"*
- *"No ATC speed restriction"*
- *"Resume normal speed"*

2.1.2 Popis odpovědí

Úkolem této kapitoly je představení výsledků ankety dotazníkového šetření, rozeslaného řídícím letového provozu. Jednotlivé otázky dotazníku, které byly popsány v předchozí kapitole, jsou vyhodnoceny a interpretovány v tabulkové podobě. Různé počty odpovědí mezi jednotlivými otázkami jsou patrné u otázek, kde bylo možné vybrat zároveň více odpovědí.

Dotazník byl vyplněn celkem 18 respondenty s různou mírou zkušeností na daném stanovišti řízení letového provozu. Většinou se jednalo o zkušené zaměstnance s praxí alespoň tří let.

Odpovědi na otázku č. 1 vypovídají o míře zkušenosti jednotlivých respondentů, viz Tabulka 5. Nejvíce respondentů (50 %) uvedlo největší zkušenosti (5 a více let), 7 (38,9 %) respondentů uvedlo zkušenosti mezi 3 až 5 lety. Zkušenosti 1-3 roky a méně než 1 rok uvedl vždy jeden respondent (5,6 %).

Tabulka 5: Seniorita řídicího letového provozu

Otázka č. 1	Jak dlouho přibližně pracujete jako řídicí letového provozu na stanovišti Approach?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	50 %	9	5 a více let
	38,9 %	7	3 až 5 let
	5,6 %	1	1 až 3 roky
5,6 %	1	Méně než 1 rok	

Z odpovědí na otázku č. 2 je patrné, že nejvíce řídicích (50 %) začíná s řízením dopředné rychlosti na hranici AoR (Area of Responsibility) a/nebo na úrovni letiště v pomyslné poloze „po větru“. Menší počet respondentů (16,7 %) také s řízením začíná už před vstupem do AoR a jeden respondent (5,6 %) vydává příkaz s rychlostním omezením přibližně v bodě IAF. Žádný respondent nezačíná s řízením rychlosti v ose dráhy nebo před bodem FAF. Přehled odpovědí dle četnosti je uveden následující tabulce (viz Tabulka 6).

Tabulka 6: Začátek řízení rychlosti

Otázka č. 2	Kdy nejčastěji začínáte s řízením dopředné rychlosti letadel?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	50 %	9	Na hranici AoR
	50 %	9	Na úrovni letiště, přibližně v poloze po větru
	16,7 %	3	Před vstupem do AoR
	5,6 %	1	Přibližně v poloze po větru
0 %	0	V ose dráhy, před bodem FAF	

Otázka č. 3 porovnává spouštěcí faktory před vstupem do AoR. Jak je patrné z tabulky odpovědí níže (viz Tabulka 7), všichni řídicí zvolili jako spouštěcí faktor zvýšenou hustotu provozu. Dále byly zastoupeny i odpovědi týkající se nepříznivých počasových jevů (38,9 %), postupů snížené viditelnosti (44,4 %) a rozdílných výkonnostních charakteristik přilétajících letounů (44,4 %). V důvodu nepříznivého větru by ve fázi letu před vstupem do AoR začali letadlo na rychlosti omezovat jen dva respondenti (11,1 %) a pět dotazovaných (27,8 %) zvolilo jako důvod jiné provozní situace.

Tabulka 7: Spouštěcí faktory před vstupem do AoR

Otázka č. 3	Jaké jsou Vaše spouštěcí faktory k zahájení řízení dopředné rychlosti před vstupem do Vaší AoR prostřednictvím oblastního řídicího letového provozu?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	100 %	18	Zvýšená hustota provozu
	44,4 %	8	Počasí – postupy za nízké dohlednosti
	44,4 %	8	Rozdílné typy letadel dle výkonnostních charakteristik
	38,9 %	7	Počasí – nepříznivé jevy
	27,7 %	5	Jiné provozní situace
	11,1 %	2	Počasí – nepříznivý vítr

Ve otázce č. 4, která porovnává spouštěcí faktory řízení rychlosti před bodem IAF, zůstává opět nejčastěji uváděn důvod zvýšené hustoty provozu (88,9 %). Větším počtem odpovědí (55,6 %) je zastoupen faktor rozdílných typů letadel podle výkonnosti, jiné provozní situace (22,2 %) a nepříznivý vítr (16,7 %). Pokles v počtu odpovědí zaznamenávají faktory počasí s ohledem na postupy LVO (38,9 %), nepříznivé jevy (33,3 %) a jiné provozní situace (22,2 %). Počet odpovědí a jejich procentuální zastoupení je uveden v následující tabulce – Tabulka 8.

Tabulka 8: Spouštěcí faktory před bodem IAF

Otázka č. 4	Jaké jsou Vaše spouštěcí faktory k zahájení řízení dopředné rychlosti před bodem IAF?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	100 %	18	Zvýšená hustota provozu
	44,4 %	8	Počasí – postupy za nízké dohlednosti
	44,4 %	8	Rozdílné typy letadel dle výkonnostních charakteristik
	38,9 %	7	Počasí – nepříznivé jevy
	27,7 %	5	Jiné provozní situace
	11,1 %	2	Počasí – nepříznivý vítr

Otázka č. 5 je zaměřena na spouštěcí faktory pro zahájení rychlosti po bodu IAF. Nejvíce (72,2 %) respondentů uvedlo za spouštěcí faktor hustotu provozu, 55,6 % respondentů uvedlo rozdílné typy letounů a 44,4 % uvedlo jiné provozní situace. Na spouštěcí faktory řízení

rychlosti ve fázi letu po bodu IAF, už nemají tak výrazný vliv jevy počasí a provoz LVO, počet odpovědí zde klesl na hodnoty mezi 16-27 %. Výsledky odpovědí jsou přehledně uvedeny v následující tabulce – Tabulka 9.

Tabulka 9: Spouštěcí faktory za bodem IAF

Otázka č. 5	Jaké jsou Vaše spouštěcí faktory k zahájení řízení rychlosti za bodem IAF?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	72,2 %	13	Zvýšená hustota provozu
	55,6 %	10	Rozdílné typy letadel dle výkonnostních charakteristik
	44,4 %	8	Jiné provozní situace
	27,8 %	5	Počasí – postupy za nízké dohlednosti
	22,2 %	4	Počasí – nepříznivý vítr
16,7 %	3	Počasí – nepříznivé jevy	

Vzhledem k výsledkům odpovědí na předchozí otázku č. 2, kdy bylo zjištěno, že řídící v Pražském TMA nemají tendenci zahajovat řízení rychlosti později než na úrovni letiště, nejsou odpovědi na otázku č. 5 z celkového pohledu na hodnocení dotazníkového šetření příliš významné.

Z odpovědí na otázky č. 6 a 7 (viz Tabulka 10 a Tabulka 11), zkoumající preferenci rychlostního omezení, bylo jednohlasně potvrzeno (100 % respondentů zvolilo stejnou možnost), že řídící preferují povel snížení rychlosti na danou hodnotu, oproti povelu o snížení rychlosti o určitý počet uzlů. Tato preference je patrná před počátečním přiblížením i ve fázi počátečního a středního přiblížení. Preference vychází pravděpodobně z učebních materiálů pro řídící letového provozu APP Praha a nastavení jejich interních postupů.

Tabulka 10: Preference omezení před počátečním přiblížením

Otázka č. 6	Jaké rychlostní omezení preferujete před počátečním přiblížením?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	100 %	18	Pokyn snížení rychlosti na danou hodnotu
	0 %	0	Pokyn snížení rychlosti o danou hodnotu

Tabulka 11: Preference omezení ve fázi počátečního a středního přiblížení

Otázka č. 7	Jaké rychlostní omezení preferujete ve fázi počátečního a středního přiblížení?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	100 %	18	Pokyn snížení rychlosti na danou hodnotu
	0 %	0	Pokyn snížení rychlosti o danou hodnotu

Odpovědi na otázku č. 8 byly podobně jako u předchozích dvou otázek jednohlasné. 100 % respondentů využívá k řízení dopředné rychlosti letadel pokynu „minimum clean speed“ (viz Tabulka 12: Využíváte pokynu "minimum clean speed"?).

Tabulka 12: Využíváte pokynu "minimum clean speed"?

Otázka č. 8	Využíváte pokynu „minimum clean speed?“		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	100 %	18	Ano
	0 %	0	Ne

Obdržené odpovědi na otázku č. 9, kde byli respondenti dotazováni na preferenci brzdění letadel z jednoho směru, vypovídají o tom, že většina řídících takovou preferenci nemá. 94,4 % respondentů uvedlo, že nepreferují brzdění letounů z jednoho směru – Tabulka 13. Jediný respondent, který vydává omezení rychlosti v závislosti na směru příletu je zároveň v kategorii nejdéle pracujícím řídícím, a to více jak 5 let.

Tabulka 13: Preference brzdění letounů z určitého směru

Otázka č. 9	Preferujete brzdění letounů z jednoho směru (např.: světové strany)?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	94,4 %	17	Ne
	5,6 %	1	Ano

Podle odpovědi na poslední otázku č. 10, dotazující se na užívání určitých frází, 100 % respondentů potvrdilo, že používají frázi „No speed restriction“, 38,9 % respondentů uvedlo i frázi „Resume normal speed“. Z odpovědí dále vyplynulo, že povel „No ATC speed restriction“ používá jen 22,2 % z dotazovaných (viz Tabulka 14).

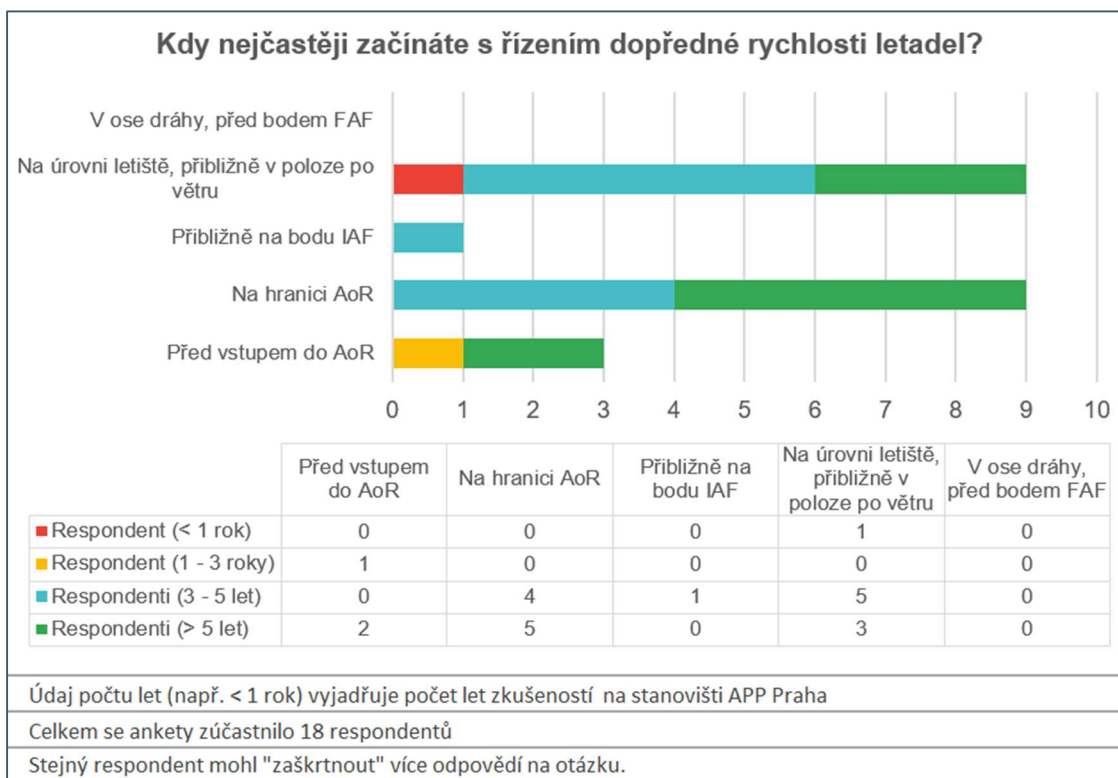
Tabulka 14: Užívání určitých frází

Otázka č. 10	Využíváte některé z následujících frází?		
	Odpovědi		
	Procentuální podíl	Počet	Znění
	100 %	18	<i>No speed restriction</i>
	38,9 %	7	<i>Resume normal speed</i>
	22,2 %	4	<i>No ATC speed restriction</i>

2.1.3 Vyhodnocení určitých otázek na základě seniority

Výsledky dotazníkového šetření lze prezentovat graficky s ohledem na míru zkušenosti (seniority) respondentů. Graf, který přehledně popisuje vztah odpovědí respondentů v závislosti na jejich pracovních zkušenostech na pozici řídicí letového provozu na stanovišti přiblížení je uveden viz Obrázek 4.

Bez ohledu na míru zkušenosti začínají řídicí s řízením dopředné rychlosti ve stejných fázích, a to na úrovni letiště (v poloze po větru) a na hranici AoR.



Obrázek 4 Ukázka grafického znázornění vlivu seniority na odpovědi na otázku dotazníku

Na základě výsledků z ankety bylo společně s informacemi obsaženými v Letecké informační příručce (AIP ENR 1.5.2 a AD 2 – LKPR 2.22.4.2) o rychlostních omezeních na přiletu a předpokládaných hodnot rychlostních omezení vypracováno schéma plného uplatnění řízení rychlosti v TMA a CTR Praha ATC stanovištěm APP. Schéma bylo konzultováno s laboratoří CNS/ATM na FD ČVUT v Praze a přidáno do mapy přiletu a přiblížení Jeppesen zobrazené na obrázcích (Obrázek 7 a Obrázek 8) na straně 38.

2.2 Stanovení scénářů

Scénáře přiletu a přiblížení v řízeném prostoru TMA Praha, které byly odzkoušeny užitím simulátoru letounu Airbus A320, simulátoru řízení letového provozu ATC Escape light a pomocí databáze BADA, byly stanoveny na základě výsledků dotazníkového šetření a odborné konzultace s laboratoří CNS/ATM na FD ČVUT v Praze. Nastavení letových parametrů a okolního prostředí je popsáno v následujícím odstavci.

Letové parametry

Výška letu v horizontu byla nastavena na FL150, která přibližně odpovídá výšce letadla klesajícího z cestovní výšky na bodu LOMKI. Hmotnost letounu byla nastavena na hodnotu 60

tun, která zhruba odpovídá skutečným hmotnostem letounů A320 přistávajících na letišti v Praze, jak bylo zjištěno z provozního letového plánu (OFP) společnosti Wizzair [26].

Počasí

Parametry počasí byly nastaveny pro podmínky standardní atmosféry ISA. Teplota na hladině moře nastavena na 15 °C a tlak na 1 013 hPa (29,92 inHg). Dohlednost nastavena na neomezenou bez žádných mraků (jasno).

- Teplota 15 °C na hladině moře
- Tlak 1013 hPa
- Dohlednost 10 a více kilometrů
- Žádná oblačnost (jasno)
- Podmínky na letišti odpovídající CAVOK

Příletová trať

Za trať příletu byla po konzultaci s Laboratoří CNS vybrána trať standardního přístrojového příletu STAR LOMKI 8S.

S ohledem na využití letového simulátoru A320 je zapotřebí zvolit místo vzletu a trať k dosažení bodu LOMKI za kterým začíná sledovaný úsek letu. Letiště Karlovy Vary bylo vybráno pro místo vzletu a jako trať odletu byla vybrána trať LOMKI 1F.

2.3 Scénáře

Simulace byla provedena na třech (3) scénářích, z nichž každý popisoval jeden z vybraných konceptů. Tyto scénáře lze stručně popsat následujícím způsobem:

- Scénář 1: Trať letu napřímena z bodu LOMKI na bod ERASU a ve vhodném čase zahájeno vektorování na 6NM finále
- Scénář 2: Optimální scénář s profilem letu podle FMS v letounu, bez zásahu ATC do trajektorie a rychlosti.
- Scénář 3: V tomto scénáři je plně uplatněno řízení dopředné rychlosti (speed control) dle interních provozních postupů.

Jednotlivé scénáře se navzájem odlišují řízením rychlosti letounu ve fázi klesání. V letěném scénáři 1 je rychlost konstantní (300 kt) před očekávaný začátek vektorování, poté letoun rovnoměrně zpomaluje. Udržování vysoké rychlosti je možné vzhledem k absenci rychlostního omezení 250 kt pod FL100.

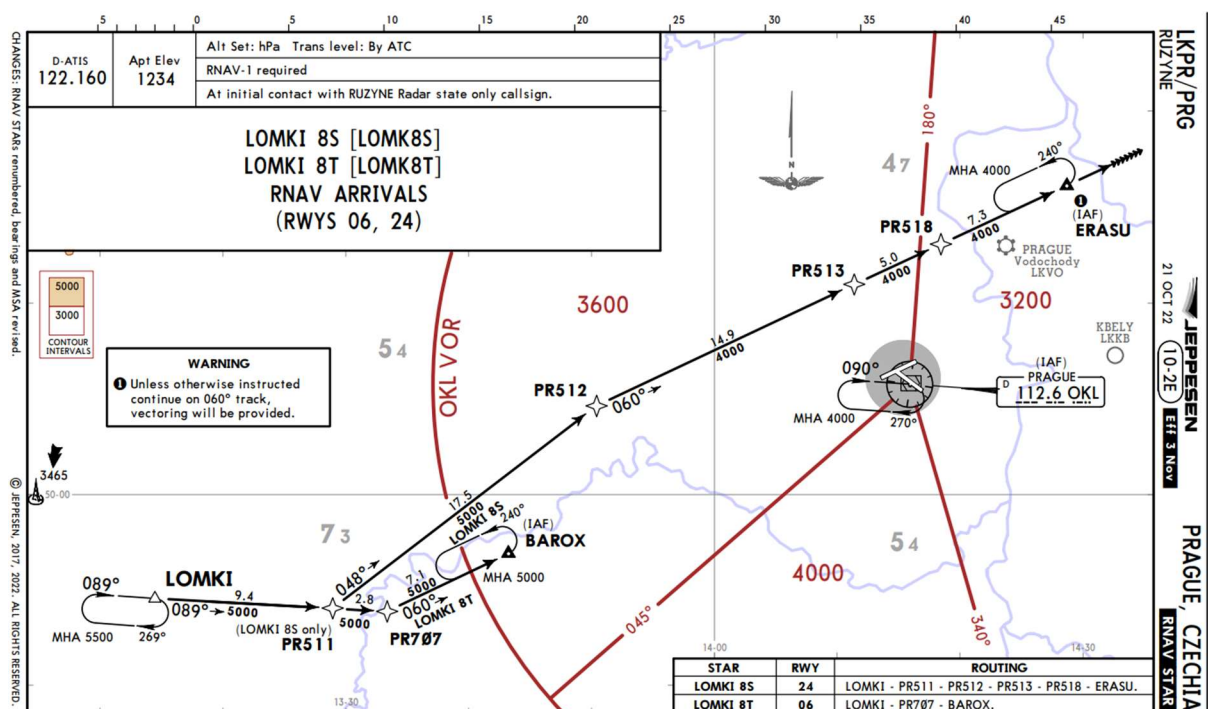
Naproti tomu ve scénáři 2 se rychlost mění v několika stupních. Před dosažením výšky FL100 letoun zpomaluje na rychlost 255 kt, aby splnil rychlostní omezení 250 kt ve FL100. Další

snížení rychlosti nastává před bodem ERASU, který se nachází ve vzdálenosti 22,8 NM od bodu CI24 letoun opět snižuje rychlost v rámci standardního rychlostního profilu pro přiblížení a přistání viz Obrázek 1 na straně 20.

Scénář č. 3 obsahuje snížení rychlosti na více místech podle instrukcí ATC. První zpomalení na rychlost 250 kt nastává na bodu LOMKI, další rychlostní omezení na rychlost 220 kt dostává letoun mezi body PR512 a PR513, dále zpomalení na minimální rychlost v čisté konfiguraci, zpomalení na 210 kt na bodu ERASU. Na přiblížení letoun dostává instrukce s omezením rychlosti na 180 kt v zatáčce na base leg a 160 kt po dotočení tratě konečného přiblížení.

2.3.1 Popis příletové tratě

Vedení tratě standardního přístrojového příletu (STAR) LOMKI 8S je uvedeno viz Obrázek 5 a sestává se z následujících bodů: LOMKI – PR511 – PR512 – PR513 – ERASU (IAF). Minimální traťová výška (MEA) mezi body LOMKI a PR512 činí 5 000 ft a dále od PR512 k bodu ERASU je snížena na 4000 ft. Symbolika používaná v mapách od Jeppesen je popsána v Jeppesen dokumentaci [14].



Obrázek 5: Mapa standardního přístrojového příletu LOMKI 8S. Zdroj: Jeppesen

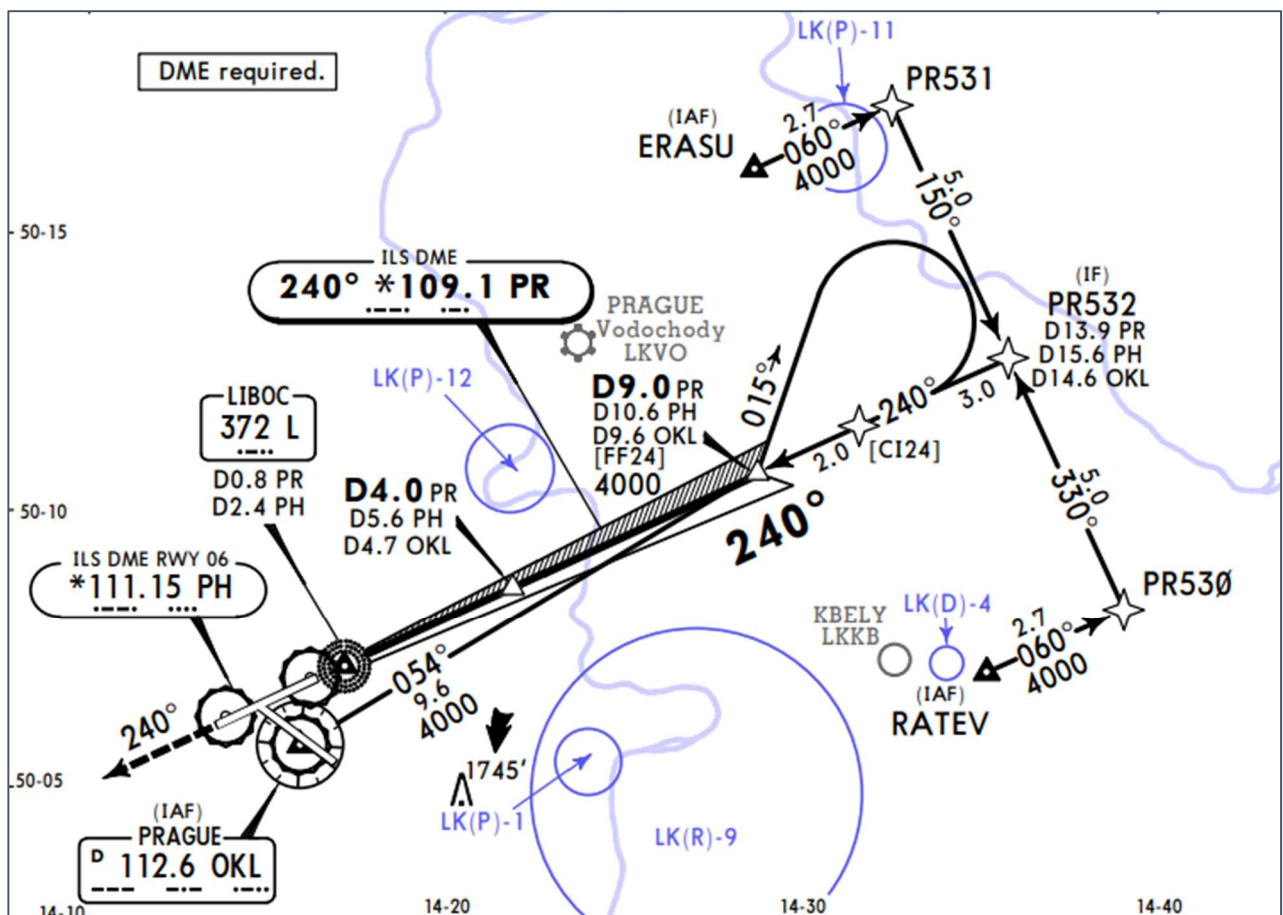
V prostoru TMA Praha a CTR Ruzyně, které se nacházejí ve třídě vzdušného prostoru C a D, je aplikováno rychlostní omezení 250 KIAS pod FL100, které je stanoveno leteckou informační příručkou AIP v sekci ENR 1.4.1 – Klasifikace vzdušného prostoru.

Dalším omezení vycházejícím z AIP sekce ENR 1.5.2.2 je, že velitelé letadel v TMA/CTR jsou povinni po přeletu IAF dodržovat maximální rychlost MAX IAS 210 KT, pokud ATC nestanoví jinak. Z toho plyne omezení dopředné rychlosti na 210 KIAS na bodu ERASU.

2.3.2 Popis přiblížení

Trať přiblížení ILS na dráhu 24 je definována body ERASU (IAF), dále bodem PR531 ve vzdálenosti 2,7 NM/trať 060°, bodem PR532 (IF) ve vzdálenosti 5,0 NM/trať 150° (13,9 DME PR). Fix konečného přiblížení (FAF) je definován ve vzdálenosti 9,0 DME PR ve výšce 4 000 ft. Následuje přesné přiblížení pomocí systému ILS s 3stupňovou sestupovou rovinou. Schéma tratě přiblížení je znázorněno na mapě viz Obrázek 5.

Na trase konečného přiblížení se vyskytují dva další body relevantní pro testované scénáře. Pro scénář č. 1 je relevantní bod 6,0 DME PR ve výšce 3 060 ft, jako pomyslný bod, na který je letadlo vektorováno pro naletění ILS a pro scénář č. 3 je relevantní bod 4,0 DME PR ve výšce 2 420 ft, kde je ukončen požadavek na omezení dopředné rychlosti (160 KIAS).



Obrázek 6: ILS RWY 24. Zdroj: Jeppesen

2.3.3 Scénář 1

Prvním scénářem je přilet na LKPR bez omezení rychlosti, ale s vektorováním¹ na přibližně 6 NM dlouhé konečné přiblížení.

Odlet z LKKV RWY 29 tratí SID na bod LOMKI se stoupáním do FL90. Po předání letu na stanoviště řízení APP Praha je vydáno povolení stoupat do cestovní hladiny FL150² a povolení po LOMKI pokračovat přímo na bod ERASU (IAF). Řízení letového provozu nabízí posádce vektorování na 6 NM dlouhé konečné přiblížení a povolení pokračovat bez omezení rychlosti, které posádka přijímá. Na úrovni letiště vydává APP Praha povolení na klesání do A040 s instrukcí pokračovat současným kurzem a informací o zahájení vektorování³ na ILS přiblížení dráhy 24. Ve vhodné dobu letadlo dostává instrukci ke změně kurzu na HDG 150 a povolení klesat do A030, následně HDG 180 a nakonec HDG 210 s povolením na ILS APCH RWY 24. Dále letadlo pokračuje v přiblížení pomocí ILS na dráhu 24.

2.3.4 Scénář 2

Druhým scénářem je přilet na LKPR po trati standardního přístrojového přiletu (STAR), bez napřímení a bez omezení rychlosti ze strany ATC.

Odlet z dráhy 29 z Karlových Varů LKKV tratí SID na bod LOMKI a stoupání do hladiny FL90. Po předání letu na stanoviště řízení APP Praha je vydáno povolení stoupat do cestovní hladiny FL150 a povolení pokračovat po STAR (LOMKI 8S) na bod ERASU (IAF), jak je publikováno v mapě standardního přiletu (viz Obrázek 5). Po přeletu bodu LOMKI, je povoleno klesání do FL130. Na úrovni letiště je povoleno klesání do výšky 4000 stop (A040) a povolení ILS APCH RWY 24, jak je publikováno v mapě přiblížení (viz. Obrázek 8).

2.3.5 Scénář 3

Posledním scénářem je přilet na LKPR po trati přístrojového přiblížení s aplikací řízení rychlosti.

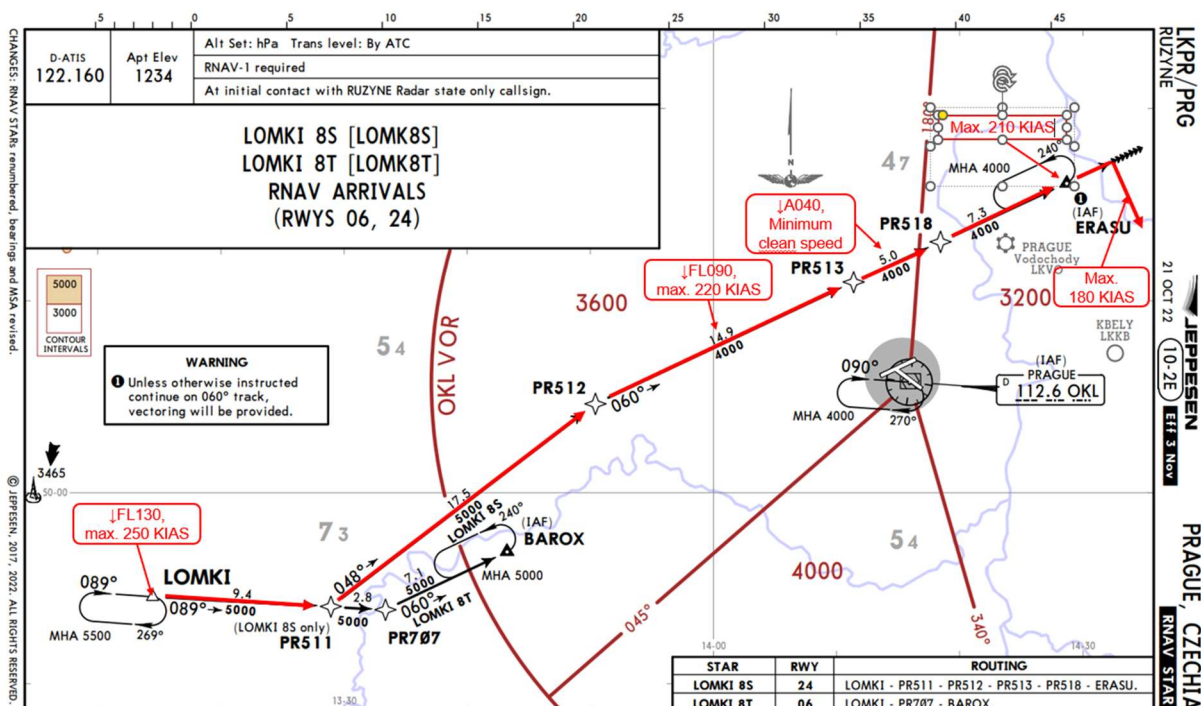
Odlet z LKKV je opět z dráhy RWY 29 tratí SID na bod LOMKI. Po předání letu na stanoviště řízení APP Praha je vydáno povolení stoupat do cestovní hladiny FL150. Po bodu LOMKI je

¹ Vektorování (vectoring) spočívá v poskytování navigačního vedení letadlům formou určených kurzů, založené na používání přehledového systému ATS

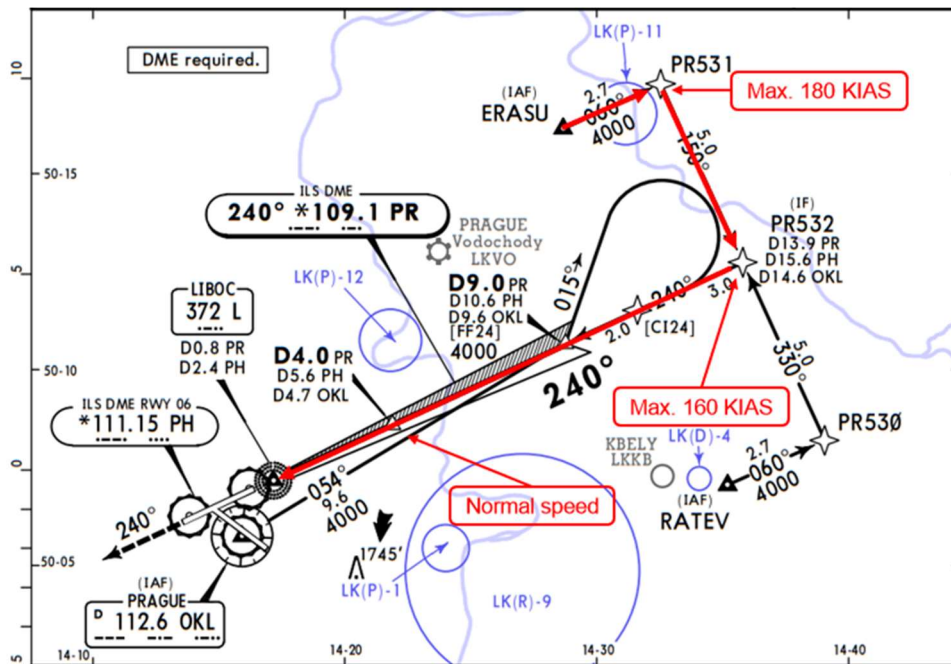
² Skutečný let LKKV-LKPR by ve FIR Praha nedostal povolení stoupat nad FL100

³ Jedná se o standardní postup, kde ATC vyrozumí posádku o možnost zkrácení tratě letu a neletění tratě konečného přiblížení z minimální výšky pro poskytování přehledových služeb ATC (dále ATCSMA). Jelikož uvedený postup není publikován a podléhá určitým omezením, musí s vektorováním posádka souhlasit.

letadlu nařízeno pokračovat rychlostí 250 KIAS a povoleno klesání do FL130. Po minutě bodu PR512 je letadlu nařízena rychlost 220 KIAS a povoleno klesání do FL090. Na úrovni letiště je letadlu povoleno klesání do A040 a povolení ILS APCH RWY 24. Po minutě PR518 je letadlu nařízena minimální rychlost v čisté konfiguraci MC (minimum clean speed). V momentě zahájení zatáčky přes bod PR531 je letadlu nařízena rychlost 180 KIAS. Po minutě bodu PR532 je letadlu nařízena rychlost 160 KIAS s podmínkou letu danou rychlostí až do DME PR 4 NM, přičemž tato rychlost musí být dosažena nejpozději v bodě PR24F (FAF). Schematické znázornění rychlostních omezení je zobrazeno na mapě standardního přístrojového přiletu, Obrázek 7 a na mapě přiblížení, Obrázek 8.



Obrázek 7: Standardní přiletová trať LOMKI 8S – upraveno. Zdroj podkladu: Jeppesen



Obrázek 8: Přiblížení ILS na dráhu 24 – upraveno. Zdroj podkladu: Jeppesen

3 Simulace-experiment

Experiment (simulace scénářů) který byl zaměřen na vliv řízení rychlosti v různých scénářích byl proveden na simulátoru A320, v prostředí simulátoru ATC Escape-Light a s využitím a databáze BADA. Simulátory byly k dispozici na pracovišti ÚLD Dopravní fakulty ČVUT Praha. Celkem jsem provedl 9 simulací (3 pro každý scénář) na simulátoru A320, 3 simulace na simulátoru ATC Escape Light a 3 simulace s využitím databáze DABA. Průměrná doba jedné simulace na letovém simulátoru A320 byla přibližně 30 minut, z toho asi 20 minut činilo měření dat.



Obrázek 9 Ukázka umístění kamery Go-Pro pro zaznamenání dat simulátoru A320

3.1 Simulátory

Simulace scénářů byla provedena na různých platformách s využitím simulátoru letounu Airbus A320, simulátoru ATC Escape Light a databáze BADA.

3.1.1 Simulátor Airbus A320

Softwarová platforma ProSimA320 pro Airbus A320 je kompatibilní s leteckými simulátory Microsoft® Flight Simulator™ 10 a Lockheed Martin Prepar3D® V4. Systém byl vytvořen za účelem profesionálního použití. Nastavení letových parametrů je provedeno užitím instruktorské stanice, dostupné např. na tabletu bezdrátově připojeného k simulátoru (Cevela, A. 2019). Na tomto tabletu je také možné v reálném čase sledovat průběh letu na mapě, podobně jako řídící letového provozu (ATCO) na přehledovém radaru. Simulátor umožňuje použití jednoho z těchto dvou druhů motorů: CFM56-5-B4 a V2527-A5 (pro účely experimentu byl použitý typ V2527-A5). Ve svých simulacích jsem používal verzi FMS databáze: 16JUN22-13JUL22 [18].



Obrázek 10: Simulátor Airbus A 320 na pracovišti ÚLD Dopravní fakulty ČVUT Praha

Simulátor, který jsem používal na pracovišti ÚLD Dopravní fakulty ČVUT Praha neumožňoval snadné stažení letových dat z provedeného letu, a proto jsem použil zaznamenávání dat pomocí kamery Go-Pro, umístěné v pozici, ze které bylo možné snímat letové parametry. Tento pomocný způsob záznamu dat bylo možné provést s ohledem na relativně malé množství sledovaných veličin. Snímání kamerou (viz Obrázek 12) bylo nastaveno na část přístrojové desky tak, aby byly zřetelně viditelné následující přístroje:

- PFD (Primary Flight Display),
- ND (Navigation Display),
- ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitor),
- uživatelské rozhraní FMS CDU (Computer Display Unit).

Mezi sledované veličiny patřily:

- Rychlost [KIAS],
- výška [ft]
- spotřeba paliva [kg/min] (přepočtena z údajů o celkové hmotnosti letadla),
- množství spotřebovaného paliva (kg);
- čas letu.

Z důvodu příliš hrubého rozlišení indikace spotřeby (přesnost ukazatele na 20 kg) byl pro odečet spotřeby použit údaj celkové hmotnosti letadla, který se na letovém simulátoru obnovuje s přesností 1 kg.

Na středním a konečném přiblížení byl zvolen rychlostní profil podle grafu na obrázku (viz Obrázek 1) na straně 20. Mechanizace byla vysouvána v následujících bodech:

- Vysunutí klapek 1 po zpomalení na rychlost „Green dot“ (minimální rychlost v čisté konfiguraci),
- vysunutí klapek 2 po přeletění bodu konečného přiblížení (FAF),
- vysunutí podvozku ve vzdálenosti 6 NM od prahu dráhy společně s klapkami 3,
- vysunutí klapek 4 ve vzdálenosti 4 NM od prahu dráhy.

3.1.2 Simulátor ATC Escape Light

Simulátor řízení letového provozu ATC Escape Light je vytvořen firmou EUROCONTROL za účelem výcviku řízení letového provozu (ATCO), výzkumu lze jej také využít jako simulační program pro trénink systémů umělé inteligence (AI) [12].

Simulátor obsahuje modul pro vytváření cvičení, které slouží k trénování ATCO. Ve svých simulacích jsem využíval nástroj PVT (Profile Validation Tool) pro vytváření letových (sestupových) profilů letadel na základě vložených parametrů.

Sledované parametry byly stejné jako v případě simulátoru Airbus A320, které jsou popsány v kapitole 3.1.1. Sledované parametry byly exportovány ve formě tabulky.

3.1.3 Výkonnostní model BADA

Výkonnostní model BADA je popsán v rešeršní části v kapitole 1.6 Systém BADA. Byl používán program modelování sestupu, dostupný po přihlášení na internetové stránce BADA [11].

Pro modelování profilu klesání byl použit nástroj APC (Aircraft Performance Calculator) – Simple Session, který vytvoří simulaci profilu pro zvolený letoun na základně nastavených vstupních parametrů a verze BADA databáze.

Nastavení parametrů simulace bylo provedeno následujícím způsobem: V prvním kroku byla vybrána verze výkonnostní databáze BADA, a to nejnovější verze BADA 3.15. Poté byl vybrán simulovaný typ letounu Airbus A320, který je veden v BADA databázi jako typ A320 (V2500-

A1), a byla zvolena simulace klesání (simulátor umožňuje simulovat stoupání, klesání, cestovní let a letovou obálku).

Nastavení parametrů konkrétního scénáře bylo provedeno ve třech krocích. Nejprve byla nastavena hmotnost, a to na 60 000 kg, a byl vybrán integrovaný režim, který snižuje hmotnost letounu během letu v závislosti na spotřebě paliva.

V druhém kroku bylo nastaveno klesání danou rychlostí, nad a pod FL100. Velikost vložené rychlosti se lišila podle scénáře:

- Pro 1. scénář vložena rychlost 298⁴ kt nad FL100 a 298 kt pod FL100
- Pro 2. scénář vložena rychlost 298 kt nad FL100 a 250 kt pod FL100
- Pro 3. scénář vložena rychlost 250 kt nad FL100 a 220 kt pod FL100

Rovněž zde byla zvolena typ simulace příletu letadla, který zohledňuje postupné zpomalování letounu během příletu a přiblížení na dráhu.

Ve třetím kroku byla nastavena počáteční a konečná výška klesání (nastaveno 15 000 ft a 1 260 ft) a odchylka teploty od standardní atmosféry (nastavena nulová odchylka). Vložené parametry jsou přehledně zobrazeny na obrázku níže (viz Obrázek 11).

⁴ Rychlost 298 kt odpovídá optimální rychlosti klesání pro Cl=15, jak bylo zjištěno pomocí simulátoru A320 na ÚLD

BADA Version BADA 3.15
Selected A/C A320 (V2500-A1)
Calculation Case Descent ▾

Change A/C >>

Calculation Type

Mass limits : Low : 39000 kg Nominal : 64000 kg High : 77000 kg

Point A/C Gross Mass kg

Integrated A/C Initial Mass kg

Descent options

Speed limits : Vmo : 350.0 kt Mmo : 0.820 kt

Descent at given CAS/Mach

CAS below FL100 kt

CAS above FL100 kt

Mach Number

Calculated CAS (departure/arrival) Speed profile

CAS constant below FL100

expedite

Emergency Descent

Descent at given Rate

Rate ft/min

CAS ▾ kt

Descent at given slope

Slope degree

CAS ▾ kt

Pressure Altitude

Max PA : Hmo : 41000 ft

Initial ft Final ft Step (Optional) ft

Temperature

Deviation from ISA * °C

Obrázek 11: Nastavení parametrů scénáře ve výkonnostní databázi BADA

3.2 Sběr dat

Účelem této kapitoly je popsat způsob práce se simulací scénářů, definovat proces sběru dat a popsat postup při jejich vyhodnocení. Metodický postup byl stanoven podle mých zkušeností se simulacemi – experimentem.

Zde je uveden seznam experimentálního vybavení:

- Simulátor A320,
- simulátoru ATC Escape Light,
- databáze DABA,
- kamera s dostatečným rozlišením pro sběr dat,
- stativ pro upevnění kamery.

3.2.1 Kolekce a vyhodnocení dat

Výběr měřených a vyhodnocovaných veličin závisí na možnostech simulačních prostředků. V průběhu experimentu bylo nutné vybrat takové hodnoty, které lze vzájemně porovnat nebo naměřit takové hodnoty, které lze do porovnatelných dat přepočítat.

Kolekce měřených dat na použitých platformách byla pořízena tak, aby bylo možné vyhodnocovat společné a zároveň relevantní veličiny.

Kolekce ze simulátoru

Sběr dat ze simulátoru byl proveden nahráváním klíčových veličin na kameru. Tento postup bylo možné aplikovat s ohledem na relativně nízký počet sledovaných veličin (10).

Mezi sledované veličiny patřily veličiny měřené a odvozené:

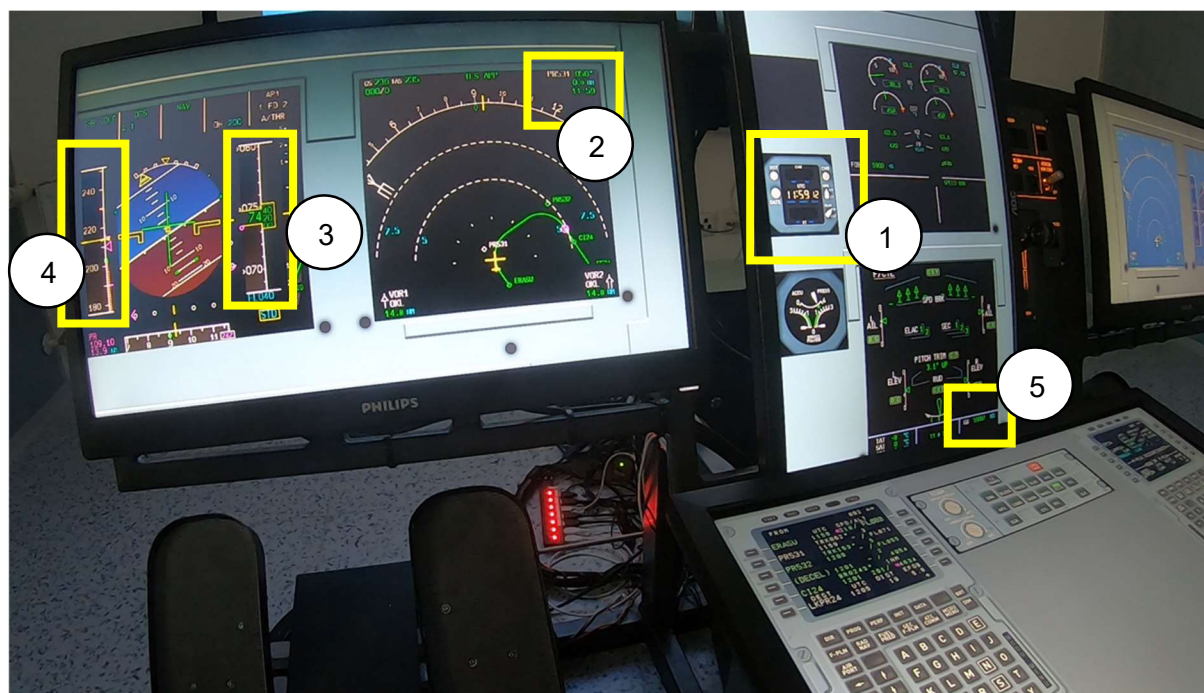
Měřené veličiny	Vyhodnocené veličiny
Rychlost [kt]	Rychlost [kt]
Výška [ft]	Výška [ft]
Celková hmotnost [kg]	Spotřeba paliva [kg/min]
Čas [hh:mm:ss]	Celkové spotřebované palivo [kg]
	Doba klesání [s]

Sběr dat byl prováděn v důvodu přehlednosti porovnání pouze ve vybraných bodech, mezi které náleží všechny definované body trasy a některé další dodané body, které mají pro scénáře význam. Data k danému bodu zaznamenána v pozici na úrovni (abeam).

Byly měřeny hodnoty i v bodech určených zpracovatelem, které jsou významné pro měřené scénáře:

- Bod TOD (vrchol klesání), ve kterém letadlo začíná klesat (pro porovnávání pouze fáze klesání, aby tam nebyl rovný segment).
- Dalším určenými body jsou body 220 a MD ve 3. scénáři, ve kterých letoun zpomaluje na podle instrukcí ATC na rychlosti 220 uzlů a minimální rychlost v čisté konfiguraci (MC).
- Hodnoty veličin byly zaznamenány i v bodech 6NM a 4NM, které jsou určeny vzdáleností od prahu dráhy a které jsou významné ve scénářích:
 - 6NM je pro 1. scénář, kde je řídicí letového provozu (ATCO) vektoruje na šestimílové finále dráhy 24.
 - 4NM je relevantní pro scénář č. 3, kde končí povinnost pilota udržovat rychlostní omezení přidělené ATC (v našem případě 160 uzlů).

Údaje ze simulátoru byly snímány digitální kamerou a po ukončení letu byly uloženy do počítače a vybrané veličiny byly na základě záznamu přeneseny do tabulky pro následovné vyhodnocení a grafické zpracování dat. Tento proces je znázorněn v následujícím obrázku.



Obrázek 12: Ukázka snímání dat na simulátoru A320

Popis odečtu snímaných veličin:

- 1) Čas,
- 2) vzdálenost,
- 3) aktuální výška,
- 4) aktuální rychlost,
- 5) aktuální hmotnost.

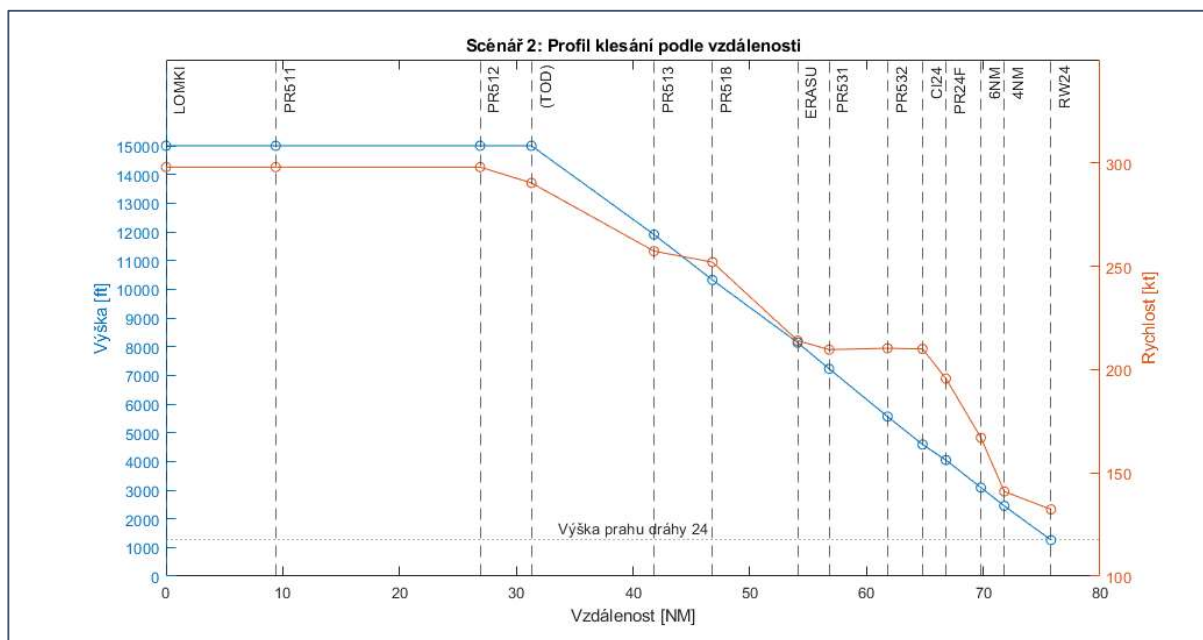
Tabulka 15: Ukázka sběru dat ze simulátoru (scénář 2)

Bod na trase	Vzdálenost mezi body [NM]	Kumulativní vzdálenost [NM]	Čas [hh:mm:ss]	Výška [ft]	Rychlost [KIAS]	Celková hmotnost [kg]
LOMKI	0	0	15:51:18	15000	298	60120
PR511	9,4	9,4	15:52:48	15000	298	60060
PR512	17,5	26,9	15:55:40	15000	298	59940
(TOD)	4,4	31,3	15:56:23	15000	291	59915
PR513	10,5	41,8	15:58:22	11900	256	59885
PR518	5	46,8	15:59:25	10330	252	59870
ERASU	7,3	54,1	16:01:04	8150	215	59844

PR531	2,7	56,8	16:01:40	7250	210	59835
PR532	5	61,8	16:02:46	5560	208	59819
CI24	3	64,8	16:03:28	4590	208	59809
PR24F	2	66,8	16:04:02	4040	191	59804
(6NM)	3	69,8	16:05:14	2950	155	59786
(4NM)	2	71,8	16:06:04	2310	137	59763
RW24*	4	75,8	16:07:33	1260	131	59703

Pozn.: Bod TOD označuje začátek klesání, body 6NM a 4NM vzdálenost od prahu dráhy a RW24 je označení pro práh dráhy 24

Ačkoli byla data měřena od prvního bodu STAR LOMKI 8S, vyhodnocení grafů bylo provedeno pouze pro klesání (tj. od bodu TOD k bodu RW24), byla tak eliminována cestovní část letu v horizontu. Na grafu níže (viz Tabulka 15) je kompletní část měření, odpovídající tabulce výše (viz Graf 1).

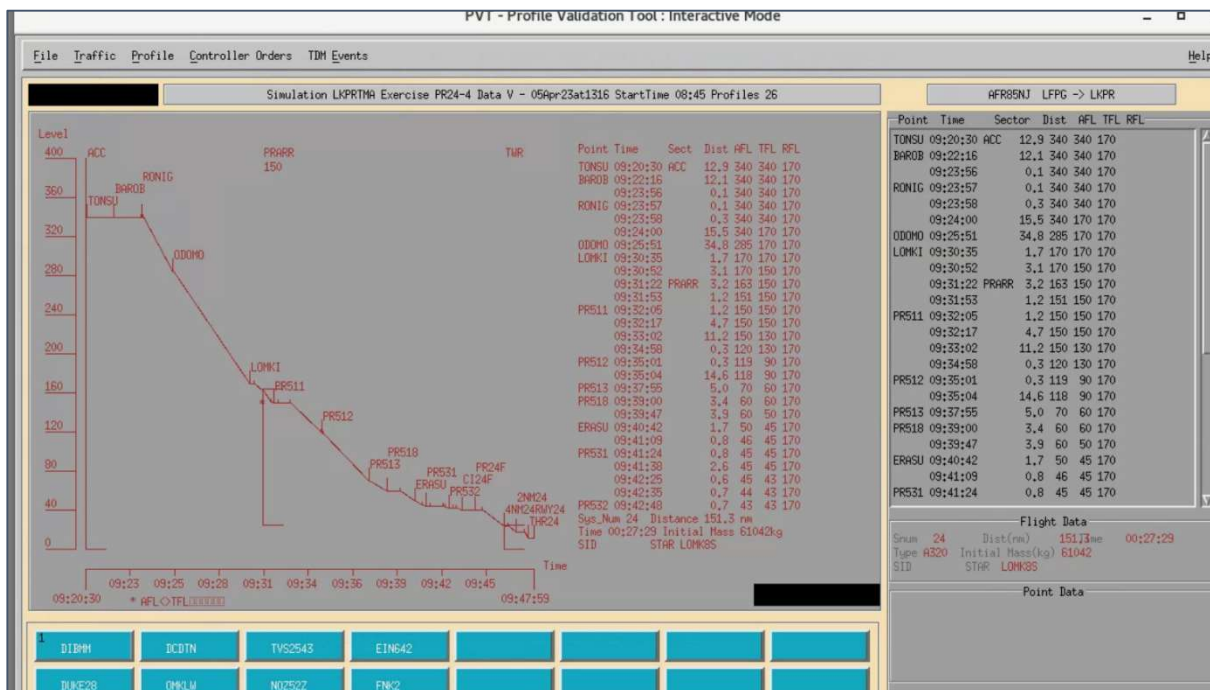


Graf 1: Ukázka grafického zobrazení experimentu (scénář č. 2)

Kolekce z Escape ATC simulátoru

Z důvodu složitého způsobu nastavování scénářů jsem pro tento úkol využil pomoci pracovníků laboratoře ATM/CNS na ÚLD, kteří mi pomohli s nastavením scénářů a kolekcí dat.

Modul pro vytváření vertikálních profilů PVT vytvořil na základě vložených parametrů výškový profil klesání v závislosti na vzdálenosti společně s tabulkou hodnot času, sektoru ATC, vzdálenosti, aktuální výšky a cílové výšky v určitých bodech. Rychlost byla dostupná z jiného souboru vytvořeného modulem. Tabulka hodnot neobsahovala údaj o spotřebě paliva, bylo pouze možné získat údaj o počáteční a cílové hmotnosti letounu. Tento údaj je ovšem zkrácený o let v horizontu před začátkem klesání a pro porovnání se simulátorem A320 je proto nutné použít stejný údaj (spotřeba paliva z celého příletu) i ze simulátoru A320. Ukázka sběru dat je zobrazena na následujícím obrázku viz (viz Obrázek 13).



Obrázek 13: Ukázka sběru dat ze simulátoru Escape ATC (scénář č. 2)

Kolekce z BADA databáze

Výkonnostní databáze BADA po vložení parametrů scénáře vygenerovala pro klesající letoun tabulku následujících veličin, od každé právě 21 hodnot.

- Výška [ft]
- Hmotnost letounu [kg]
- Rychlost letounu v kalibrované vzdušné rychlosti (CAS) [kt], Machově číslu [M] a pravé vzdušné rychlosti (TAS) [kt]
- Vertikální rychlost klesání [ft/min] a gradient klesání [stupně]
- Spotřeba paliva [kg/s]
- Doba letu [s]
- Vzdálenost [NM]
- Množství spotřebovaného paliva [kg]

Díky přehledné tabulce relevantních veličin ji lze snadno porovnat s výstupy ze simulátoru A320.

4 Prezence výsledků

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací všech tří scénářů definovaných v kapitole 2.2 a 2.3. Výsledky jsou představeny ve formě přehledných tabulek, grafů včetně komentářů. Nejpresnější a nejpodrobnější výstupy jsou ze simulátoru A320, které byly ale prakticky hůře dosažitelné. Z technických důvodů nebylo možno stáhnout data ze simulátoru přímo a bylo nutné použít kameru. Výhodou kamerového záznamu byla snadná dostupnost dat ze záznamu a také přehlednost letových informací (nastavení režimu autopilota atp.) ve vizualizaci palubních přístrojů.

Simulátor ATC udává spotřebu pouze na začátku a na konci scénáře, proto není možné porovnat spotřebu v klesání se simulacemi na simulátoru A320. Pro ověření, resp. porovnání výsledků ze simulátoru, byly jako alternativa použity výstupy z výkonnostní databáze BADA.

4.1 Výsledky simulací ze simulátoru A320

Výsledky scénáře č. 1

Prvním scénářem byl let s napřímením z bodu ERASU na bod LOMKI a následné vektorování na 6NM finále dráhy 24. Jednalo se, dle předpokladu, o nejkratší ze tří testovaných scénářů s celkovou dobou letu 12 minut 43 sekund a uletěnou vzdáleností přibližně⁵ 62,4 NM, z toho klesání trvalo 9 minut 25 sekund při vzdálenosti 43,4 NM. Během letu bylo spotřebováno 284 kg paliva, z toho 148 kg při klesání z bodu TOD. Informace jsou přehledně uvedeny v následující tabulce (Tabulka 16).

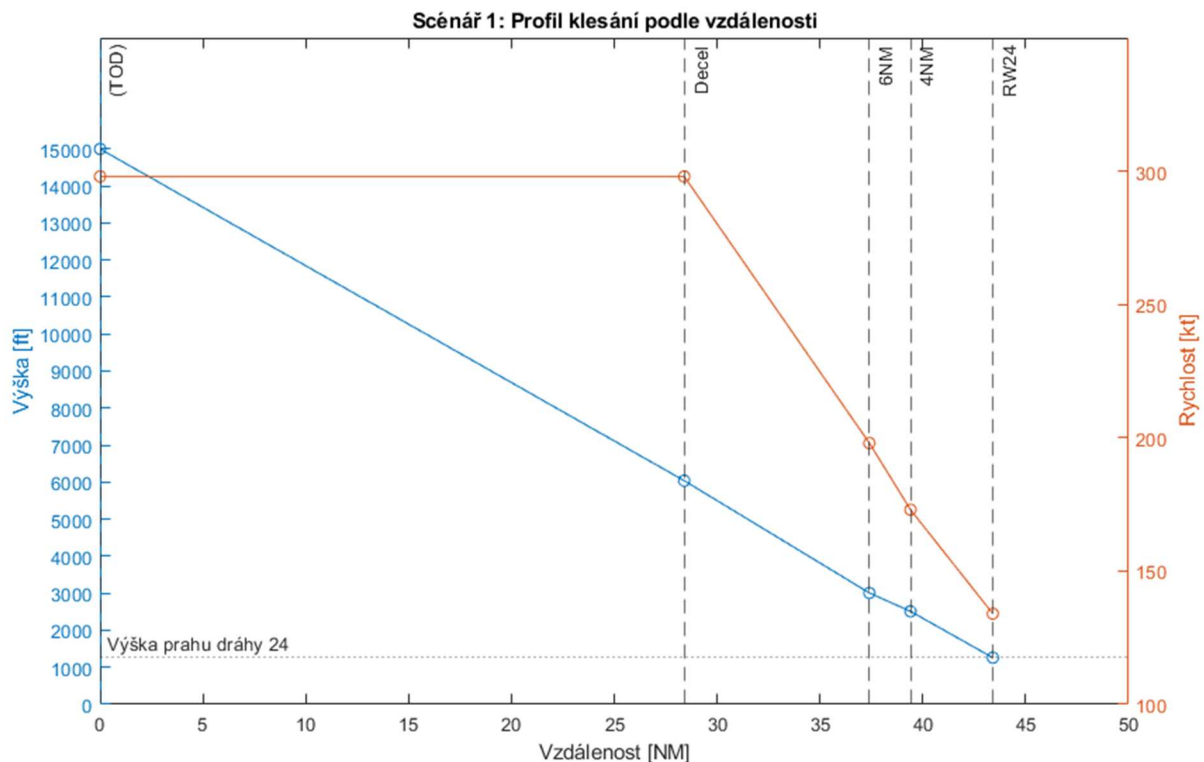
Tabulka 16: Scénář 1: Výsledky simulací ze simulátoru A320

Scénář 1: Výsledky simulací ze simulátoru A320			
Scénář 1	Doba klesání [mm:ss]	Vzdálenost [NM]	Spotřebované palivo [kg]
Celý přílet (LOMKI-RW24)	12:43 (763 s)	62,4	284
Klesání (TOD-RW24)	9:25 (565 s)	43,4	148

V grafu (viz Graf 2) je zobrazen profil klesání letounu v 1. scénáři. Veličiny byly zaznamenány ve 4 bodech: TOD, 6 NM, 4 NM a RW24. Letoun z bodu TOD klesal v režimu DES (managed descent) rychlostí 298 kt, kterou letoun vypočítal jako optimální za základě vloženého CI

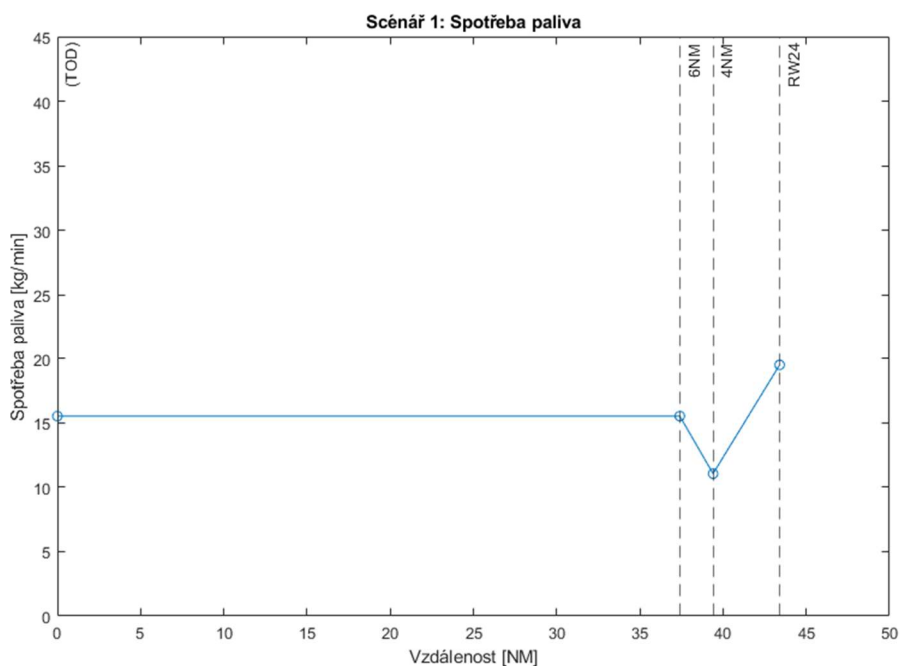
⁵ Vzdálenost 62,4 NM odpovídá délce trasy na mapě. Skutečný letoun uletěnou trasu zkrátí o oblouk vytvořený při zatáčení.

o hodnotě 15. Let vysokou rychlostí trval až do vzdálenosti přibližně 28 NM, kde začalo snižování rychlosti vzhledem k očekávanému vektorování na 6 NM finále. Během zpomalování bylo nutné vysunout spoilery (aerodynamické brzdy). Vertikální profil klesání odpovídal konstantní sestupové rovině o úhlu 3,01 stupně, která odpovídá klesání na volnoběh rychlostí 298 kt.



Graf 2: Scénář č. 2: Profil klesání podle vzdálenosti ze simulátoru A320

Spotřeba paliva byla po většinu doby klesání konstantní o hodnotě přibližně 15,5 kg/min a zvýšila se až po vzdálenosti 39 NM (4 NM od prahu dráhy), kde letoun zpomalil na stabilní rychlost přiblížení a pro její udržení zvýšil tah motorů.



Graf 3: Scénář č. 2: Spotřeba paliva ze simulátoru A320

Výsledky scénáře č. 2

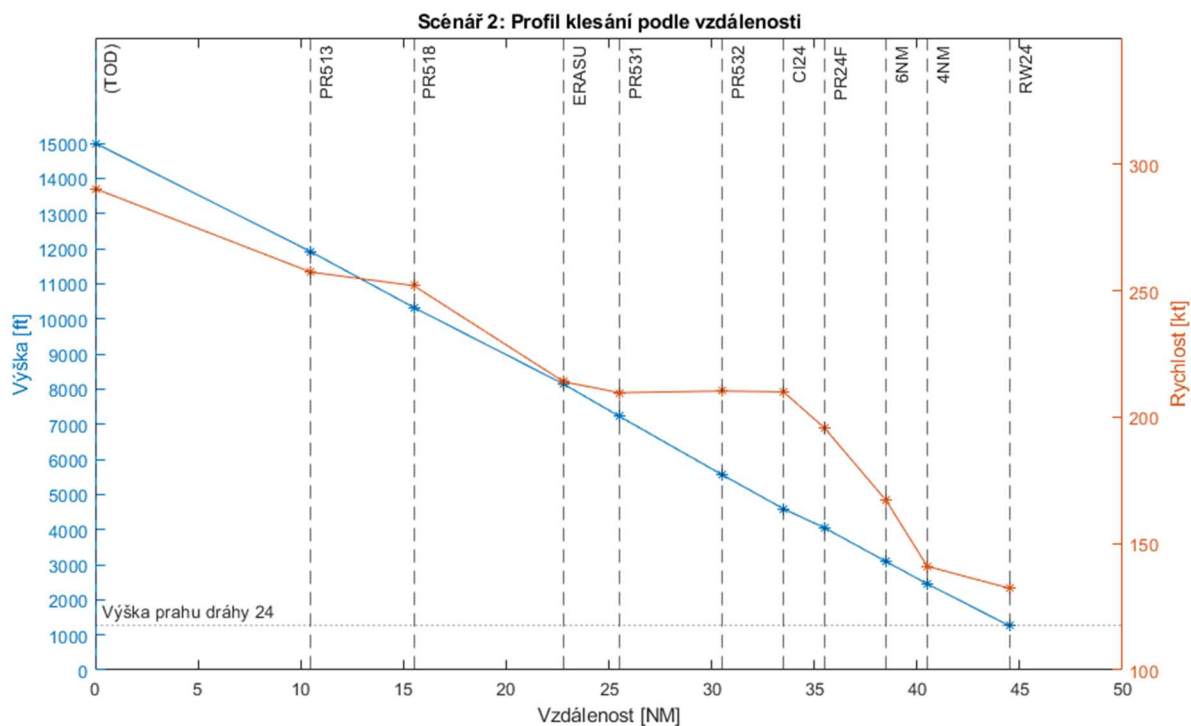
Druhým scénářem byl let po trati STAR bez zásahu ATC do rychlostního profilu letounu. Celková doba letu příletu (LOMKI-RW24) činila 16 minut a 10 sekund, letoun během příletu uletěl přibližně 75,8 NM, z toho klesání trvalo 11 minut 4 sekundy při vzdálenosti 44,5 NM. Během letu bylo spotřebováno 414 kg paliva, z toho 207 kg při klesání z bodu TOD. Informace jsou přehledně uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 17).

Tabulka 17: Scénář 2: Výsledky simulace ze simulátoru A320

Scénář č. 2: Výsledky simulace ze simulátoru A320			
Scénář 2	Doba klesání [mm:ss]	Vzdálenost [NM]	Spotřebované palivo [kg]
Celý přílet (LOMKI-RW24)	16:10 (970 s)	75,8	414
Klesání (TOD-RW24)	11:04 (664 s)	44,5	207

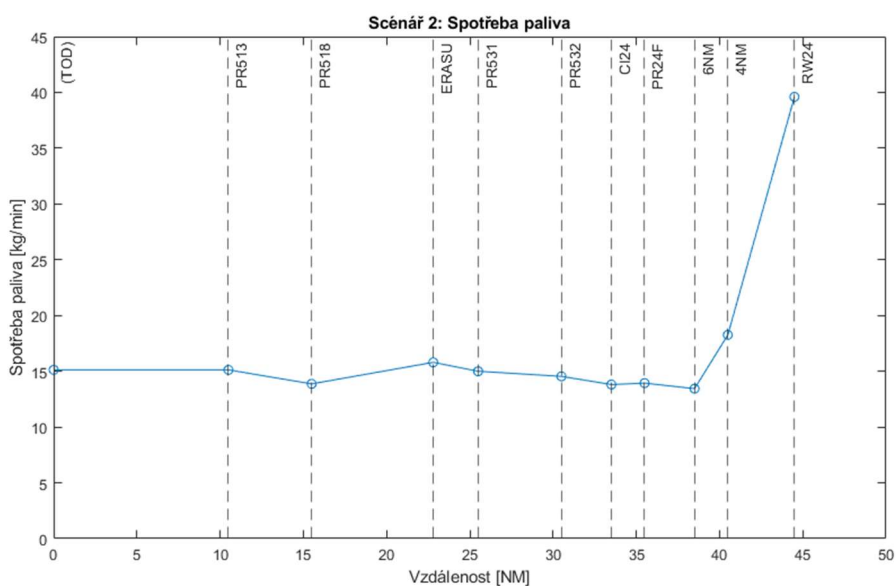
Jak je patrné z následujícího grafu (viz Graf 4), letoun začal během klesání vzhledem k vertikální blízkosti bodu TOD (FI150) ke FL100 zpomalovat na rychlost 250 kt již před TOD, proto křivka rychlosti začíná na nižší hodnotě než 298 kt (hodnotě pro cestovní let). Další snižování rychlosti je zřetelné před bodem ERASU, kde se nachází omezení rychlosti na

210 kt. Rychlostní 210 kt letoun pokračoval přibližně 10 NM na bod CI24, kde začal zpomalovat dle standardního profilu klesání pro A320.



Graf 4: Scénář č. 2: Profil klesání podle vzdálenosti ze simulátoru A320

Vertikální profil klesání odpovídá sestupové rovině s úhlem 2,94 stupňů. Ve fázi letu, kde bylo nutné zpomalit pro dodržení rychlostního omezení 210 kt na ERASU (IAF), bylo nutné použít spoilery.



Graf 5: Scénář č. 2: Spotřeba paliva ze simulátoru A320

Spotřeba paliva (viz Graf 5) byla během klesání přibližně konstantní od bodu TOD až do vzdálenosti 6 NM od prahu dráhy 15 kg/min. Poté vrostla postupně na hodnotu 20 kg/min a následně na 40 kg/min, kde zůstala do přistání.

Výsledky scénáře č. 3

Ve třetím scénáři probíhal let s řízením rychlosti ATC. Celková doba letu příletu (LOMKI-RW24) činila 18 minut a 11 sekund, letoun během příletu uletěl 75,8 NM, z toho klesání trvalo 13 minut 7 sekund při vzdálenosti 44,5 NM. Během letu bylo spotřebováno 390 kg paliva, z toho 246 kg při klesání z bodu TOD. Informace jsou přehledně uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 18).

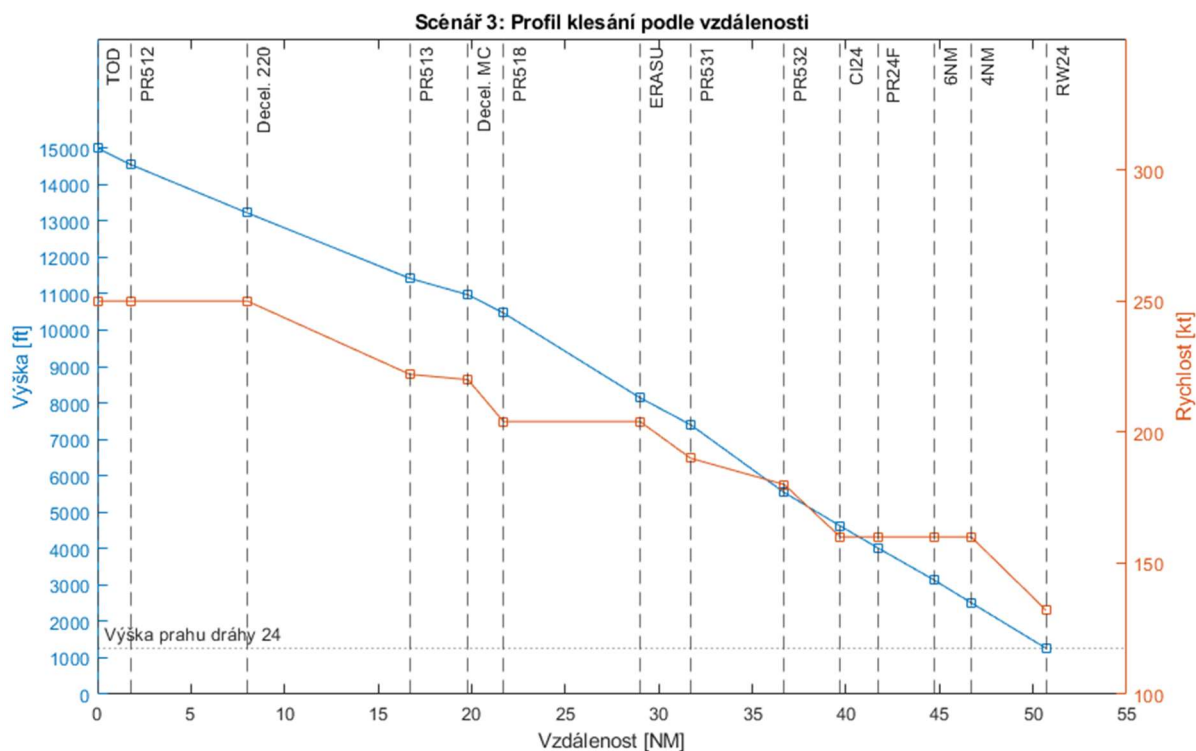
Tabulka 18: Scénář 3: Výsledky simulací ze simulátoru A320

Scénář č. 3: Výsledky simulací ze simulátoru A320			
Scénář 3	Doba klesání [mm:ss]	Vzdálenost [NM]	Spotřebované palivo [kg]
Celý přílet (LOMKI-RW24)	18:11 (1091 s)	75,8	390
Klesání (TOD-RW24)	13:07 (787 s)	50,7	246

Křivka rychlosti (viz Graf 6) začíná na rozdíl od předchozích dvou scénářů na hodnotě 250 kt, jelikož je již letoun v tuto chvíli splňuje rychlostní omezení vydané v bodě LOMKI, kterým začíná STAR. V křivce rychlosti jsou zřetelné „schody“, které ukazují, jak letoun zpomalil na příkázané rychlosti. Na vrchol klesání dorazí letoun již s první příkázanou rychlostí 250 kt, následuje zpomalení na rychlost 220 kt a zpomalení na minimální rychlost v čisté konfiguraci (MC), která je vypočítána na základě aktuální hmotnosti letounu a činila přibližně 200 kt.

Po iniciaci zpomalování bylo nutné vysunout spoilery (aerodynamické brzdy), aby byl letoun schopný udržet vypočítanou sestupovou rovinu. Při rychlosti MC letoun nejméně klesá, jelikož se zároveň jedná o rychlost, při které má nejnižší odpor a nejlepší klouzavost.

Na bodu ERASU následuje příkaz omezení rychlosti na 180 kt. Během zpomalování byly vysunuty vztlkové klapky do polohy 1 (pro zpomalení pod MC, je z principu nutno vysunout vztlkovou mechanizaci). Po vysunutí klapek do první polohy bylo možné zasunout spoilery.



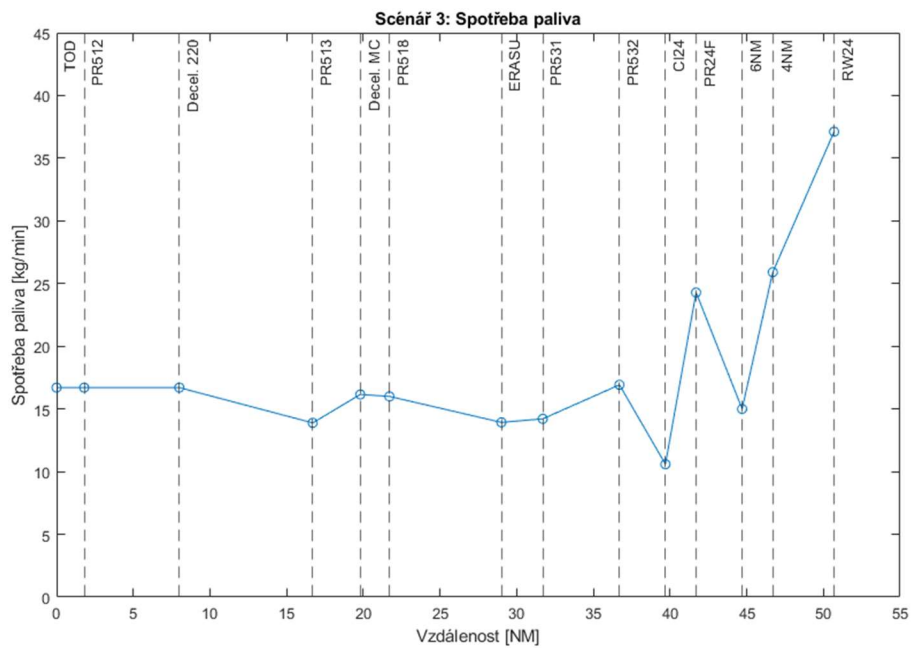
Graf 6: Scénář č. 3: Profil klesání podle vzdálenosti ze simulátoru A320

Pozn.: Bod „Decel. 220“ označuje bod iniciace snižování rychlosti na 220 kt a bod „Decel. MC“ označuje iniciace zpomalování na minimální rychlost v čisté konfiguraci.

Po dotočení zatáčky do trasy konečného přiblížení v bodě PR532 byl letoun požádán o snížení rychlosti na 160 kt. Pro splnění tohoto omezení bylo nutné vysunout vztlakové klapky do polohy 2. Rychlostí 160 kt letoun pokračoval až do vzdálenosti 4 NM od prahu dráhy, kde letoun navázal na standardní rychlostní profil vysunutím vztlakových klapek do polohy 4 a zpomalením na konečnou rychlost.

Výškový profil letu odpovídá konstantní sestupové rovině pod úhlem 2,58 stupně, který letoun vypočítal a udržoval v rámci klesání v režimu DES (managed descend) Po iniciaci zpomalování na rychlost 220 kt (v bodě Decel. 220) letoun nedokázal tuto sestupovou rovinu udržet a bylo nutné použít spoilery. Podobný manévr byl nutný i po přeletění bodu Decel. MC, kde bylo zahájeno zpomalování na minimální rychlost v čisté konfiguraci (MC).

Spotřeba paliva, kterou znázorňuje následující graf (viz Graf 7), setrvala během klesání na volnoběh přibližně na hodnotě 16 kg/min. Při vysunutí klapek do polohy 2 po bodu C124 spotřeba vzrostla z důvodu nutnosti udržení rychlosti. Spotřeba opět stoupá na hodnotu přibližně 37 kg/min po dosažení stabilizovaného sestupu s plně vysunutými klapkami a podvozkem.



Graf 7: Scénář č. 3: Spotřeba paliva ze simulátoru A320

4.1.1 Porovnání výsledků simulací ze simulátoru A320

V této sekci je provedeno porovnání výsledků simulací ze simulátoru A320.

Výsledky simulací ukázaly, že nejméně náročný scénář na spotřebu a dobu letu je 1. scénář, ve kterém je letadlo zkráceno z bodu LOMKI na bod ERASU a následně vektorováno na 6 NM finále. Doba klesání byla oproti nominálnímu klesání pro trati STAR (scénář 2) zkrácena o 1 minutu 39 sekund (15 %) a spotřeba paliva se snížila o 59 kg (29 %).

Tabulka 19: Přehled výsledků simulací ze simulátoru A320 (pouze klesání)

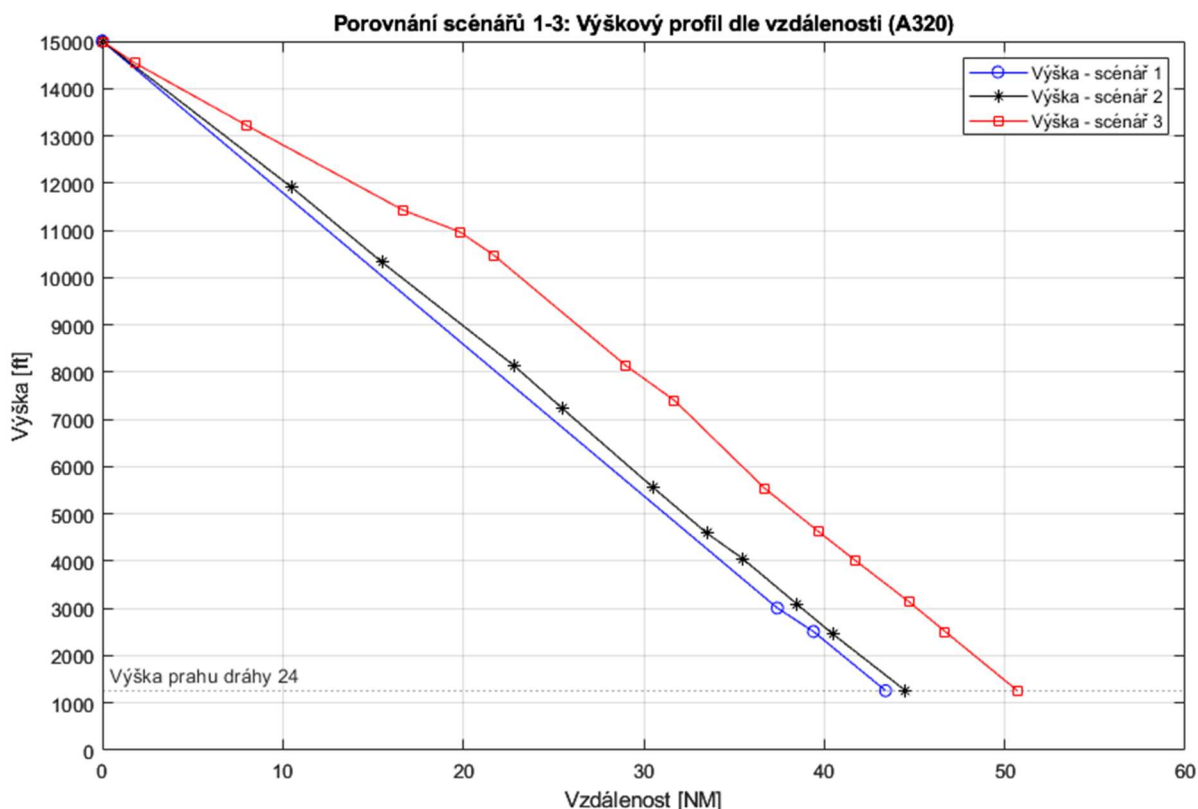
Pouze klesání (TOD-RW24) – Simulátor A320			
	Doba klesání [mm:ss]	Vzdálenost [NM]	Spotřebované palivo [kg]
Scénář 1	9:25 (565 s)	43,4	148
Scénář 2	11:04 (664 s)	44,5	207
Scénář 3	13:47 (787 s)	50,7	246

Nejvíce náročný na spotřebu i dobu letu je scénář č. 3, kde je letadlo rychlostně omezováno prostřednictvím ATC po celou dobu klesání. Celková doba klesání je prodloužena o přibližně 2 minuty (18 %) a spotřeba paliva vzrostla o 39 kg (19 %). Výsledky procentuální porovnání doby letu a spotřeby mezi scénáři pro simulátor A320 jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 19).

Tabulka 20: Procentuální porovnání doby letu a spotřeby paliva mezi scénáři ze simulátoru A320

Procentuální porovnání doby letu a spotřeby mezi scénáři – Simulátor A320						
	Procenta doba klesání			Procenta spotřeba		
Scénář 1	100 %	85 %	72 %	100 %	71 %	60 %
Scénář 2	118 %	100 %	84 %	140 %	100 %	84 %
Scénář 3	139 %	118 %	100 %	166 %	119 %	100 %

Na grafu porovnávajícím výškové profily klesání scénářů 1 až 3 (viz Graf 8) jsou zřetelné rozdílné úhly sestupových rovin, které byly vypočteny prostřednictvím FMS simulovaného letounu v závislosti na počáteční rychlosti klesání.

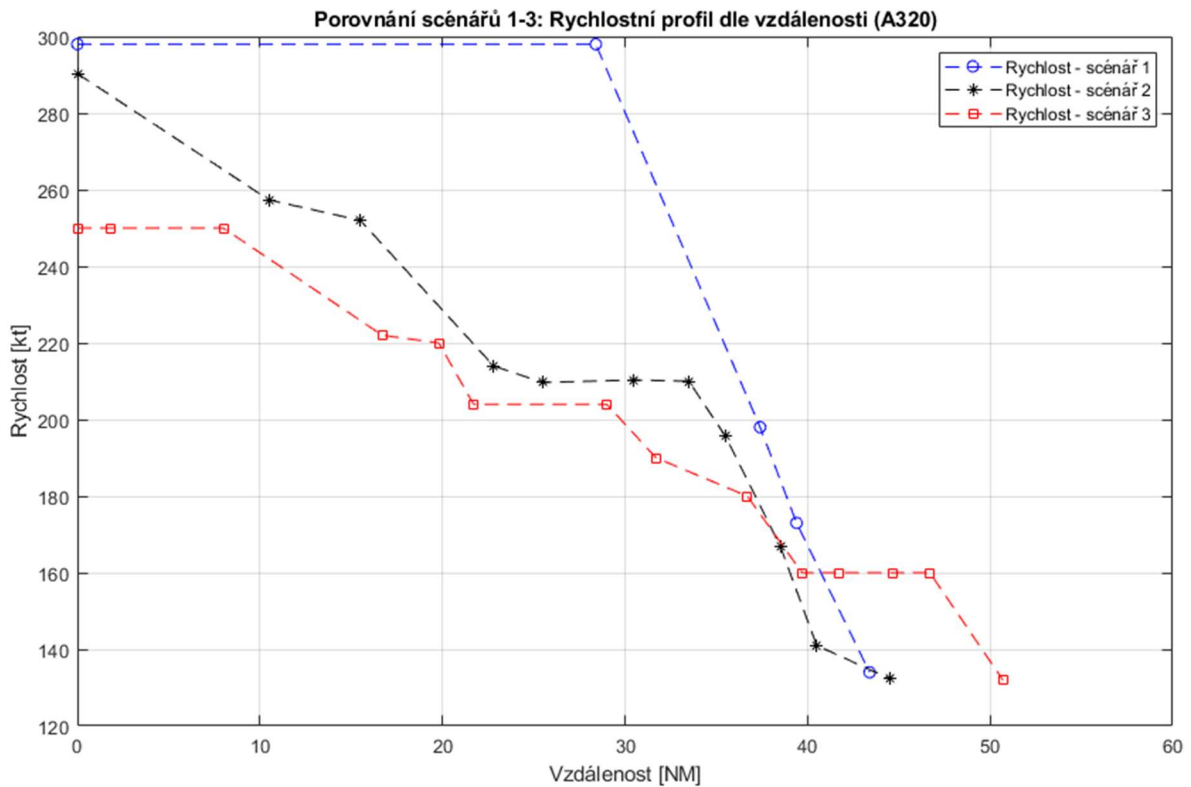


Graf 8: Porovnání výškových profilů dle vzdálenosti (A320)

U červené křivky, popisující průběh klesání v scénáři 3, vidíme ve vzdálenosti 20 NM tendenci zpomaleného klesání kvůli nutnému snižování rychlosti (zásah ATC). Toto bylo, jak je patrné z grafu kolem 35 NM napraveno pomocí spoilerů, aby se letoun vrátil na vypočítanou rovinu klesání.

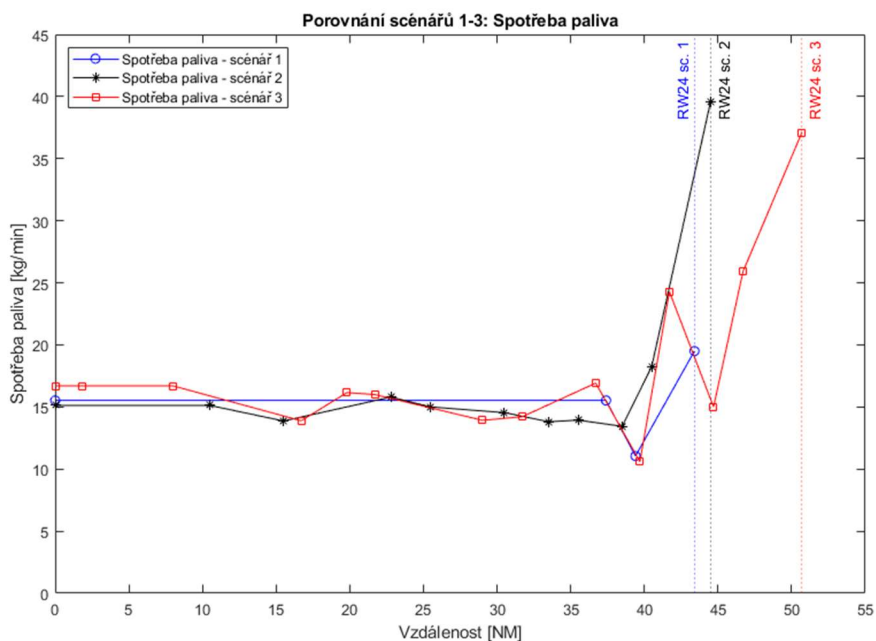
Jednotlivé scénáře se navzájem odlišují řízením rychlosti letounu ve fázi klesání. V letěném scénáři 1 je rychlost konstantní (300 kt) až do vzdálenosti 28,7 NM, poté letoun rovnoměrně zpomaluje. Udržování vysoké rychlosti bylo možné vzhledem k absenci rychlostního omezení 250 kt pod FL100.

Naproti tomu ve scénáři 2 se rychlost mění v několika stupních. Před dosažením výšky FL100 letoun zpomaluje na rychlost 255 kt, aby splnil rychlostní omezení 250 kt ve FL100. Další snížení rychlosti nastává před bodem ERASU, který se nachází ve vzdálenosti 22,8 NM. Od bodu CI24 (33,5 NM) letoun opět snižuje rychlost v rámci standardního rychlostního profilu pro přiblížení a přistání viz Obrázek 1 na straně 20.



Graf 9: Porovnání rychlostních profilů dle vzdálenosti (A320)

Ve scénáři 3, kde je rychlost řízena ATC, je po celou dobu klesání na první pohled viditelná nižší rychlost již v bodu TOD a následné „schody“ postupného snižování rychlosti na základě instrukcí. Scénář č. 3 je také oproti scénářům č. 1 a 2 asi o 8 NM delší a jako jediný obsahuje poměrně dlouhou část letu nízkou rychlostí (160 kt), které má znatelný dopad na dobu přiletu.



Graf 10: Porovnání spotřeby paliva mezi scénáři podle vzdálenosti

4.2 Výsledky simulací z Escape ATC

Výsledky simulací ze simulátoru Espace ATC jsou přehledně znázorněny v následující tabulce (viz Tabulka 21). Vzhledem k tomu, že byl pomocí Escape ATC simulován z technických důvodů pouze celý přílet (ne pouze část klesání), jsou informace o spotřebě paliva zkráceny o cestovní let v horizontu na bod TOD. Na rozdíl od simulátoru A320 a databáze BADA neudává simulátor ATC údaj spotřeby po jednotlivých bodech, ale jen jako celkové množství spotřebovaného paliva v celém scénáři (tedy letu LOMKI-TOD-RW24).

Tabulka 21: Přehled výsledků simulací ze simulátoru Escape ATC (celý let)

	Celý přílet (LOMKI-RW24) – Escape ATC		
	Doba letu [mm:ss]	Vzdálenost [NM]	Spotřebované palivo [kg]
Scénář 1	13:05 (780 s)	62,4	263
Scénář 2	17:45 (1065 s)	75,8	387
Scénář 3	19:25 (1165 s)	75,8	412

Scénář č. 2, kde letoun následoval publikovanou trať STAR LOMKI 8S, trval 17 minut 45 sekund, při vzdálenosti 75,8 NM. Během letu bylo spotřebováno 387 kg paliva. U posledního scénáře.

Scénář č. 1 znamenal pro sledovaný let nejnižší spotřebu paliva i dobu letu. Během 1. scénáře bylo spotřebováno 263 kg paliva za dobu letu 13 minut 5 sekund při vzdálenosti 62,4 NM. Jedná se o přibližně 27 % zkrácení doby letu a 32 % snížení celkové spotřeby než u scénáře č. 2, kde letoun následuje standardní trasu příletu LOMKI 8S.

Ve třetím scénáři byla doba letu nejdelší, trvala 19 minut 25 sekund, tedy o přibližně 9 % déle než u scénáře č. 2. Letoun uletěl vzdálenost 75,8 NM a spotřeboval 412 kg paliva, přibližně o 6 % více než u 2. scénáře.

4.3 Výsledky simulací z databáze BADA

Použitý simulační nástroj výkonnostní databáze BADA neumožňovat vložení dostatečného množství parametrů, aby jimi bylo možné přesně popsat navržené scénáře. Rozdílný vstup na závislosti různých scénářů spočíval ve vložení jiných parametrů rychlosti klesání nad a pod FL100, jak bylo popsáno v kapitole 3.2.1. Výstupy simulací z databáze BADA se příliš nelišily. V případě scénářů č. 1 a 2 uletěl letoun vzdálenost přibližně 57,94 NM v čase 13 minut a 46 sekund a spotřeboval celkem 156 kg paliva. Ve scénáři č. 3. uletěl letoun vzdálenost 59,66 NM za dobu 15 minut a 2 sekundy a spotřeboval 159 kg paliva. Přehled výsledků je uveden v následující tabulce (viz Tabulka 22).

Tabulka 22: Přehled výsledků simulací z BADA (pouze klesání)

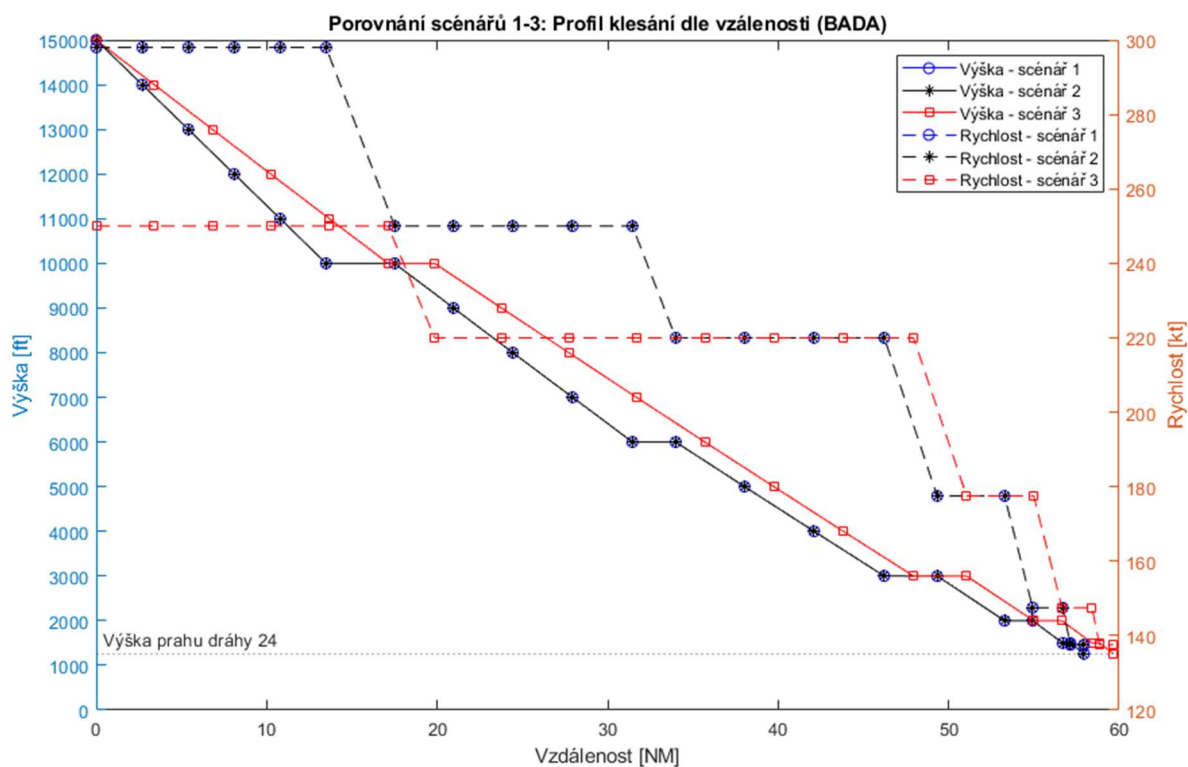
Pouze klesání (TOD-RW24) - BADA			
	Doba klesání [mm:ss]	Vzdálenost [NM]	Spotřebované palivo [kg]
Scénář 1	13:46 (826 s)	57,94	156
Scénář 2	13:46 (826 s)	57,94	156
Scénář 3	15:02 (902 s)	59,66	159

Profil klesání pro scénáře 1-3

Podle výstupních hodnot a jejich zobrazení v grafu (viz Graf 11) je patrné, že u scénáře č. 1 a 2 byla v obou případech provedena simulace klesání s rychlostí 250 kt pod FL100, ačkoli byla pro scénář č. 1 vložena hodnota 298 kt pod FL100. Důsledkem je vertikální i rychlostní profil obou scénářů identický. Rychlostní profil obsahuje čtyři segmenty horizontálního letu, při kterých letoun zpomaluje na nižší rychlost.

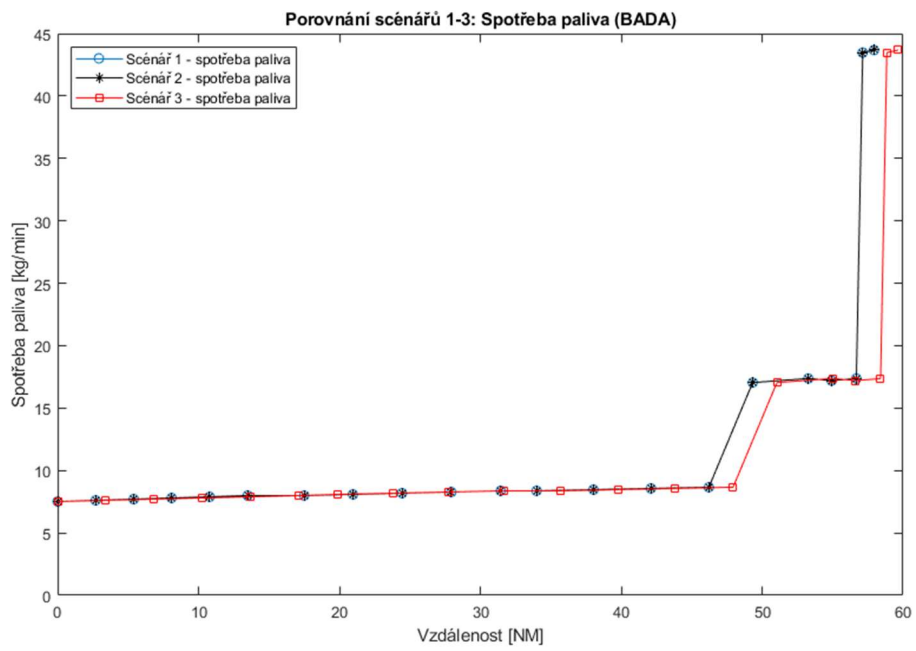
Jiné hodnoty byly modelovány až ve 3. scénáři, kde byla vložena rychlost 250 kt nad FL100 a 220 kt pod FL100. Rychlost letounu má po TOD hodnotu 250 kt a ve FL100 dochází ke krátkému letu v horizontu a zpomalení na rychlost 220 kt. V tento moment simulace pokračuje standardním profilem klesání od rychlosti 220 kt, jako tomu bylo v předchozích dvou scénářích. Vzhledem k nižšímu gradientu klesání v důsledku letu nižší rychlostí je uletěná vzdálenost o 1,72 NM (3 %) delší a doba letu byla rovněž prodloužena (o 1 minutu 16 sekund, přibližně 9 %)

Byly zjištěno, že použitý simulační nástroj zřejmě neumí vypočítat profil obsahující zpomalování a klesání ve stejný moment. Pravděpodobně se jedná o limitace výkonnostních dat BADA, ze kterých simulační nástroj údaje čerpá.



Graf 11: Porovnání scénářů: Profil klesání dle vzdálenosti (BADA)

Spotřeba paliva, která je znázorněna v grafu níže (viz Graf 12), se u všech třech scénářů drží během klesání na volnoběhu na hodnotě přibližně 8 kg/min. V poslední čtvrtině letu stoupá na hodnotu přibližně 16 kg/min, která koresponduje s fází letu s rychlostí 180 kt a následně prudce stoupá k hodnotě 44 kg/min během konečného přiblížení.



Graf 12: Porovnání scénářů 1-3: Spotřeba paliva dle vzdálenosti (BADA)

4.4 Porovnání simulačních prostředků

Porovnání výstupů ze simulátoru A320 (v tabulce jako „A320“) a ze simulátoru Escape ATC Light (v tabulce jako „ATC“) je provedeno na modelu celého přiletu, jelikož spotřeba paliva ze simulátoru ATC je uvedena pouze z celé trasy STAR. Výsledky jsou přehledně uvedeny v tabulce (viz Tabulka 23).

Z porovnaných dob letu je patrné, že simulátor ATC modeloval delší dobu, tedy let pomalejší rychlostí, než jakou byl proveden let na simulátoru A320. Doby letu jsou přibližně o 5 % delší. Spotřeby paliva jsou naopak nižší o zhruba 7 %, až na anomálii ve třetím scénáři, kde byla spotřeba letounu na simulátoru A320 nižší, ačkoli se jednalo o delší let. Spotřeba na simulátoru A320 je ve 2. scénáři vyšší než ve 3. proto, že letoun poměrně dlouho letí cestovním režimem v horizontu před TOD, než tomu tak bylo na simulátoru ATC. V simulátoru ATC začal letoun klesat dříve a o něco pomalejší rychlostí.

Nižší spotřeba paliva u 3. scénáře v porovnání s 2. nemusí v provozu znamenat úsporu nákladů. Vzhledem k delší době letu, která je u 3. scénáře o 2 minuty 1 sekundu delší, je možné, že provozovateli vzniknou vyšší náklady na let kvůli jeho delšímu trvání než vyšší spotřebě. Zvýšení nákladů bude u různých provozovatelů různé s ohledem na používaný CI.

Tabulka 23: Porovnání výsledků simulací ze simulátoru A320 a ATC (celý přilet)

Celý přilet (LOMKI-RW24) – Simulátor A320 a simulátor Escape ATC Light						
	Doba letu [mm:ss]		Vzdálenost [NM]		Spotřebované palivo [kg]	
	A320	ATC	A320	ATC	A320	ATC
Scénář 1	12:43 (763 s)	13:05 (780 s)	62,4	62,4	284	263
Scénář 2	16:10 (970 s)	17:45 (1065 s)	75,8	75,8	414	387
Scénář 3	18:11 (1091 s)	19:25 (1165 s)	75,8	75,8	390	412

V tabulce níže (viz Tabulka 24) jsou porovnány výsledky ze simulací klesání pomocí simulátoru A320 a výkonnostní databáze BADA. Simulace prostřednictvím BADA byly pro všechny tři scénáře poměrně podobné, zatímco data ze simulátoru A320 se výrazně v závislosti na scénáři lišila.

Nejmarkantnější rozdíl modelovaných dob letu se projevil u 1. scénáře a činí 4 minuty 21 sekund (klesání trvalo podle databáze BADA o 46 % déle).

Tabulka 24: Porovnání výsledků simulací ze simulátoru A320 a BADA (pouze klesání)

Pouze klesání (TOD-RW24) – Simulátor A320 a databáze BADA						
	Doba letu [mm:ss]		Vzdálenost [NM]		Spotřebované palivo [kg]	
	A320	BADA	A320	BADA	A320	BADA
Scénář 1	9:25 (565 s)	13:46 (826 s)	43,4	57,94	148	156
Scénář 2	11:04 (664 s)	13:46 (826 s)	44,5	57,94	207	156
Scénář 3	13:47 (787 s)	15:02 (902 s)	50,7	59,66	246	159

I přes značné rozdíly ve výsledcích jednotlivých scénářů, naměřená data potvrzují, že nejméně náročným scénářem nad dobu letu, spotřebu paliva a tím pádem i na provozní náklady dopravce byl 1. scénář, kde bylo letadlo zkráceno z bodu LOMKI na bod ERASU a následně vektorováno na 6 NM finále.

Nejdelším a nákladnějším by byl let ve 3. scénáři, kde simulační prostředky namodelovaly nejdelší dobu letu během klesání i největší celkovou spotřebu paliva.

5 Diskuse

V průběhu zpracování této práce a zejména v průběhu prováděných měření se vyskytlo několik limitací jak v praktické části a použitém vybavení, tak v metodice. Během zpracování byly zjištěny odlišnosti chování letounu v simulátoru oproti skutečnému stroji. Limitací jednotlivých měření se tak stala mimo jiné výdrž nabití použité kamery a kapacita jejího úložiště. Měření na simulátoru tak bylo časově velmi náročné a vyžadovalo mnohé opakování z důvodu neúspěšnosti pokusu.

Jednou z limitací použitého simulátoru byl výpočet sestupové roviny na základě vloženého letového plánu do FMS. Vypočítaná sestupová rovina pravděpodobně počítá pouze s úhlem klesání korespondujícím s počáteční rychlostí a nebere v úvahu rychlostní omezení během přiletu, ačkoli jsou zadána v FMS. Z tohoto důvodu bylo nutné během zpomalení vysunout spoilery, aby se letoun při zpomalování nedostával nad sestupovou rovinu a dosáhl bodu konečného přiblížení (FAF) PR24F ve správné výšce. Skutečný letoun by pravděpodobně dokázal správně spočítat sestupovou rovinu a k ní určit odpovídající bod vrcholu klesání (TOD) s ohledem na všechna omezení, jak je uvedeno ve zdroji od společnosti Airbus.

Dalším omezením bylo, že koncepce prováděného experimentu uvažovala pouze scénáře letu v AoR (oblast odpovědnosti) řídicího letového provozu stanoviště APP Praha, a tudíž případné omezení rychlosti v dřívější fázi letu není obsaženo ve scénářích. Sestup a řízení dopředné rychlosti začíná vždy na LOMKI (prvním bodu STAR LOMKI 8S).

Důležitým poznatkem je, že postupy leteckých společností a reálná praxe pilotů výrazně ovlivňují průběh a efektivitu letu. Nastavení rychlosti závisí zejména na nastavení interních provozních postupů společnosti, individuálnímu přístupu posádky k řízení letounu a v neposlední řadě na zkušenostech dané posádky.

Nejuniverzálnější software a hardware je simulátor Airbusu A320. Při upgradování softwaru v FSM, který by dokázal přesněji vypočítat sestupovou rovinu by se jednalo o nejlépe využitelný simulační prostředek. Toto by bylo umocněno, pokud byla na měření přizvána skutečná posádka s typovou kvalifikací na Airbus 320.

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat a zhodnotit vliv řízení rychlosti ze strany Air Traffic Control na spotřebu paliva a dobou letu a identifikovat klíčové prvky pro snížení těchto parametrů v TMA Praha.

V rámci zpracování tohoto úkolu byly nejprve analyzovány faktory mající vliv na efektivitu letu ve fázi přiblížení v souvislosti s řízením rychlosti, jak z pohledu ŘLP, tak z pohledu leteckého dopravce. Bylo provedeno dotazníkové šetření, které vedlo k identifikaci klíčových faktorů, vedoucí řídicí letového provozu (ATCO) k zahájení řízení dopředné rychlosti letadel. Faktory byly identifikovány pro různé fáze přiblížení letadla. Dotazník také vedl k upřesnění, na jakých přibližně místech k začátku řízení dopředné rychlosti dochází. Mezi hlavní výsledky dotazníkového šetření také patří ověření používání určitých frází řídicími letového provozu a identifikace používaných instrukcí pro řízení dopředné rychlosti.

Společně s informacemi obsaženými v rešeršní části práce byly vytvořeny scénáře, které byly otestovány za využití třech simulačních prostředků – simulátoru letounu A320 dostupným na ÚLD Fakulty dopravní ČVUT; simulátoru Escape ATC Light a výkonnostní databáze BADA.

Během zpracování teoretické části a praktických simulací jsem zaznamenal následující omezení a ovlivňující faktory: Let (a případné omezení rychlosti) mimo AoR není obsažen ve scénářích, sestup a řízení dopředné rychlosti začíná vždy až na bodu na LOMKI, což neumožňuje zahrnutí případných dřívějších omezení rychlosti. Také byla zjištěna neshoda v FMS systému simulátoru letounu A320 a skutečného stroje ohledně na výpočtu sestupové roviny.

I přes limitace byly na základě výsledků simulací scénářů v kapitole 4. prezentovány výsledky. Byly zjištěno, že postupy řízení rychlosti mají znatelný vliv na dobu letu a spotřebu paliva, které se odráží v provozních nákladech leteckého dopravce. Také byly popsány rozdíly ve výstupech z různých simulačních prostředků.

Zdroje

- [1] Letecká informační příručka AIP ČR. [online]. 2023. [cit 2022-12-18]. Dostupná z: https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm
- [2] AIRBUS. Flight Operations Support & Line Assistance: Getting to grips with the cost index. Issue II. 1998.
- [3] AIRBUS. The Airbus safety magazine: Safety First: Control Your Speed Series. Product Safety department. Blagnac Cedex, France. 2018
- [4] ALEXANDER, S. et al. Aircraft performance modeling for air traffic management applications. 5th U.S.A./Europe Seminar on ATM R&D, Budapest, Hungary, 2003.
- [5] BOEING. Fuel Conservation Strategies: Cost Index Explained. Aero Quaterly [online]. 2007. [cit. 2022-10-31] Dostupné z: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_2_07/article_05_2.html
- [6] CAE Oxford Aviation Academy UK. ATPL Ground Training Series: Instrumentation. Singapore. 2014.
- [7] CEVELA, Adam. Instruktorická příručka simulátoru Airbus A320. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta Dopravní. 2019. [A2]
- [8] CSANDA, J. Using BADA 4 Performance Model for Aircraft Simulation, Bachelor Thesis, Bachelor program: Cybernetics and Robotics Branch of Study: Systems and Control, Czech Technical University in Prague, CVUT, 2018.
- [9] DVOŘÁK, J. CHLEBEK, J. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1: Letecký zákon a postupy ATC (010 10). Akademické nakladatelství CERM, Brno. 2006.
- [10] EUROPEAN UNION. EU Regulation 2015/340: Easy Access Rules for Air Traffic Controllers' Licensing and Certification. 2019
- [11] EUROCONTROL. BADA: Base of Aircraft Data [online]. [cit. 2023-1-16]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/model/bada>
- [12] EUROCONTROL. News: New version of ESCAPE ATC simulator will facilitate academic research worldwide. [online]. 2019. [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/news/new-version-escape-atc-simulator-will-facilitate-academic-research-worldwide>
- [13] EUROCONTROL. The Manual: Airport CDM Implementation. Brusel. 2017. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/airport-collaborative-decision-making-cdm-implementation-manual>
- [14] JEPPESEN. Introduction to Jeppesen Navigation Charts. Englewood. 2012

- [15] Letecký předpis L 4444: Postupy pro letové navigační služby: Uspořádání letového provozu. 439/2011-220-SP/1. [online, cit. 2023-02-05] Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>
- [16] Letecký předpis L 8168 I: Provoz letadel – Letové postupy. 127/2018-220-LPR/3 [online, cit 2023-03-22]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-8168i/index.htm>
- [17] Nuic, A. et. al. BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems. 2010. DOI: 10.1002/acs.1176. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/229703718_BADA_An_advanced_aircraft_performance_model_for_present_and_future_ATM_systems
- [18] PROSIM-TS. ProSim: A320 Professional Simulator Suite [online]. ProSim Aviation Research B.V., 2023. [cit. 2023-3-25]. Dostupné z: <https://prosim-ar.com/prosima320/>
- [19] SESAR. D3.3 – DYN-CAT Function Experimental Implementation Report. 1. vydání. 2022
- [20] SESAR. D5.1 – DYN-CAT Advanced Continuous Descent Operations – Recommendations and Roadmap Report. 1. vydání. 2022
- [21] SESAR. Dynamic Configuration Adjustment in the TMA (DYN-CAT) [online]. 2022 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://www.dlr.de/ft/en/desktopdefault.aspx/tabid-17217/>
- [22] SKYBRARY. Basic Controller Techniques: Speed Control. [online]. 2023. [cit. 2023-01-12] Dostupné z: <https://www.skybrary.aero/articles/basic-controller-techniques-speed-control>
- [23] TOGA Projects. Flight Operations: Cost Index Database v1.3.1. 2018
- [24] UNIVERSAL AVIONICS SYSTEM CORPORATION. Understanding Required Navigation Performance (RNP) and Area Navigation (RNAV) Operations. White Paper doc. no: WHTP-2013-16-10. 2013
- [25] VÁLA, P. Využití BADA modelů pro malé civilní letouny, Vysokoškolská závěrečná práce, Czech Technical University in Prague, CVUT, 2013.
- [26] WIZZAIR. Operational Flight Plan: W6_6923_15Jan2023_KIV_PRG. 2023