



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

**VYUŽITÍ TAŽNÝCH VOZIDEL A AUTONOMNÍCH SYSTÉMŮ PRO
POJÍŽDĚNÍ LETADEL
USE OF TOWING VEHICLES AND AUTONOMOUS SYSTEMS
FOR AIRCRAFT TAXIING**

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojkách

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Slobodan Stojić, Ph.D.

Filip Lidický

Praha 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Filip Lidický

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Využití tažných vozidel a autonomních systémů pro pojiždění letadel**

Název tématu (anglicky): Use of Towing Vehicles and Autonomous Systems for Aircraft taxiing

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cíl práce: Zhodnoťte možnosti zavedení tažných vozidel nebo jiných autonomních systémů pro pojiždění letadel a stanovte k tomu potřebné požadavky na letištní infrastrukturu a vybavení
- Analyzujte hlavní výhody a nevýhody současného způsobu pojiždění letadel
- Proveďte analýzu autonomních vozidel a vozidel řízených člověkem a porovnejte je
- Stanovte požadavky na letištní infrastrukturu a vybavení
- Proveďte výběr vhodného systému v podmínkách LKPR
- Analyzujte hodnoty prvotní investice v případě implementace vámi vybraného systému



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ACI, Autonomous Vehicles and Systems at Airports Report
Norman J., Ashford, Salej Mumayiz, Paul H. Wright.: Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports, 4th Edition
EASA CS-ADR-DSN Aerodromes Design

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Slobodan Stojić, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
(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 bakalářské práce: **8. srpna 2022**
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



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Filip Lidický
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 2. prosince 2021



Abstrakt

Práce je zaměřena na alternativní systémy pojiždění, tedy systémy, které umožní letadlům pojižďet bez nutnosti využití hlavních motorů. Letecké motory nejsou při pojiždění efektivně využívány a spalují velké množství paliva. Několik společností se zaměřilo na řešení této problematiky a představilo své vlastní systémy, které jsou v této práci představeny a porovnány. Cílem je zhodnotit výsledky z porovnání a s jejich pomocí určit nejvhodnější ze systémů pro využití v prostředí Letiště Václava Havla Praha. Hlavním kritériem pro srovnání se staly modely spotřeby paliva v různých scénářích. Pomocí těchto modelů pak mohl být každý systém kvantifikován a objektivně porovnán. Výsledkem práce jsou potenciální úspory na palivu, které by mohly jednotlivé systémy přinést a také jejich zhodnocení proveditelnosti a využitelnosti na Letišti Praha.

Klíčová slova

alternativní pojiždění, spotřeba paliva, WheelTug, TaxiBot, Electric Green Taxiing System, Aircraft Towing System, Letiště Václava Havla Praha



Abstract

This work focuses on alternative taxiing systems, i.e., systems that will enable aircraft to taxi without using the main engines. Aircraft engines are used inefficiently during taxi process, and they burn substantial amounts of fuel. Several companies came up with a solution to this problem and introduced their own taxiing systems, which are introduced and compared in this work. The goal is to evaluate the results of these comparisons and determine the most suitable system for use in the environment of the Václav Havel Airport Prague. Fuel consumption models in different scenarios became the main criteria for comparisons. Using these models, each system could be then quantified and objectively compared. The results of this work are potential fuel and cost savings that each system could bring, as well as an evaluation of feasibility and usability at the Prague Airport.

Keywords

alternative taxiing, fuel consumption, WheelTug, TaxiBot, Electric Green Taxiing System, Aircraft Towing System, Václav Havel Airport Prague



Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se jakkoliv podíleli na vzniku této bakalářské práce. V první řadě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Slobodanu Stojíčkovi, Ph.D. Dále bych poděkoval společnosti Letiště Praha a.s., která poskytla cenná data pro tuto práci a speciální dík pak patří Ing. Petru Líkařovi a Ing. Miroslavu Charvátovi. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat amsterdamskému Letišti Schiphol, jejichž tiskové oddělení ochotně poskytlo důležité studie. Velké díky chci dát také své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia bez výjimky podporovali.




Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití tažných vozidel a autonomních systémů pro pojíždění letadel* vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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).

Praze dne 08. srpna 2022


.....
Podpis



Obsah

Úvod	14
1. Problémy spojené s pojižděním	15
1.1. Náklady za palivo.....	16
1.2. Zplodiny.....	17
1.3. Hluk.....	17
1.4. Poškození cizími objekty (FOD).....	18
1.5. Výhody standardního pojiždění.....	18
2. Alternativní systémy pojiždění	19
2.1. WheelTug.....	19
2.2. Electric Green Taxiing System (EGTS).....	22
2.3. TaxiBot.....	23
2.4. Aircraft Towing System (ATS).....	26
2.5. Pojiždění s jedním motorem.....	28
2.6. Srovnání systémů.....	29
3. Řešený problém	31
4. Letiště Václava Havla Praha	32
4.1. Základní informace.....	32
4.2. Vývoj Letiště Václava Havla Praha.....	32
4.3. Konfigurace odbavovacích ploch a stojánek.....	33
4.4. Konfigurace vzletových a přistávacích drah.....	34
4.5. Pojiždění a konfigurace pojezdových drah.....	35
4.6. Provoz.....	37
5. Časy pojiždění	38
6. Model spotřeby paliva	40
6.1. Postup řešení.....	40
6.1.1. Parkovací stání/stojánka.....	40
6.1.2. Letoun.....	41
6.1.3. Speciální postupy.....	41



6.2. Tabulka časů	42
6.3. Tabulka spotřeby	43
6.4. Model – Dráha 24	45
6.5. Model – Dráha 06	47
6.6. Model – dráha 12.....	49
6.7. Model – dráha 30.....	51
7. Alternativní model – paralelní postupy	53
7.1. Alternativní model – dráha 24.....	55
7.2. Alternativní model – dráha 06.....	56
7.3. Alternativní model – dráha 12.....	57
7.4. Alternativní model – dráha 30.....	58
8. Výsledky.....	59
8.1 Graf spotřeby paliva	59
8.2. Finanční úspory	60
9. Implementace	62
9.1. TaxiBot	62
9.1.1. Instalace.....	62
9.1.2. Odpojení a návrat.....	63
9.1.3. Školení	65
9.2. ATS.....	66
9.2.1. Instalace.....	66
9.2.2. Návrat vozíků	67
9.2.3. Školení	67
9.3. WheelTug a EGTS	68
10. Náklady na implementaci a provoz	69
11. Zhodnocení výsledků.....	72
12. Závěr	74
13. Zdroje	76

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj ceny ropy (červená) a leteckého paliva (modrá). Cena v USD za barel [6].....	16
Obrázek 2: Mapa stání odbavovací plochy SEVER [14]	34
Obrázek 3: Satelitní snímek s vyznačenými drahami [16].....	35
Obrázek 4: Letištní mapa [14].....	36
Obrázek 5: Systém WheelTug instalovaný v předřovém podvozku letadla [19]	21
Obrázek 6: Ovládací panel systému WheelTug na středovém panelu kokpitu [19]	21
Obrázek 7: Systém EGTS instalovaný na hlavním podvozku letadla Airbus A320 [22]	23
Obrázek 8: TaxiBot (NB) táhnoucí letadlo Airbus A321 [26].....	25
Obrázek 9: TaxiBot – systém uchycení předřového podvozku na otočnou platformu [27]	26
Obrázek 10: ATS vozík s platformou pro uchycení předřového kola [28]	27
Obrázek 11: ATS vozík jedoucí po kolejnici v zapuštěném kanále, táhnoucí letadlo [28]	28
Obrázek 12: Vyobrazení jednotlivých sektorů z tabulky 4 na mapě [16].....	39
Obrázek 13: Mapa trasy pojíždění letadla k dráze 24 – vzdálenost 1157 m [16].....	46
Obrázek 14: Mapa trasy pojíždění letadla k dráze 06 – vzdálenost 2968 m [16].....	48
Obrázek 15: Mapa trasy pojíždění letadla k dráze 12 – vzdálenost 1085 m [16].....	50
Obrázek 16: Mapa trasy pojíždění letadla k dráze 30 – vzdálenost 2844 m [16].....	52
Obrázek 17: Graf spotřeby paliva za čas při postupných procesech [autor].....	59
Obrázek 18: Graf spotřeby paliva za čas při paralelních procesech [autor].....	59
Obrázek 19: Odmrazovací plocha 1 [5].....	64



Seznam tabulek

Tabulka 1: Průměrné časy poježdění na vybraných letištích [3]	15
Tabulka 2: Kapacity jednotlivých drah [15]	34
Tabulka 3: Podíl konkrétních typů letadel na LKPR za rok 2019 [17].....	37
Tabulka 4: Srovnání vybraných parametrů systémů [18]	29
Tabulka 5: Medián časů poježdění pro jednotlivé dráhy a sektory [30]	38
Tabulka 6: Data pro Boeing 737 – MAX [31][32].....	41
Tabulka 7: Hodnoty časů pro model dráhy 24 [autor]	45
Tabulka 8: Hodnoty spotřeby pro dráhu 24 [autor].....	46
Tabulka 9: Hodnoty časů pro model dráhy 06 [autor]	47
Tabulka 10: Hodnoty spotřeby pro model dráhy 06 [autor]	47
Tabulka 11: Hodnoty časů pro model dráhy 12 [autor]	49
Tabulka 12: Hodnoty spotřeby pro model dráhy 12 [autor]	49
Tabulka 13: Hodnoty časů pro model dráhy 30 [autor]	51
Tabulka 14: Hodnoty spotřeby pro model dráhy 30 [autor]	51
Tabulka 15: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 24 [autor]	55
Tabulka 16: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 24 [autor]	55
Tabulka 17: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 06 [autor]	56
Tabulka 18: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 06 [autor]	56
Tabulka 19: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 12 [autor]	57
Tabulka 20: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 12 [autor]	57
Tabulka 21: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 30 [autor]	58
Tabulka 22: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 30 [autor]	58
Tabulka 23: Finanční úspory na palivu – sériové procesy [6].....	60
Tabulka 24: Finanční úspory na palivu – paralelní procesy [6]	61
Tabulka 25: Srovnání nákladů za palivo vozidla TaxiBot proti potenciálním úsporám systému [33][34].....	70
Tabulka 26: Spotřeba navíc vlivem váhy systémů [35]	71



Seznam rovnic

Rovnice 1: čas pojíždění	41
Rovnice 2: spotřeba APU	43
Rovnice 3: spotřeba motorů	44
Rovnice 4: spotřeba motorů zahříváním.....	44
Rovnice 5: celková spotřeba	44
Rovnice 6: Čas APU – paralelní procesy.....	53
Rovnice 7: Spotřeba motorů – paralelní procesy.....	54



Seznam použitých zkratek

AIP Aeronautical Information Publication (letecká informační příručka)

APU Auxiliary Power Unit (Pomocná motorová jednotka)

EASA European Union Aviation Safety Agency (Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví)

FAA Federal Aviation Administration (Federální letecká správa)

FOD Foreign Object Damage (Poškození cizím objektem)

IATA International Air Transport Association (Mezinárodní asociace leteckých dopravců)

ICAO International Civil Aviation Organization (Mezinárodní organizace pro civilní letectví)

NB Narrow-Body Aircraft (úzkotrupý letoun)

RWY Runway (Přistávací a vzletová dráha)

SET Single Engine Taxi (Pojíždění s jedním motorem)

TWY Taxiway (Pojezdová cesta)

USD United States Dollar (Americký dolar)

WB Wide-Body Aircraft (širokotrupý letoun)



Úvod

Letecká doprava je i v dnešní době stále závislá na fosilních palivech a spotřeba leteckých motorů, je navzdory velkému technologickému pokroku v oblasti efektivity motorů, velmi velká. Náklady na palivo tvoří značnou část výdajů provozovatelů aerolinek a obzvláště v dnešní době, kdy je kladen důraz na snižování emisí a dodržování přísných ekologických standardů, je příhodné hledat způsoby, jak jednoduše a efektivně snížit spotřebu paliva. Nabízí se proto možnost snížit spotřebu paliva právě při pojiždění, kdy jsou motory neefektivně využívány pro pohyb letadla po pojezdových drahách. Při použití alternativního způsobu pojiždění bez nutnosti využití vlastních motorů by mohla být spotřeba značně snížena. Takové řešení by mělo za následek jednak ušetření peněz za palivo pro provozovatele, ale i za údržbu motoru díky nižšímu opotřebením mechanických částí. Mezi dalšími výhodami může být i nižší produkce emisí a hluku, a zároveň i snížení nebezpečí nasátí cizího předmětu (FOD). Dalším faktorem, který podporuje nalezení alternativního systému pojiždění, je vize Flight Path 2050. Jedná se o vizi vydanou evropskou komisí, kde je mimo jiné zmíněno právě „zelené/čisté pojiždění“ jako jeden z cílů, který by měl být v leteckém průmyslu dosažen roku 2050. [1] [2]

Tato konkrétní práce se zabývá právě touto problematikou v prostředí Letiště Václava Havla Praha (v práci zkracováno na Letiště Praha pro lepší přehlednost textu). Práce se snaží podrobněji popsat problematiku alternativního pojiždění a představit dostupná řešení. Následuje pak srovnání jednotlivých řešení pomocí různých metod, pomocí kterých je pak zvolen nejvhodnější systém pro použití v podmínkách Letiště Praha. Pro potřeby srovnání systémů byly vytvořeny konkrétní modely pro dané letiště, které kvantifikovali každý ze systémů. Tyto modely byly, stejně jako další aspekty, konzultovány s odborníky z Letiště Praha, kteří potvrdili validitu těchto postupů.



1. Problémy spojené s pojížděním

Pojíždění je definováno jako pohyb letadel na povrchu letiště s použitím vlastní síly, s výjimkou vzletu a přistání. Většina pojíždění dopravních letadel v dnešní době probíhá za použití vlastních motorů při tahu 7 %. Směr je pak ovládán pomocí „volantu“ (ang. tiller), jehož otočením se natáčí předový podvozek.

Pojíždění lze rozdělit na dvě části. První je taxi-in neboli pojíždění od přistání na místo parkování. Druhá část je taxi-out, což je pojíždění od místa parkování ke vzletu. V tabulce 1 jsou pro přiblížení problematiky průměrné časy pojíždění na vybraných světových letištích v letní sezóně za rok 2019 a přibližná spotřeba paliva v kilogramech za jednu otočku (taxi-in a taxi-out) pro letoun Boeing 737 MAX s motory CFM International LEAP-1B. Spotřeba byla počítána pro dané motory při tahu 7% (tah pro pojíždění). [3]

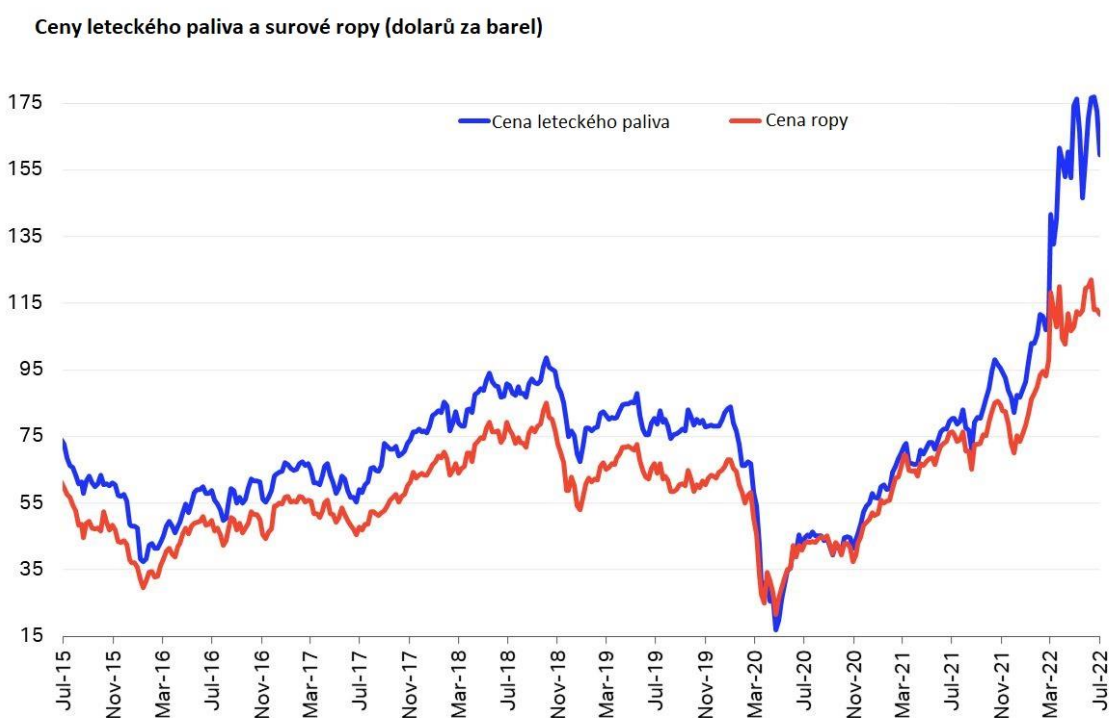
Tabulka 1: Průměrné časy pojíždění na vybraných letištích [4]

	Taxi-in [min]	Taxi-out [min]	Spotřeba paliva [kg]
(KJFK) New York	18,4	33,6	611,5
(VIDP) Delhi	12,1	25	436,3
(LFPG) Paris CDG	9,8	16	303,4
(EDDF) Frankfurt	9,1	14,1	272,8
(EHAM) Amsterdam Schiphol	8,7	14,2	269,3
(EGLL) London Heathrow	8,5	22,6	365,7
(LKPR) Praha	5,4	11,9	203,4

Z tabulky 1 je tedy zřejmé, že i při pojíždění letadlo spotřebuje značné množství paliva. V případě pojíždění bez hlavních motorů tak může být tato hodnota značně nižší. Množství paliva se pak zásadně odvíjí od daného letiště a jeho velikosti a s tím spojenou dobou pojíždění. Letiště Václava Havla Praha je oproti letištím jako New York JFK znatelně menší, a tak i časy pojíždění jsou kratší. Zároveň je v tabulce vidět značný rozdíl mezi průměrnými časy taxi-in a taxi-out, kdy taxi-out časy dosahují až dvojnásobných hodnot oproti taxi-in.

1.1. Náklady za palivo

Letecké společnosti mají velké příjmy, ale zároveň také velké provozní náklady. Samotné náklady na palivo pak mohou činit více než čtvrtinu veškerých provozních nákladů. Čistá zisková marže v letecké dopravě je z těchto důvodů celosvětově kolem 3–4 %. Pro lepší představu – zisk aerolinky z jednoho pasažéra je pouze v řádech jednotek amerických dolarů (USD) [5]. To z letecké dopravy činí jedno z nejméně ziskových odvětví citlivé na výkyvy cen pohonných hmot. Proto je pro letecké společnosti žádoucí co nejvíce snížit náklady, čehož lze docílit, mimo jiné, právě snížením spotřeby paliva. Vývoj cen paliva je znázorněn na následujícím obrázku. [6]



Zdroj: S&P Global, Refinitiv Eikon

Obrázek 1: Vývoj ceny ropy (červená) a leteckého paliva (modrá). Cena v USD za barel [7]

Tento graf (obrázek 1) přibližuje vývoj ceny ropy a také nestálost hodnoty. Aktuálně dosahuje cena ropy rekordních hodnot, což se samozřejmě odráží i v ceně leteckého paliva. [7]



1.2. Zplodiny

Dalším problémem aktuálního způsobu pojiždění, který je spojeným právě se spotřebou paliva je produkce zplodin vznikajících při spálení paliva, a to konkrétně CO₂ (oxid uhličitý), NO_x (oxidy dusíku), CO (oxid uhelnatý), HC (uhlovodíky) a PM (pevné částice). Zejména kvůli nízkému výkonu motorů během pojiždění dochází k nedokonalému spalování paliva a podíl CO a HC vůči množství spáleného paliva, je tedy při pojiždění vyšší než u letu v hladině, kdy motory fungují efektivněji.

Obzvláště v dnešní době, kdy je na snižování emisí kladen větší důraz než kdy předtím, je tento faktor zásadní. V blízké budoucnosti je pravděpodobné, že zaměření na produkci emisí leteckým průmyslem bude ještě větší, než tomu bylo doposud. Již dnes existuje vize Evropské Unie pro civilní letectví, kde je jeden z cílů právě bezemisní pojiždění, a to do roku 2050. Dalším faktorem pro snížení emisí jsou takzvané emisní povolenky, kdy si aerolinky musejí kupovat „povolení“ vypouštět oxid uhličitý. S těmito povolenkami lze také mezi dopravci obchodovat. [8] [9]

1.3. Hluk

Proudové motory i při nízkých otáčkách vytváří značný hluk, který negativně ovlivňuje pracovníky, kteří se nacházejí v blízkosti letadla. Hladina hluku na odbavovací ploše se pohybuje kolem 85 dB a mohou i přesahovat 100 dB a pracovníci jsou tak povinni nosit chrániče sluchu. Pokud by letadla pojižděla bez využití vlastních motorů, hladina hluku na odbavovací ploše by se znatelně snížila a nutnost nosit ochranné prostředky by mohla opadnout, což by mohlo pro pozemní personál přinést lepší pracovní podmínky. [10]



1.4. Poškození cizími objekty (FOD)

Pod pojmem cizí objekt se rozumí jakékoliv těleso, které je schopno způsobit škodu na letadle, vybavení nebo může způsobit zranění pracovníkům, pasažérům a dalším lidem. Mezi cizí objekty patří části letadel, nástroje, pozemní vozidla, předměty pasažérů, asfalt, beton a další. Při standardním pojiždění, kdy se letadlo pohybuje pomocí běžících motorů, tak vzniká jisté riziko, že se právě do motoru může nějaký cizí objekt dostat a následně ho poškodit, případně může být tento objekt motory odhozen a může poškodit letištní vybavení či zranit člověka. [11]

V téměř 50 % případů se FOD stane na vzletové či přistávací dráze. Při pojiždění je tato hodnota 40 % [12]. Při využití systému pojiždění bez nutnosti běžících motorů by tak toto, stále vysoké číslo mohlo být nižší. Ne ve všech případech FOD však dojde k poškození motorů, ve většině případů se jedná o poškození pneumatik letadla, na což by pojiždění bez motorů nemělo žádný vliv. Poškození motorů vlivem FOD je však, i přes nižší počet případů, finančně několikanásobně náročnější. [12]

1.5. Výhody standardního pojiždění

Zmiňované byly pouze nevýhody a případné problémy spojené s aktuálním stavem pojiždění. Standardní způsob pojiždění má však bezpochyby i své výhody. Pokud letadlo spoléhá při pojiždění jen na výkon vlastních motorů, stává se tak letadlo nezávislé a nepotřebuje žádné externí zařízení pro pohyb. S využíváním hlavních motorů letadla je spojena i další výhoda. Ačkoliv jsou tyto motory na zemi neefektivní, mají vysoký výkon a letadlo je díky tomu schopné během pojiždění dosáhnout vysokých rychlostí a akcelerací. Motory se zároveň během pojiždění zahřívají a před vstupem na vzletovou dráhu jsou již zahřáté na provozní teploty. Není tedy potom nutné strávit další čas čekáním na dosažení provozních teplot.

Konvenční způsob pojiždění je využíván celosvětově a posádky jsou navyklé a naučené takto pojiždět. Stejně tak i aktuální letištní infrastruktura je navržena právě pro standardní druh pojiždění.



2. Alternativní systémy pojiždění

Pod pojmem alternativní systémy pojiždění (někdy také udržitelné pojiždění) se rozumí takový systém či řešení, které umožňuje letadlu pojiždět bez použití vlastních motorů. Tyto systémy můžeme rozdělit na dva typy, kterými jsou tzv. on-board a ground-based/external systémy.

On-board (palubní) systémy chápeme jako zařízení, které je instalováno přímo do samotných systémů letadla a je jeho pevnou součástí. Jedná se tak například o elektromotor, který letadlu umožňuje pohyb bez nutnosti hlavních motorů. Výhodou On-board řešení je úplná samostatnost letounu, kdy není potřeba žádných externích zařízení k pushbacku a pojiždění. Mezi tyto systémy spadá: WheelTug a Safran-Honeywell EGTS

Ground-based (pozemní) systémy jsou taková zařízení, která nejsou pevnou součástí letadla a dochází tak k jejich připojení k letadlu před začátkem pojiždění a následnému odpojení od letadla před vzletem. Výhodou těchto pozemních systémů je, že letadlo nenese dodatečnou zátěž v podobě např. elektromotoru. Do této kategorie lze zařadit systémy TaxiBot a ATS. [2] [13]

2.1. WheelTug

Systém WheelTug je plně elektrický systém, kdy je v předovém podvozku instalována dvojice elektromotorů, které umožňují pohyb letounu bez použití hlavních motorů (obrázek 5). Systém WheelTug vyvíjí stejnojmenná společnost vlastněná firmou Borealis Exploration, zabývající se výzkumem a vývojem nových technologií včetně elektromotorů. První verze systému byla testována již v roce 2005 na vyřazeném letadle Boeing 767. V roce 2010 společnost WheelTug navázala spolupráci s Letištěm Praha v dalším vývoji systému. Zároveň byly provedeny další testy na letounu Boeing 737 právě na pražském letišti. WheelTug měl do konce roku 2021 obdržet certifikaci od FAA, která je však i v druhé polovině roku 2022 stále v řešení. Aktuálně se systém vyvíjí pouze pro Boeing 737 a Airbus A320.

Asynchronní elektromotory v předovém podvozku umožňují letadlu jak dopředný, tak i zpětný pohyb, a to rychlostí až 7kt, což je stále značně menší rychlost oproti standardnímu pojiždění, kdy rychlost může dosahovat až 30kt. Výrobce uvedl i možnost, kdy by při pojiždění hlavní motory běžely pouze na volnoběh a rozjezd z nulové rychlosti by zajišťovaly elektromotory. Ovládání rychlosti a směru rotace elektromotorů je vyřešeno pomocí malého ovládacího panelu, který je instalován do středového panelu



v kokpitu (obrázek 6). Pro vyšší bezpečnost při manévrování WheelTug nabízí instalaci dvou 360° kamerových systémů.

Elektrická energie pro pohon elektromotorů je zajištěna pomocnou motorovou jednotkou neboli APU (auxillary power unit). Jedná se o malý turbínový motor, který je napojen na generátor elektrické energie. APU je u dopravních letadel umístěno v zadní části trupu a poskytuje energii v případě, kdy letadlo nemá zapnuté motory či není připojeno k pozemním zdrojům. Zároveň poskytuje stlačený vzduch pro start hlavních motorů.

Váha celého systému je kolem 130 kg a samotná instalace celého systému by měla proběhnout během jedné či dvou nocí. Demontáž je pak také možná v řádech hodin. WheelTug bude provozovatelům pronajímán formou platby za každou hodinu používání systému. V rámci pronájmu budou mít provozovatelé k dispozici také veškerou podporu, servis a školení posádek.

Nespornou výhodou letadla vybaveného systémem WheelTug je manévrovatelnost, kdy se letoun může otáčet na ploše kolem své vlastní vertikální osy či provádět další jinak obtížné a neproveditelné manévry. Dalším benefitem, a zároveň největším potenciálem systému WheelTug, je pak schopnost provádět pushback bez nutnosti využití speciálních letištních vozidel, což by vedlo k úspoře času a nákladů spojených právě s procesem pushbacku. Pushback je proces, kdy je letadlo vytlačeno od stojánky na pojezdovou dráhu, na které letadlo následně zapíná motory a pojíždí již pomocí hlavních motorů. Vytlačení od stojánky je většinou nutné v případě, kdy letadlo stojí čelem k budově terminálu a dopředný pohyb tedy není možný. Zároveň legislativa z bezpečnostních důvodů neumožňuje ve většině případů pro pohyb dozadu využívat zpětného tahu motorů. [2] [13] [14]



Obrázek 2: Systém WheelTug instalovaný v předovém podvozku letadla [14]



Obrázek 3: Ovládací panel systému WheelTug na středovém panelu kokpitu [14]



2.2. Electric Green Taxiing System (EGTS)

V roce 2011 navázaly společnosti Safran a Honeywell Aerospace spolupráci na společném projektu Electric Green Taxiing System, zkráceně EGTS. Jedná se o on-board systém, jehož řešení je podobné systému WheelTug, pouze s rozdílem, že umístění elektromotorů je v případě EGTS na hlavním podvozku (obrázek 7). První testy probíhaly na letadle Airbus A320 a projektu se dostávalo podpory od provozovatelů i výrobců letadel. V roce 2015 bylo ohlášeno první zdržení ve vývoji EGTS a novým cílem pro uvedení do provozu se stal konec roku 2018. Roku 2016 došlo nakonec ke zrušení spolupráce obou společností z důvodu nízkých cen paliva a dalších faktorů. Společnost Safran poté navázala spolupráci s výrobcem letadel Airbus s cílem vytvořit EGTS pro model A320. V roce 2019 byla tato spolupráce ze strany společnosti Airbus ukončena.

Stejně jako u WheelTug systém potřebuje k provozu elektrickou energii a tudíž i zapnuté APU. Do dvojice kol hlavního podvozku je instalován elektromotor s redukční převodovkou. Tato instalace elektromotoru do kol hlavního podvozku namísto příďového sebou přináší několik výhod. Vzhledem k tomu, že hlavní podvozek nese většinu váhy letadla (90 % celé váhy) a poskytuje větší styčnou plochu, tak toto řešení přináší lepší trakční vlastnosti a tím i lepší vlastnosti při jízdě v nepříznivých podmínkách jako je sníh, déšť či náledí. Další výhodou je vyšší výkon elektromotorů a tím i vyšší rychlost pojíždění, a to až 20 uzlů.

Celý systém je však s váhou 400 kg více než dvojnásobně těžší oproti systému WheelTug a instalace v hlavním podvozku má i další nevýhody. Umístění elektromotoru je problematické také z důvodu nedostatku místa v kolech, jelikož jsou zde již umístěny brzdy. S tím souvisí i další problém – elektromotor by mohl ovlivnit chlazení brzd a zároveň produkuje i vlastní teplo a je tedy nutné chlazení pomocí aktivních větráků. Instalace systému by byla také náročnější a vyžadovala by více úprav na letadle. Ovládání elektromotorů je řešené podobně jako u systému WheelTug, a to ovládacím panelem v kokpitu. [2] [13] [15] [16]



F-HGNT | Copyright by Yves-Q | 2013-06-21 | LFPB | Airport-Data.com

Obrázek 4: Systém EGTS instalovaný na hlavním podvozku letadla Airbus A320 [17]

2.3. TaxiBot

Aktuálně je k dispozici verze TaxiBotu (NB) pouze pro úzkotrupá letadla. Úzkotrupá letadla jsou taková dopravní letadla, která mají nejvýše 6 sedadel vedle sebe s jednou uličkou a šířka trupu je maximálně 4 metry. Mezi typická úzkotrupá (narrow-body, zkratka NB) letadla patří Boeing 737 a Airbus A320. Širokotrupá (wide-body, WB) letadla mají 7 a více sedadel vedle sebe a uličky mají dvě. Šířka trupu je typicky 5 až 6 metrů a mezi tyto letadla patří Boeing 747, 777, 787, Airbus A330, A350 a A380. Verze TaxiBotu pro širokotrupá letadla (WB) je již ve vývoji, avšak nemá potřebné certifikace. Následující informace se tedy vztahují výhradně k úzkotrupé verzi vozidla.

Systém TaxiBot spadá pod ground-based řešení a je vyvíjen Izraelskou státní společností Israeli Aerospace Industries (IAI), jehož první představení proběhlo v roce 2011. TaxiBot je tažné vozidlo podobné současným letištním pushback traktorům (obrázek 8), které však dokáže letadlo nejen vytlačit od stojánky, ale i jej následně dotáhnout na potřebné místo, například vyčkávací místo dráhy pro vzlet. První testy probíhaly na letišti Frankfurt v roce 2013 a v následujícím roce obdržel TaxiBot certifikaci od EASA (European Union Safety Agency) pro použití na letounu Boeing 737 a téhož roku proběhl i první komerční let, kdy Boeing 737 společnosti Lufthansa pojížděl právě



pomocí tohoto systému. Následně v roce 2017 obdržel systém certifikaci pro Airbus A320 a ve stejném roce pak následovala i certifikace pro Boeing 737 od amerického úřadu FAA (Federal Aviation Administration). TaxiBot je tedy aktuálně jediným dostupným certifikovaným systémem. Ve skutečném provozu systém TaxiBot funguje od konce roku 2018 na indickém mezinárodním letišti v Novém Dillí, kde je využíván společnostmi AirIndia, Spice Jet a Jet Airways. Amsterdamské letiště Schiphol provedlo v roce 2020 studii proveditelnosti systému a aktuálně je podaná objednávka na dvě nová vozidla.

Princip fungování TaxiBotu je v jistých ohledech podobný pushback traktorům. Pushback traktor je letištní vozidlo určené k vytlačení letadla od stojánky do polohy, ze které může letadlo samo pojíždět. Starší typy pushback traktorů využívají vlečnou tyč neboli oj (ang. tow bar), která spojuje traktor s předovým podvozkem letadla. Novější typ se nazývá towbarless traktor – tedy typ vozidla, který nevyužívá pro připojení letadla oj. Tyto pushback traktory fungují tak, že pomocí hydraulických mechanismů uchopí předové kolo letadla, a to je pak zvednuto nad zem. Towbarless traktory umožňují jednodušší a přesnější pohyb s letadlem a zároveň není potřeba uchovávat pro každý typ letadla jinou oj.

TaxiBot je speciální případ towbarless traktoru, kdy řidič vozidla uchopí a nadzvedne předové kolo. Rozdíl je však v tom, že po dokončení pushback procesu není letadlo odpojeno, ale řidič předává řízení pilotovi letadla a ten zahajuje pojíždění i s vozidlem. Předové kolo letounu je totiž v případě TaxiBotu nadzvednuto a umístěno na otočnou platformu (obrázek 9), vybavenou senzory, které detekují úhel natočení kola a v závislosti na něm vozidlo TaxiBot natáčí svá vlastní kola. To umožňuje pilotům ovládat směr pojíždění stejným způsobem, jako v případě standardního pojíždění. Rychlost je pak ovládána pouze brzdami – TaxiBot má nastavenou cílovou rychlost, kterou se snaží neustále udržovat a pokud je potřeba pojíždění zpomalit, pilot aplikuje brzdy, senzory na vozidle zjistí zvýšený odpor tahaného letounu a TaxiBot přestává zrychlovat. Uvažuje se taky nad mapováním rychlostí, což by znamenalo, že by vozidlo udržovalo v různých úsecích jinou rychlost – například před zatáčkou by automaticky přestalo zrychlovat, naopak na rovných úsecích by jeho cílová rychlost byla vyšší.

Pojíždění je tedy pro pilota téměř stejné jako standardní pojíždění. Připojení a odpojení vozidla od letadla má na starosti řidič vozidla. Během pojíždění, kdy je kontrola předána pilotovi, řidič TaxiBotu pouze monitoruje a v případě nutnosti či nouze může vozidlo zastavit. Řidič vozidla také připojuje komunikační kabel, který zajišťuje vzájemnou komunikaci mezi posádkou a řidičem.

Z technického hlediska se jedná o hybridní vozidlo se dvěma dieslovými generátory, které pak generují elektrickou energii pro osm elektromotorů pohánějící čtyři páry kol. Dieslové generátory spotřebovávají 0,55 kilogramů paliva za minutu a celkový výkon vozidla pak činí 500 kW s maximálním kroutícím momentem 45 kNm. Tyto hodnoty umožňují vozidlu dosáhnout s plně naloženým letounem Boeing 737 rychlosti až 23 uzlů. Dostatečná manévrovatelnost je pak zajištěna natáčením všech čtyř kol a možností ovládní výkonu na každém kole zvlášť. Váha vozidla je 25 tun. Verze TaxiBotu pro širokotrupá letadla je pak větší a se svými třemi dieslovými generátory produkujícími 1000 kW i dvojnásobně výkonnější. Tento výkon je pak pomocí dvanácti elektromotorů přenášen na šest párů kol.

Dle výrobce není pro provoz systému potřeba žádná úprava na letadlech a úprava letištní infrastruktury jen minimální. Zároveň díky pokročilým senzorům nedochází k jakékoliv nadměrné zátěži předového podvozku, a tudíž není ovlivněna jeho životnost. Cena za toto řešení je spíše vysoká, kdy jedno vozidlo TaxiBot stojí 1,44 mil. euro (36 mil. Kč). Verze TaxiBotu pro širokotrupá letadla pak vyjde ještě na dvojnásobek této ceny. [2] [13] [18] [19] [20]



Obrázek 5: TaxiBot (NB) táhnoucí letadlo Airbus A321 [21]



Obrázek 6: TaxiBot – systém uchycení předového podvozku na otočnou platformu [22]

2.4. Aircraft Towing System (ATS)

Aircraft Towing System neboli zkráceně ATS je další z ground-based systémů alternativního pojiždění, který přináší velice nevšední řešení. Jedná se o systém, kdy jsou letadla tažena vozíky (obrázek 10) jedoucími po kolejnici zapuštěné v pojezdové dráze v místě středové čáry (obrázek 11). Koncept ATS se zrodil v hlavě polského podnikatele, který v roce 2016 založil společnost ATS World Wide LLC. sídlící ve státě Oklahoma. V roce 2021 začala výstavba prvního prototypu ATS na letišti Ardmore nacházejícího se nedaleko Oklahoma City, firma také zakoupila vyřazený letoun Boeing 727, který bude sloužit k testování systému.

ATS je koncepčně velice odlišný od ostatních systémů a je tvořen třemi podsystémy: kolejnice, vozíky a software. Princip fungování spočívá v tom, že letoun najede svým předovým kolem na platformu, která je spojena s vozíkem. Samotná platforma je navržena tak, aby na letadlech nebylo potřeba žádné modifikace. Vozík s platformou pak pojedou po kolejnici v kanále zapuštěném v pojezdové dráze až na požadované místo, kterým může být například vyčkávací místo před drahou. V opačném případě (taxi-in) je letadlo odtaženo přímo až na stojánku. Vozík by měl být vybaven hydraulickými pumpami, které budou pohánět čtyři hydraulické motory. Motory pak budou svírat kolejnici a umožní vozíku se pohybovat. Každý vozík by měl také mít senzory, které detekují riziko kolize letadla s jiným objektem. V případě nouze však může pilot manuálně vozík zastavit či aplikovat brzdy, čímž dojde k uvolnění předového kola z platformy vozíku. Samotný kanál, ve kterém se vozík bude pohybovat, je proti nepříznivému počasí vybaven drenážemi pro odtok vody a také vytápěním v případě kontaminace sněhem či ledem. Celý systém by měl být automatický a řízen softwarem integrovaným do existujících stanovišť řízení letového provozu. V provozu by to

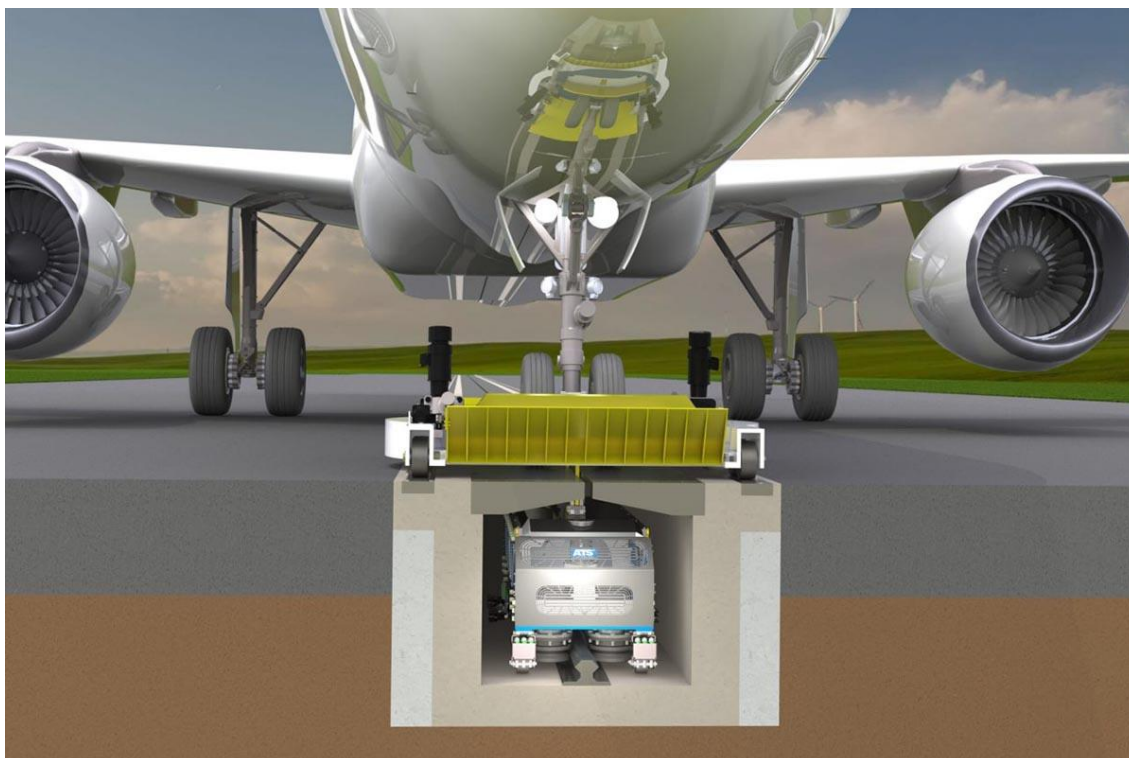
znamenal, že by systém mohl přizpůsobit rychlost letadel nebo i dokonce zastavit letadla, aby se předešlo případné kolizní situaci. Výrobce uvádí, že implementace systému značnou mírou přispěje k bezpečnosti pojezdění.

ATS by také mohlo fungovat jen jako pushback systém a nahradit tak stávající vozidla. Letadlo by pojezdělo za použití motorů až do blízkosti stojánky, kde by najelo na platformu a vozíkem by bylo dotaženo až na stojánku. Poté by bylo letadlo stejným způsobem vytlačeno ze stojánky zpět na pojezdovou dráhu bez nutnosti čekání na pushback traktor.

Cenově se však jedná o nejdražší ze systémů. Předpokládané náklady na 1 m kanálu s kolejnicí je 2,800 euro (70 000 Kč) a cena jednoho vozíku činí 143,000 euro (přes 3,5 mil. Kč). Společnost ATS očekává, že náklady na výstavbu systému na velkém mezinárodním letišti (Chicago O'Hare) budou přibližně 200 mil. euro (5 mld. Kč). Výrobce také uvádí, že roční náklady na provoz a údržbu by měli činit 4 % z celkové ceny systému. [23]



Obrázek 7: ATS vozík s platformou pro uchycení předového kola [23]



Obrázek 8: ATS vozík jedoucí po kolejnici v zapuštěném kanále, táhnoucí letadlo [23]

2.5. Pojíždění s jedním motorem

Ačkoliv se nejedná nutně o systém pojíždění, je vhodné zmínit i pojíždění s jedním nebo více vypnutými motory (ang. Single engine taxiing – SET). Jde tak o další možnost, jak ušetřit palivo při pojíždění, která je již dnes některými provozovateli na určitých letištích využívána, především pro taxi-in. Pro dvoumotorová letadla to znamená pojíždění s jedním vypnutým motorem. V případě čtyřmotorových letadel se vypínají motory dva. Při pojíždění taxi-in je po přistání a po provedení potřebných úkonů vypnut jeden či dva z motorů a letadlo pokračuje v pojíždění pouze s běžícím druhým motorem až na stojánku. Dle odhadů by SET mohlo ušetřit oproti pojíždění se všemi motory až 30% paliva a až 40% emisí NO_x.

SET však může být použito pouze tehdy, kdy jsou splněny dané požadavky a zároveň jsou i situace, kdy SET nemůže být použito vůbec. Takové omezení pro SET jsou například: strmý sklon pojezdové dráhy, aktuální stav počasí a kontaminace pojezdových drah. [2] [9]

Při pojíždění s jedním motorem je však potřebné zapnuté APU. Společnost Airbus tento problém vyřešila tím, že nabízí úpravu letadla SETWA – Single engine taxi without APU, kdy je možné pojíždět s jedním motorem bez zapnutého APU. [24]



2.6. Srovnání systémů

Zmíněné systémy alternativního pojiždění jsou v mnohých aspektech velice odlišné a každé řešení tak přináší svá pro i proti. V následující tabulce tak vidíme srovnání vybraných parametrů. U některých systémů však nejsou určitá data k dispozici.

Tabulka 2: Srovnání vybraných parametrů systémů [autor]

	WheelTug	EGTS	TaxiBot	ATS
Typ systému	On-board	On-board	pozemní	pozemní
Váha navíc [kg]	130	400	-	-
Maximální rychlost [kt]	9	20	23	N/A
Cena	hodinová sazba	N/A	1,5-3 mil. dolarů	Dle rozsahu systému
Certifikace	Ne	Ne	A320, B737	Ne
Uvedení do provozu	2022	Ukončeno	Od 2014	N/A

Jednu z hlavních výhod pozemních systémů můžeme vidět v tom, že na rozdíl od on-board řešení nepřidávají dodatečnou váhu letadlům. Zároveň letadla nepotřebují žádné modifikace a pro letecké společnosti tak přinášejí tyto systémy jen benefity v podobě nižších nákladů za palivo. Vzhledem k faktu, že u pozemních systémů není nedostatek prostoru v letadle problémem, mají tyto systémy zpravidla větší výkon, a tudíž i větší rychlost pojiždění. Nevýhodou pozemních řešení jsou potřebné úpravy, či výstavba zcela nové letištní infrastruktury.

On-board systémy naopak letadlům vždy přidávají dodatečnou zátěž, což má negativní vliv na spotřebu paliva během letu a také by tato váha mohla ovlivnit množství užitečného nákladu, které může být naloženo. Letadla vybavena on-board systémem by však byla do značné míry nezávislá na pozemním vybavení letiště. To znamená, že letadlo připravené k pojiždění ze stojánky by tak nemuselo čekat na dostupný pushback traktor nebo v případě pozemních systémů, na TaxiBot, který by letadlo odtáhl. Další výhodou on-board řešení vzniká v situaci, kdy letadlo letí na jiné letiště, kde může stejně tak pojiždět bez motorů. Tyto systémy lze tedy teoreticky využít na každém letišti, nehledě na pozemní infrastrukturu. Zapnuté APU během pojiždění je jak v případě pozemních, tak i on-board systémů, vzhledem k nutnosti přísunu elektrické energie a stlačeného vzduchu. On-board a jejich elektromotory potřebují elektrické energie více a vytváří tak větší zátěž na APU.

Konkrétní systémy WheelTug a EGTS jsou si koncepčně podobné. Hlavním rozdílem je pak umístění samotných elektromotorů. WheelTug a jeho dvojice elektromotorů umístěná v kolech předového podvozku oproti EGTS nabízí méně komplexní řešení, což



má za následek, že systém je jednoduchý na instalaci a jeho váha je také ve výsledku nižší. Umístění elektromotorů jako má EGTS, tedy v kolech hlavního podvozku, přináší lepší trakční vlastnosti a výkon. S tím je pak spojena vyšší rychlost a lepší zrychlení. Hlavní nevýhodou EGTS je ale značně vyšší hmotnost. Jelikož byl vývoj EGTS zastaven, není aktuálně ve vývoji žádný systém typu on-board s elektromotory umístěnými v kolech hlavního podvozku. Systém WheelTug je tak jediným on-board systémem, na němž se pracuje.

Když se podíváme na porovnání pozemních systémů TaxiBot a ATS, tak se jedná o dva rozdílné přístupy k řešení alternativního pojiždění. Zatímco TaxiBot je již v pokročilém stádiu vývoje, ATS je naopak novější systém, který aktuálně existuje jen jako koncept, ale dle dostupných informací je vidět, že firma ATS to myslí s tímto systémem vážně, což je podpořeno faktem, že stavba prvního funkčního prototypu již započala. Z technického hlediska je ATS oproti TaxiBotu komplexnějším a rozsáhlejším řešením, a tedy i náklady na výstavbu údržbu jsou daleko vyšší. Cena instalace a provozu ATS není fixní, ale je závislá na rozsahu projektu. Dle dostupných informací lze předpokládat, že tato cena může přesahovat i 200 milionů dolarů. Zatímco jedno vozidlo TaxiBot stojí „pouze“ 1,5 milionu dolarů. Přestože by letiště pro provoz potřebovalo více TaxiBotů, i tak by cena několika desítek těchto vozidel byla nižší než cena systému ATS. Další nevýhodou ATS je malá flexibilita systému, který je permanentně instalován v pojezdových drahách a jeho demontáž by byla velmi náročná. Výhodou ATS je na rozdíl od TaxiBotu, jehož generátory spalují diesel, kompletní elektrifikace, a tedy žádné emise škodlivých plynů. Pokud by bylo ATS kompletně řízené softwarem, mohlo by to také přispět k celkové efektivitě pozemního provozu a stejně tak i k bezpečnosti. Automatizace by mohla přinést i benefity pro piloty v podobě snížení pracovní zátěže.

[13] [20]



3. Řešený problém

V předchozích kapitolách byly analyzovány problémy aktuálního stavu pojiždění a představeny systémy a řešení, které jsou k dispozici. Jelikož se tato práce věnuje výběru a teoretické implementaci systémů v prostředí Letiště Václava Havla Praha, bylo zapotřebí vybrat metody, za pomoci kterých bude možné objektivně zhodnotit každý jednotlivý systém a následně vybrat ten nejvhodnější. Za tímto účelem byly vytvořeny modely, s jejichž pomocí bylo možné systémy co možná neobjektivněji porovnat.

Jakožto hlavní parametr pro hodnocení využitelnosti systémů a jejich porovnání byla zvolena úspora paliva, a to hned z několika důvodů. Pro letecké společnosti je žádoucí snížit náklady všude, kde je to možné a vzhledem k tomu, že palivo tvoří velkou část nákladů, snížení jeho spotřeby může vést k žádoucím finančním úsporám. Vývoj nových, efektivnějších motorů s vysokým obtokovým poměrem sice značně přispívá ke snížení spotřeby leteckého paliva, avšak právě při pojiždění by teoreticky mohly být motory úplně vypnuty. S nižší spotřebou samozřejmě souvisí také nižší produkce zplodin. Tato problematika je detailněji popsána v kapitole 1. *Problémy spojené s pojižděním*. Následující modelové situace tak počítají právě se spotřebou, a tedy i úsporou paliva při pojiždění.

Všechny modelové situace, které jsou řešeny v této práci počítají s využitím alternativních způsobů pojiždění pouze pro případy taxi-out, tedy pro pojiždění od parkovacího místa/stojánky ke vzletu. Důvodem je značný rozdíl mezi časy taxi-out a taxi-in, kdy průměrné taxi-in časy globálně ale i na LKPR dosahují až polovičních hodnot oproti časům taxi-out. To znamená, že pojiždění ke vzletu trvá podstatně delší dobu než pojiždění od přistání ke stojánce. Proto se prvotní využívání alternativního pojiždění jeví jako nejideálnější pro taxi-out.

Zároveň je každý systém svým řešením unikátní, a právě kvůli tomu jsou často navzájem velice těžko porovnatelné. Obzvláště pak srovnání on-board a ground-based systémů je ve mnoha ohledech nemožné. Všechny systémy však mají společné to, že slibují palivové úspory, a právě díky těm můžeme každý systém jednoduše kvantifikovat a poté porovnat. Pro kvantifikaci byly vytvořeny modely spotřeby paliva na LKPR pro jednotlivé dráhy. Jako vstupní data byly využity časy pojiždění poskytnuté společností Letiště Praha a.s.

Jelikož je cílem zvolit nejvhodnější systém na LKPR, byl jako další parametr pro porovnání zvolen popis a náročnost teoretické implementace jednotlivých systémů právě v prostředí Letiště Praha.



4. Letiště Václava Havla Praha

Vzhledem k tomu, že se tato práce i následující modelové situace orientují na Letiště Václava Havla Praha, je vhodné uvést informace týkající se tohoto letiště. Krom základních faktů a historie je také důležité analyzovat informace klíčové pro tuto práci jako je konfigurace pojezdových cest, drah a stání.

4.1. Základní informace

ICAO: LKPR

IATA: PRG

Letiště Václava Havla je veřejné mezinárodní letiště, které ročně před pandemií COVID-19 odbavilo přes 15 milionů cestujících do více než 120 destinací po celém světě a jedná se o nejrušnější letiště v České republice. Během pandemie však počet odbavených pasažérů klesl na číslo lehce přesahující 4 miliony. Na letišti operuje téměř 50 leteckých společností a 8 pravidelných cargo dopravců. Mezi provozovateli, kteří mají na letišti základnu, jsou České Aerolinie, Smartwings, Ryanair a nově i Eurowings.

4.2. Vývoj Letiště Václava Havla Praha

Výstavba samotného letiště začala v roce 1932 v tehdejší Československé republice a mělo sloužit jako náhrada za tehdejší hlavní pražské letiště Kbely. Letiště bylo dokončeno roku 1937 a disponovalo pěti travnatými drahami. První let proběhl již měsíc od otevření letiště a jednalo se o let na lince Piešťany – Zlín – Brno – Praha na stroji Douglas DC-2. Za první rok letiště odbavilo téměř 14 tisíc pasažérů.

Druhá světová válka však narušila veškerou československou leteckou dopravu, letadla byla převzata pro potřeby armády a letiště sloužilo jako místo pro opravy vojenských letadel. Během německé okupace však došlo i na prodloužení drah a nejdelší měla 1800 metrů. Po válce nadále pokračovala modernizace letiště.

V roce 1968 byl otevřen nový terminál, který dnes známe pod názvem Terminál 1. Ten byl schopen odbavit až 2,3 milionu cestujících ročně. Dráhy byly opět prodlouženy. V roce 1995 začala rozsáhlá rekonstrukce severní odbavovací budovy a kapacita byla navýšena na 4,8 milionu cestujících ročně. O dva roky později – v roce 1997 byl postaven terminál, dnes známý jako Terminál T3, který slouží pro odbavení soukromých letů. Poslední velkou úpravou prošlo letiště roku 2005, kdy byl otevřen Terminál 2, sloužící pro lety v rámci schengenského prostoru. Od roku 2012 se název letiště změnil z Letiště Praha na Letiště Václava Havla Praha. [25]



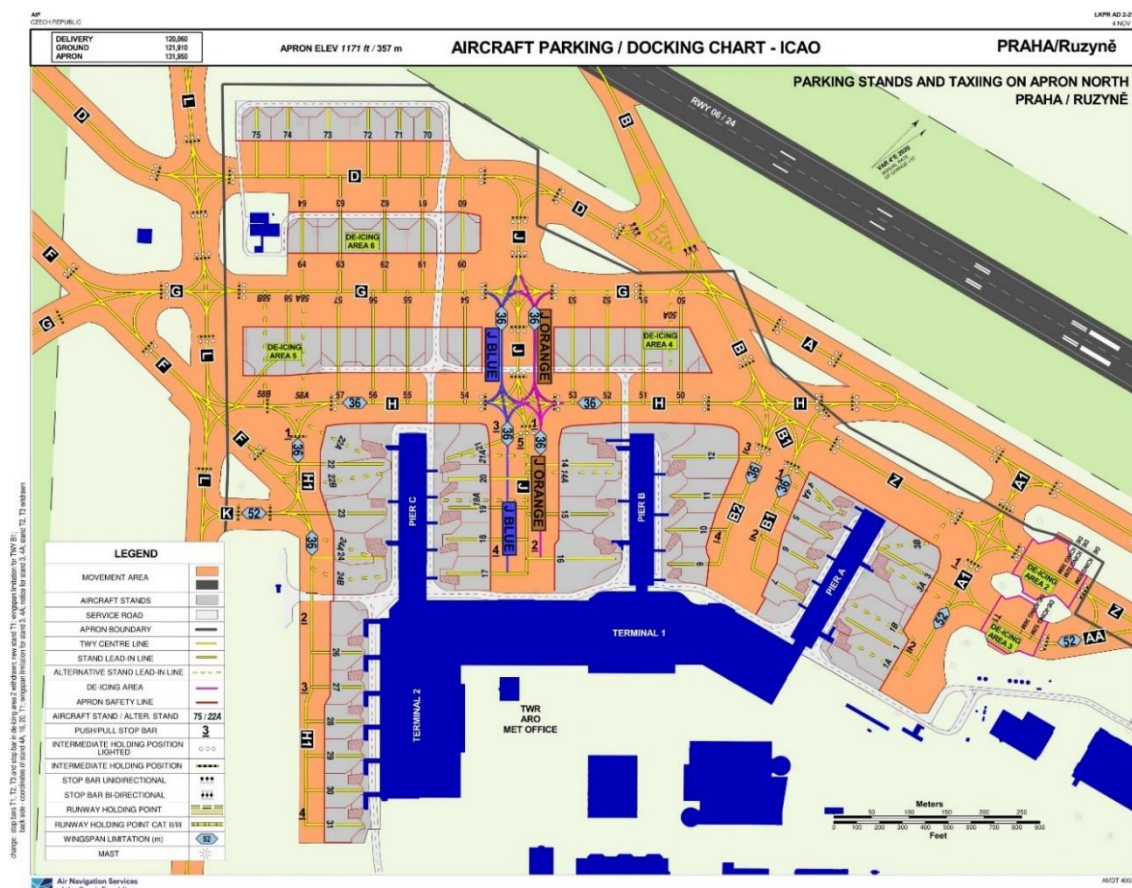
V současné době je kapacita dráhového systému nedostatečná a letiště kvůli tomu bylo donuceno přejít do kategorie plně koordinovaných letišť. Úpravami dráhového systému se postupně podařilo navýšit kapacitu z 34 pohybů na 46 a maximum je až 48. Vzhledem k těmto faktům se do budoucna plánuje výstavba nové dráhy paralelní s dráhou 06/24, která by měla být v místech původní dráhy 04/22. Paralelní dráha umožní další navýšení kapacity letiště, kdy se bude jedna dráha používat na odlety a druhá na přílety. [26] [27]

4.3. Konfigurace odbavovacích ploch a stojánek

Na letišti se nachází 3 odbavovací plochy – SEVER, JIH a VÝCHOD. Odbavovací plocha SEVER je hlavní plocha pro obchodní leteckou dopravu a náleží k ní Terminály 1 a 2. Plocha nacházející se u Terminálu 3 se nazývá JIH a je určena pro soukromé lety. Poslední odbavovací plochou je VÝCHOD, ta je určena pro cargo lety.

Odbavovací plocha SEVER disponuje stojánkami **1; 3-7; 9-12; 14-24; 26-31; 50-58; 60-64; 70-75**. Některé stojánky mají alternativní možnost stání a pak jsou označeny číslem a písmenem – například 1A a 1 B. Na ploše SEVER je celkem 57 stání, ale pouze stání 1; 3-7; 9-12; 14-24; 26-31 jsou přímo u budovy terminálu a mají možnost připojení nástupního mostu. Zároveň je na všech těchto stáních k dispozici vizuální naváděcí systém (VDGS). Mapa odbavovací plochy SEVER společně s vyznačenými stání je zobrazena na obrázku 2.

Pro vrtulová letadla s MTOW max 30 tun je za podmínek dohlednosti vyšší nebo rovno 400 metrů povolen výjezd ze stání NOSE-IN za pomoci procedury „POWER BACK“. Jedná se o proceduru, kdy letadlo couvá za pomoci vlastních motorů na zpětný tah. Tato procedura je povolena pouze na stáních 50–58 (sektor B3 a C3); 60–64 (sektor C4); 70–75 (sektor C5) a E3, E4 a E5A na odbavovací ploše VÝCHOD, a to za pomoci asistence dvou pracovníků handlingové společnosti. [28]



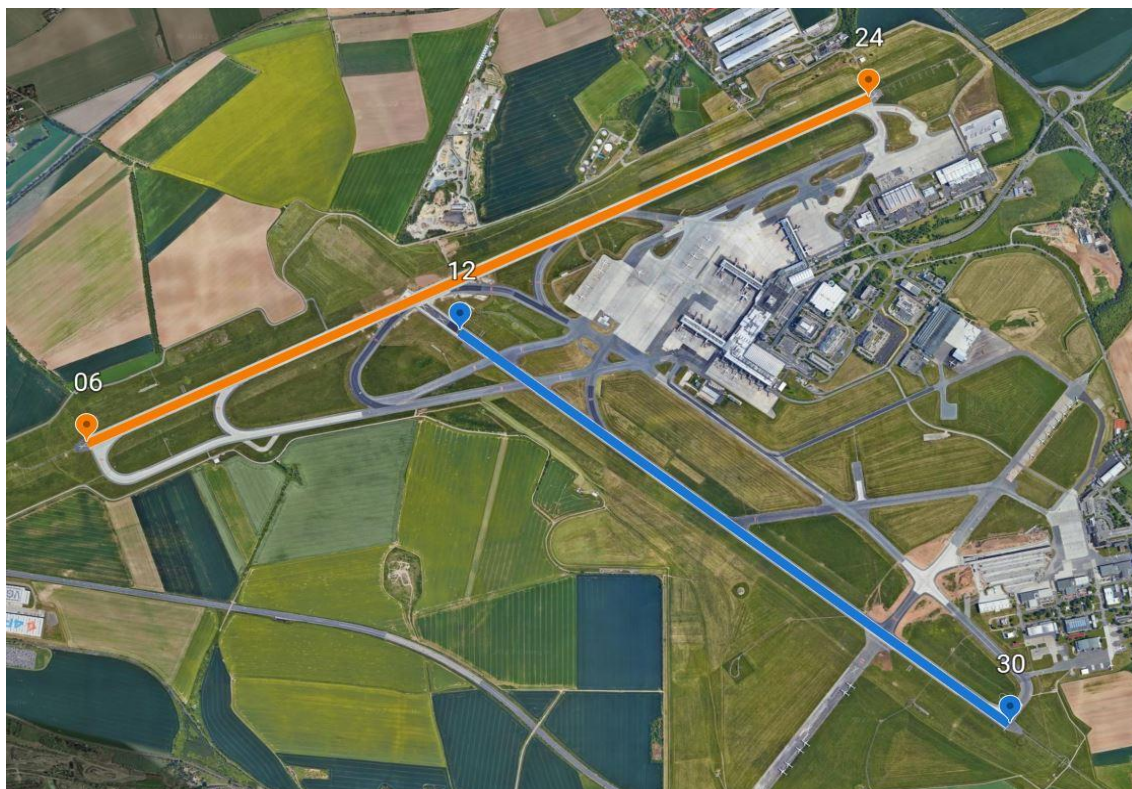
Obrázek 9: Mapa stání odbavovací plochy SEVER [28]

4.4. Konfigurace vzletových a přistávacích drah

Aktuálně Letiště Václava Havla disponuje dvěma vzletovými a přistávacími drahami a jsou to dráhy označeny jako 06/24 a 12/30. Satelitní snímek s vyznačenými drahami je zobrazen na obrázku 3. Dráha 06/24 je hlavní dráhou letiště a její délka je 3715 metrů. Dráha 12/30 je pak dlouhá 3250 metrů a je využívána jen malými letadly pod 7 tun nebo ve výjimečných případech, například když je hlavní dráha mimo provoz. V tabulce 2 je uveden maximální počet pohybů na jednotlivých drahách a také jejich procentuální roční využití. [28]

Tabulka 3: Kapacity jednotlivých drah [29]

RWY	Kapacita			Průměrné roční využití RWY
	Max. přiletů	Max. odletů	Celkově	
06	33	33	46	27 %
12	28	33	38	2 %
24	33	33	46	66 %
30	28	33	38	4 %



Obrázek 10: Satelitní snímek s vyznačenými drahami [30]

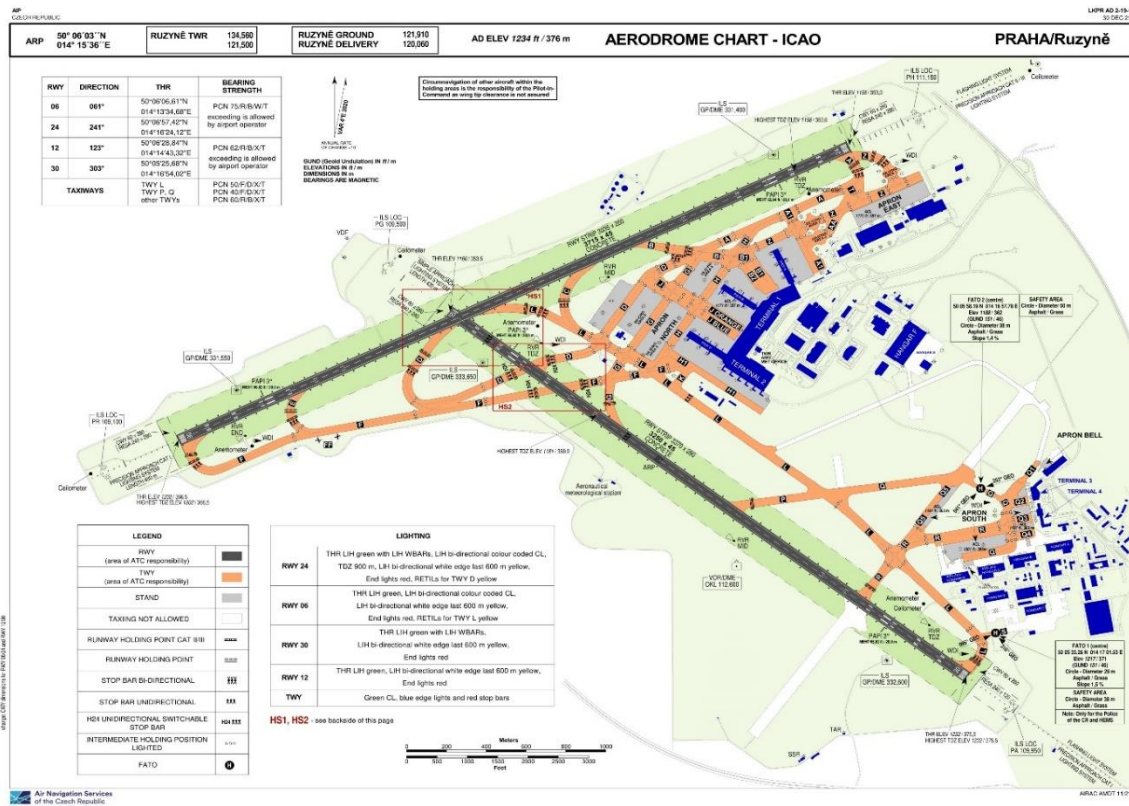
4.5. Pojíždění a konfigurace pojezdových drah

Na letišti jsou zřízeny pojezdové dráhy **A, A1, AA, B, B1, B2, C, D, E, F, G, H, H1, J, J ORANGE, J BLUE, K, L, P, Q, Q1, Q5, R, RR, T, Z**. Zajímavostí jsou pojezdové dráhy J ORANGE, J BLUE, nacházející se na stojánci sever, které mají nepředpisové barvy a to oranžovou a modrou. Tyto pojezdové dráhy nejsou vybaveny osovými návěstidly a jejich provoz je tak limitován dohledností alespoň 400 metrů. Na obrázku 4 jsou vyznačené pojížděcí cesty (oranžová).

Pojíždění s využitím vlastních motorů letadla je povoleno pouze na pohybové ploše letiště. Pojíždění mimo pohybovou plochu je zakázáno. Z bezpečnostních důvodů je pro zahájení pojíždění i pro samotné pojíždění na odbavovací ploše letiště povoleno používat pouze minimální výkon motorů.

Na ploše SEVER jsou zavedena omezení pro maximální rychlosti pojíždění, a to konkrétně na pojezdových cestách: TWY D mezi TWY L a TWY J; TWY G mezi TWY L a TWY B; TWY H mezi TWYL a TWY B a TWY H1. Jedná se tedy o pojezdové dráhy mezi parkovacími stání 50–58; 60–64 a 70–75 a rychlost je zde omezena na 15 kt. Zároveň platí omezení rychlosti na 10 kt v obloucích pojezdových cest a na pojezdových cestách v hranicích odbavovací plochy.

Na letišti jsou také obslužné silnice pro pozemní vozidla. Jedna obslužná cesta vede k odmrazovací ploše u prahu dráhy 24. Další silnice ústí nedaleko prahu dráhy 30 a spojuje Odbavovací plochu SEVER a JIH. [28]



Obrázek 11: Letištní mapa [28]



4.6. Provoz

V tabulce 2 je zobrazen procentuální podíl konkrétních typů letadel, která byla provozována na letišti Václava Havla v roce 2019. Z důvodu lepší přehlednosti jsou zahrnuty pouze typy letadel, jejichž zastoupení je vyšší než 1 %. Zároveň jsou letouny Airbus A330-200 a A330-300 zahrnuty do jednoho řádku, jelikož je jejich zastoupení velmi malé. Typy letadel, jenž mají zastoupení menší než 1 %, jsou zahrnuty v „Ostatní“.

[31]

Tabulka 4: Podíl konkrétních typů letadel na LKPR za rok 2019 [31]

ICAO typ	Název	Podíl v %
B738	Boeing 737-800	31,8 %
A320	Airbus A320	15,8 %
A319	Airbus A319	7,7 %
AT72	ATR-72	6,9 %
A321	Airbus A321	4,8 %
DH8D	Dash - 8	3,8 %
B737	Boeing 737-700	3,4 %
E190	Embraer E190	2,6 %
A20N	Airbus A320 Neo	2,1 %
B739	Boeing 737-900	2,0 %
A332/A333	Airbus A330-200/300	1,6 %
CRJ9	CRJ-900	1,3 %
B734	Boeing 737-400	1,1 %
Ostatní		15 %

Z tabulky lze vyčíst, že provoz na pražském letišti je složen převážně z úzkotrupých dopravních letadel. Necelých 40 % provozu tvoří Boeing 737 v různých verzích. Konkrétní verze 737-800 tvoří téměř třetinu veškerého provozu a je tak nejčastějším letounem na letišti Václava Havla. Druhým nejčastějším typem je Airbus A320 s 15,8 % a všechny verze tohoto letounu pak mají společný podíl přes 30 %.

Širokotrupá dopravní letadla dohromady tvoří jen necelá 3,5 % a nejčastějším typem je Airbus A330-200 a A330-300 dohromady s 1,6 %. Za zmínku stojí také Boeing 787-800 a Airbus A380, kdy oba typy jsou zastoupeny téměř stejně s 0,5 %.



5. Časy pojiždění

V tabulce 4 jsou k jednotlivým drahám uvedeny mediány časů pojiždění z jednotlivých sektorů. Konkrétně se jedná o medián časů za období 1.1.2019-31.12.2019. Rok 2019 byl zvolen jakožto poslední rok, jenž nebyl ovlivněn globální pandemií COVID-19, která měla značný dopad na leteckou dopravu a data za další roky by tedy mohla být zkreslena. Tato statistická data byla využita v modelech spotřeby. Zde jsou uvedeny pro lepší přiblížení řešeného problému.

Tabulka 5: Medián časů pojiždění pro jednotlivé dráhy a sektory [32]

Sektor	Stání	RWY 06	RWY 24	RWY 12	RWY 30
Sektor A1*	1 a 3	12:03	08:01	10:18	14:06
Sektor A2*	4-7	10:47	07:35	09:53	12:17
Sektor B1*	9-12	10:43	07:49	10:57	11:30
Sektor B2*	14-16	10:49	08:43	09:48	12:42
Sektor B3	50-53	06:22	04:47	05:05	07:56
Sektor C1*	17-21	09:09	07:37	09:04	10:42
Sektor C2*	22-24	09:41	09:10	09:08	10:30
Sektor C3	54-58	06:01	04:43	02:54	07:03
Sektor C4	60-64	05:28	04:06	02:20	08:15
Sektor C5*	70-75	05:54	04:51	02:37	08:31
Sektor D1*	(25)26-31	09:13	09:03	08:27	10:30
Sektor Východ*	Cargo	12:01	06:01	15:22	13:55
Průměr jednotlivých drah		9:01	6:52	7:59	10:40

Jednotlivá parkovací stání a stojánky jsou seskupeny do sektorů znázorněných na obrázku 12. Parkovací stání náležící k danému sektoru jsou vypsána ve druhém sloupci tabulky. Sektory jsou označeny dle příslušného „prstu“ terminálu a poté číslovkou. Sektory A a B patří k terminálu 1, C a D k terminálu 2 a sektor východ pak patří ke cargo terminálu. Všechny sektory se tak nachází na odbavovací ploše SEVER.



Obrázek 12: Vyobrazení jednotlivých sektorů z tabulky 4 na mapě [30]

Důležité je také zmínit, že u tzv. nose-in stání neboli stání, z kterých se musí couvat, je do celkového času započítán i čas samotného pushbacku. Časy jsou tedy měřeny od zahájení pohybu letounu až po vjezd na dráhu. Sektory zahrnující nose-in stání jsou označeny hvězdičkou.

Z tabulky vidíme, že nejpoužívanější dráha 24 je také časově nejbližší pro odbavovací plochu SEVER a časy poježdění z mnoha sektorů nedosahují ani pěti minut. Naopak poježdění na málo využívanou dráhu 30 dosahuje hodnot i přes deset minut.

Oproti datům od Eurocontrol zobrazených v tabulce 1, jsou data od Letiště Praha značně odlišná. Data uváděna v tabulce 1 jsou sice průměry, mediány však dosahovaly podobných hodnot. Vyšší hodnoty můžeme přisoudit faktu, že se jedná o průměr všech drah ze všech sektorů, a to za období letní sezóny, kdy je hustota provozu nejvyšší.



6. Model spotřeby paliva

Pro kvantifikaci spotřeby paliva byly vytvořeny modely pro jednotlivé dráhy. Byla určena výchozí stojánka/stání a následně za pomoci mediánů času poježdění byly vypočítány odhadované spotřeby paliva pro každý systém na jednotlivé dráhy. V modelu je zahrnuta spotřeba hlavních motorů a stejně tak i spotřeba APU, které musí být zapnuté při alternativních způsobech poježdění, včetně poježdění s jedním motorem. Dalším faktorem, který bylo potřeba v modelu zohlednit, je čas zahřívání motorů. Model byl prodiskutován s odborníky z Letiště Praha, kteří potvrdili validitu tohoto postupu.

6.1. Postup řešení

Pro model spotřeby paliva bylo potřeba zvolit co nejpřesnější vstupní data a zároveň zohlednit různé proměnné, které mohou ovlivnit výsledky. Tyto proměnné se týkaly především jednotlivých systémů, jejichž rozdílná řešení vyžadovala v modelech odlišné přístupy.

6.1.1. Parkovací stání/stojánka

Jako výchozí stojánka pro všechny modely bylo zvoleno stání číslo 53 v sektoru B3. Konkrétně bylo toto stání vybráno vzhledem k jejímu umístění, kdy se nachází přibližně ve středu odbavovací plochy SEVER a nefavorizuje tak vzdálenostně žádnou dráhu. Kdyby byla vybrána například stojánka v sektoru D1, který je nejbližší RWY 30, čas poježdění k této dráze by byl s pushbackem přes 10,5 minut. Naopak pro sektor A1 by byl tento čas přes 14 minut. Rozdíl hodnot tak činí více než 3 minuty, což je v kontextu krátkých časů poježdění na Letišti Praha nezanedbatelná hodnota. Stání 53 je zároveň průjezdné (není nose-in), což znamená že medián poježdění není ovlivněn časem potřebným pro pushback.

6.1.2. Letoun

Pro model byl zvolen výchozí letoun typu Boeing 737 – Max s motory CFM International LEAP – 1B, jde o nejnovější a nejefektivnější letoun z řady 737. Dle statistických dat je typ 737 také nejvíce provozovaným letadlem na Letišti Praha a zde sídlící letecká společnost Smartwings provozuje flotilu výhradně tvořenou letouny Boeing 737. V následující tabulce jsou data použita v modelu pro tento letoun.

Tabulka 6: Data pro Boeing 737 – MAX [33] [34]

Motor	CFM International LEAP – 1B	f_{eng} [kg/s] (7 % tah – taxi)	0,098	f_w [kg/s] (idle)	0,085
APU	Honeywell 131-9[B]	f_{APU} [kg/s]	0,033		

V tabulce 6 jsou hodnoty spotřeby paliva – průtok paliva v kg/s pro konkrétní motor CFM International LEAP – 1B, kterými je Boeing 737 – MAX osazen, stejně tak pro APU Honeywell 131-9[B]. Konkrétně jsou zde uvedeny hodnoty spotřeby paliva hlavního motoru při pojíždění (f_{eng}), spotřeba paliva motoru při volnoběžných otáčkách (f_w) a také spotřeba paliva samotného APU (f_{APU}).

6.1.3. Speciální postupy

WheelTug: Model počítá s přibližnou spotřebou paliva za dobu pojíždění. Čas pojíždění byl poskytnut přímo Letištem Praha, jde tedy o dobu pojíždění určitou rychlostí za pomoci motorů. Kromě systému WheelTug nejsou ostatní systémy limitovány maximální rychlostí. U systému ATS není k dispozici informace o rychlosti pojíždění a pro účely této práce budeme předpokládat, že není limitujícím faktorem. Pro systémy EGTS, ATS a TaxiBot je tak čas pojíždění stejný jako v případě standardního pojíždění.

V případě systému WheelTug byl zvolen postup, kdy byla pomocí online mapového podkladu změřena vzdálenost pojíždění od zvoleného parkovacího místa k vyčkávacímu místu dané dráhy. Z naměřené vzdálenosti byl pak vypočítán čas – tedy jak dlouho by trvalo rychlostí 9kt urazit danou vzdálenost. Čas byl vypočítán pomocí následující rovnice:

$$t_t = \frac{d}{v * 0,51 * 60}$$

Rovnice 1: čas pojíždění

kde t_t je čas pojíždění, d je vzdálenost v metrech a v je rychlost pojíždění v uzlech. Hodnota 0,51 odpovídá převodu 1 kt na m/s a hodnota 60 je zde kvůli převodu sekund na minuty.



Následně byl každý z vypočítaných časů porovnán s časem standardního poježdění a pro každý model byla pak zvolena vyšší ze dvou hodnot času. Tento postup byl zvolen proto, že v případech, ve kterých byla vzdálenost od stání k dráze malá, bylo dle dostupných mediánů časů zřejmé, že rychlost byla také velmi malá a maximální rychlost TaxiBotu tak není v daném případě limitujícím faktorem. V případech drah vzdálenějších od parkovacího místa je pak maximální rychlost systému WheelTug limitující, kvůli čemuž poježdění trvá déle, což je nutné zohlednit.

TaxiBot: U TaxiBotu není rychlost poježdění limitující. Je však potřeba zohlednit čas nutný k odpojení letounu od vozidla. Díky studii z letiště Schiphol víme, že proces odpojení trvá 150 sekund neboli 2,5 minuty. Je to tedy čas navíc, kdy bude mít letadlo zapnuté APU. Teprve až po odpojení letounu může začít proces startování motorů. Tento čas tedy musíme přidat k celkové době, po kterou je APU zapnuté.

ATS: U tohoto systému, podobně jako u TaxiBotu, dochází k odpojení letounu od tažného vozíku a bylo by tedy vhodné u ATS také zohlednit tento čas odpojení. Bohužel však k procesu odpojení nejsou dostupné žádné detailnější informace, které by se týkali doby odpojení. Vzhledem k faktu, že nouzové odpojení letadla od vozíku ATS může proběhnout během velmi krátké doby pouhou aplikací brzd, je možné předpokládat, že proces normálního odpojení bude také krátký. Pro potřeby modelu je tento čas odpojení od ATS zanedbán.

SET: Pro poježdění s jedním motorem byla uvažována spotřeba pouze jednoho motoru, tedy 50 % ze spotřeby standardního poježdění. U letounu Boeing 737 – MAX je však pro poježdění s jedním motorem nutnost běžícího APU. Zohlednit se také musí fakt, že druhý motor při tomto způsobu poježdění není zapnutý a je nutné ho před vzletem zahřát na provozní teploty. [35]

6.2. Tabulka časů

Z důvodů lepší přehlednosti je každý model rozdělen do dvou tabulek. První tabulka obsahuje časy jednotlivých procesů k jednotlivým typům/systémům poježdění. Časy jsou uvedeny v minutách.

Čas poježdění (t_t): hodnota mediánu času poježdění ze stojánky na danou dráhu. V případě systému WheelTug je tato hodnota určena porovnáním mediánu času poježdění a vypočtené hodnoty na základě vzdálenosti a maximální rychlosti.

Čas APU (t_{APU}): čas po který v modelovém případě bylo zapnuté APU. U standardního poježdění není potřeba zapnutého APU a hodnota se tedy rovná nule. U ostatních



systémů, vyjma TaxiBot, se čas rovná času pojíždění. U systému TaxiBot je do tohoto času započítán čas nutný pro odpojení vozidla.

Čas zahřívání (t_w): Tento čas je konstantní hodnota. Jedná se o minimální dobu, po kterou musí být proudový motor v provozu. Tato doba je stanovena jako 3 minuty provozu na volnoběžné otáčky.

6.3. Tabulka spotřeby

Ve druhé tabulce je z předešlých hodnot času pojíždění a spotřeby vypočítána celková spotřeba za danou trasu od výchozího místa až po dráhu.

Spotřeba APU (c_{APU}): Výpočet spotřeby jednotky APU dle vzorce:

$$c_{APU} = f_{APU} * t_{APU} * 60$$

Rovnice 2: spotřeba APU

Kde f_{APU} je množství paliva spotřebované jednotkou APU v kilogramech za sekundu a t_{APU} je čas, po který APU běželo. Pro převod z jednotek sekund na jednotky minut, je zde ještě násobeno hodnotou 60.



Spotřeba motorů (c_{ENG}): Vypočtená spotřeba motorů dle vzorce:

$$c_{ENG} = (n_{ENG}) * f_{ENG} * t_{ENG} * 60$$

Rovnice 3: spotřeba motorů

kde n_{ENG} je počet motorů. n_{ENG} je uvedena jako proměnná pro výpočet spotřeby poježdění s jedním motorem. f_{ENG} je spotřeba paliva jedním motorem v kg/s a t_{ENG} je čas, po který byl daný počet motorů v provozu.

Spotřeba zahříváním (c_w): Vypočtené množství paliva spáleného během zahřívání motorů před vzletem dle vzorce:

$$c_w = (n_{ENG}) * f_w * t_w * 60$$

Rovnice 4: spotřeba motorů zahříváním

Kde n_{ENG} je opět počet motorů, f_w je spotřeba paliva hlavním motorem při volnoběžném tahu – při zahřívání a t_w je čas po který byl motor/y zahříván/y.

Spotřeba celkem (c): Celková spotřeba je určena jako součet předchozích jednotlivých hodnot spotřeby tedy:

$$c = c_{APU} + c_{eng} + c_w$$

Rovnice 5: celková spotřeba

Očekávaná úspora paliva (d): Jedná se o rozdíl celkové spotřeby paliva při standardním poježdění s motory a celkové spotřeby paliva jednotlivých systémů. Je to výsledná hodnota potenciální úspory paliva vůči standardnímu poježdění.



6.4. Model – Dráha 24

Jak již bylo zmíněno, dráha 24 je nejvyužívanější dráhou Letiště Praha, což je pak nutné v zhodnoceních zohlednit. Čas 4,8 minuty, využitý v modelu, je v kontextu světových mezinárodních letišť velice krátký čas, a tak ani spotřeba paliva pojižděním není vysoká. Na obrázku 13 je znázorněna pravděpodobná trasa pojiždění od stání 53 přes pojezdové cesty H a A po vyčkávací místo A dráhy 24.

Jak lze vidět v tabulce 7, čas pojiždění je u všech systémů stejný – tedy v tomto konkrétním případě není systém WheelTug limitován svojí maximální rychlostí, a to kvůli rychlostním omezením na odbavovací ploše SEVER, zmíněných v AIPu a také hustému provozu, který může způsobit, že letadlo bude muset před drahou vyčkávat. U systému TaxiBot je pak připočítán do času zapnutého APU i čas nutný pro odpojení letadla od vozidla. V tabulce 8 je tak vidět, že spotřeba APU je nejvyšší u TaxiBotu, což je způsobeno právě časem navíc kvůli odpojování vozidla. Očekávaná spotřeba paliva při standardním pojiždění v této modelové situaci byla 56,2 kg. V případě SET nedošlo v modelu k úspoře paliva, naopak došlo ke zvýšení spotřeby vůči standardnímu postupu. Příčinou je nutnost běžícího APU, pokud nejsou oba hlavní motory v provozu a také nutnost zahřívání druhého motoru. Všechny alternativní systémy pojiždění pak i přes nízký čas pojiždění můžou v tomto případě teoreticky uspořit palivo. Úspora však není vysoká a pohybuje se v jednotkách až desítkách kilogramů leteckého paliva.

Tabulka 7: Hodnoty časů pro model dráhy 24 [autor]

	Čas pojiždění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	4,8	0	0
SET	4,8	4,8	3
TaxiBot	4,8	7,3	3
WheelTug	4,8	4,8	3
ATS	4,8	4,8	3
EGTS	4,8	4,8	3

Tabulka 8: Hodnoty spotřeby pro dráhu 24 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Očekávaná úspora paliva d [kg]
Standard taxi	0	56,2	0	56,2	0
SET	9,5	28,1	30,6	68,2	-12,0
TaxiBot	14,4	0	30,6	45,0	11,2
WheelTug	9,5	0	30,6	40,1	16,1
ATS	9,5	0	30,6	40,1	16,1
EGTS	9,5	0	30,6	40,1	16,1



Obrázek 13: Mapa trasy poježdění letadla k dráze 24 – vzdálenost 1157 m [16]



6.5. Model – Dráha 06

Na model pro dráhu 06 je také potřeba brát větší ohled, vzhledem k využívání této dráhy ve více než čtvrtině pohybů. Obrázek 14 vyobrazuje trasu pojezdovou dráhu H a F až po vyčkávací místo F dráhy 06. Vstupní hodnota času pojezdění v tomto případě byla 6,4 minut. Vzhledem k nepoměru vzdálenosti a času k předchozímu modelu je zřejmé, že rychlost pojezdění letadla je vyšší. Příčinou vyšší rychlosti pojezdění je, že většina trasy od stání na dráhu nemá žádné rychlostní limitace. Z toho důvodu bylo zjištěno, že v tomto modelu je WheelTug limitován svým výkonem a čas pojezdění tohoto systému byl tedy vypočítán na základě vzdálenosti a maximální udávané rychlosti. Rozdíl v časech pojezdění je možné vidět v tabulce 9, s tím že rychlostní omezení WheelTuga způsobilo prodloužení času o 4,4 minuty.

V tabulce 10 je vidět, že v této modelové situaci se opět SET jeví jako nevýhodné i přes to, že se jedná o vzdálenější dráhu. Čas pojezdění navíc u systému WheelTug má pak za příčinu nižší potenciální úspory paliva.

Tabulka 9: Hodnoty časů pro model dráhy 06 [autor]

	Čas pojezdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	6,4	0	0
SET	6,4	6,4	3
TaxiBot	6,4	8,9	3
WheelTug	10,8	10,8	3
ATS	6,4	6,4	3
EGTS	6,4	6,4	3

Tabulka 10: Hodnoty spotřeby pro model dráhy 06 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Úspora paliva oproti st.
Standard taxi	0	74,9	0	74,9	0
SET	12,6	37,4	30,6	80,6	-5,8
TaxiBot	17,6	0	30,6	48,2	26,7
WheelTug	21,3	0	30,6	51,9	22,9
ATS	12,6	0	30,6	43,2	31,7
EGTS	12,6	0	30,6	43,2	31,7



Obrázek 14: Mapa trasy poježdění letadla k dráze 06 – vzdálenost 2968 m [16]



6.6. Model – dráha 12

Nejméně využívanou drahou na Letišti Praha je dráha 12. Jak lze vidět na obrázku 15, vzdálenost od parkovacího stání po vyčkávací místo D je velmi malá. I přes to je čas pojezdění vyšší než na hlavní dráhu 24 a to konkrétně 5,1 minut (tabulka 11). Z toho tedy vyplývá, že v tomto modelu je očekávaná rychlost pojezdění ještě nižší než v případě modelu dráhy 24 a tedy ani zde není WheelTug limitován svým výkonem.

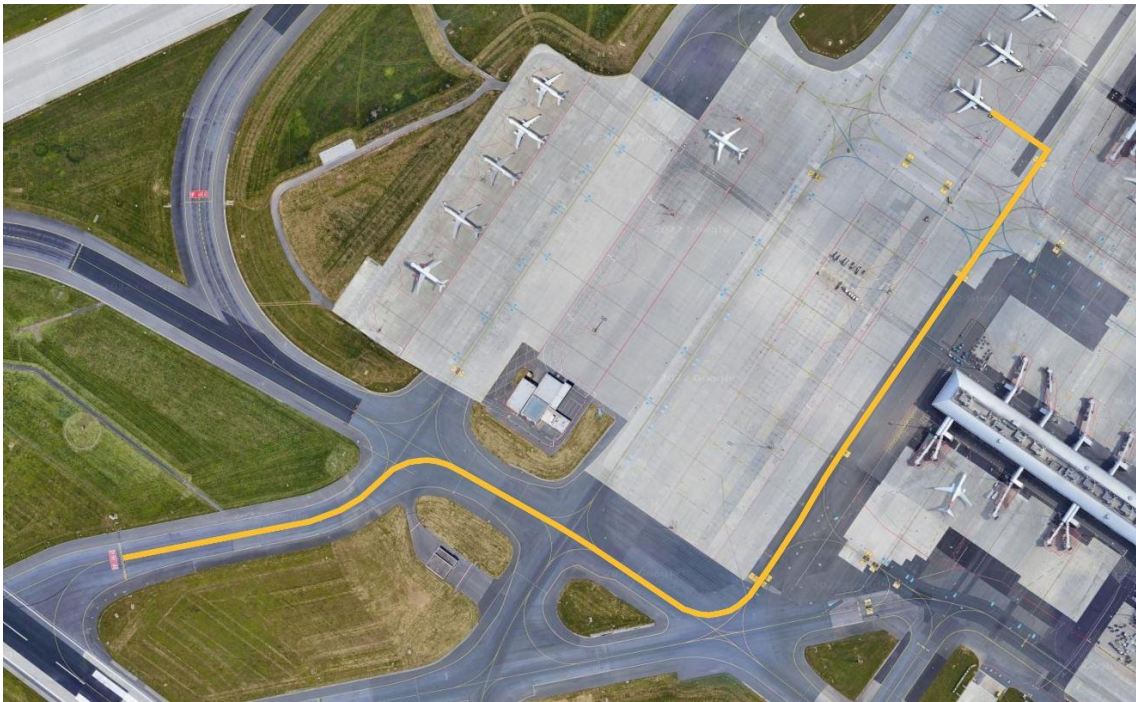
Model pro dráhu 12 je vstupními i výstupními hodnotami (tabulka 12) velice podobný modelu dráhy 24. I v tomto modelu přináší pojezdění s jedním motorem vyšší spotřebu paliva než standardní pojezdění.

Tabulka 11: Hodnoty časů pro model dráhy 12 [autor]

	Čas pojezdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	5,1	0	0
SET	5,1	5,1	3
TaxiBot	5,1	7,6	3
WheelTug	5,1	5,1	3
ATS	5,1	5,1	3
EGTS	5,1	5,1	3

Tabulka 12: Hodnoty spotřeby pro model dráhy 12 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Úspora paliva oproti st.
Standard taxi	0	59,8	0	59,8	0
SET	10,1	29,9	30,6	70,6	-10,8
TaxiBot	15,0	0	30,6	45,6	14,2
WheelTug	10,1	0	30,6	40,7	19,1
ATS	10,1	0	30,6	40,7	19,1
EGTS	10,1	0	30,6	40,7	19,1



Obrázek 15: Mapa trasy poježdění letadla k dráze 12 – vzdálenost 1085 m [16]



6.7. Model – dráha 30

Dráha 30 je dle vstupního času 7,7 minut dráha s nejdelším mediánem časů poježdění, i přes fakt že vzdálenostně je blíže než dráha 06. Trasa poježdění je znázorněna na obrázku 16 přes pojezdové cesty H a L s koncovým bodem na vyčkávacím místě L dráhy 30. Stejně jako tomu je v modelu dráhy 06, je i zde WheelTug limitován maximální rychlostí elektromotoru a čas poježdění je tedy vypočítán (tabulka 13).

Z tabulky 14 pak vidíme, že v tomto modelu dosahuje SET téměř stejné spotřeby jako standardní poježdění. Systémy WheelTug a TaxiBot mají v modelu téměř stejnou spotřebu paliva. To znamená, že čas odpojení TaxiBotu od letadla je podobný času navíc u systému WheelTug kvůli omezení rychlosti. Také je zřejmé, že teoretické úspory paliva jsou nejvyšší právě v tomto modelu a dosahují hodnot téměř 45 kg pro systémy EGTS a ATS a téměř 40 kg pro systémy WheelTug a TaxiBot. Vzhledem ke spotřebě standardním poježděním 90,6 kg, dosahují alternativní systémy poježdění úspor okolo 50 %.

Tabulka 13: Hodnoty časů pro model dráhy 30 [autor]

	Čas poježdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	7,7	0	0
SET	7,7	7,7	3
TaxiBot	7,7	10,2	3
WheelTug	10,3	10,3	3
ATS	7,7	7,7	3
EGTS	7,7	7,7	3

Tabulka 14: Hodnoty spotřeby pro model dráhy 30 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Úspora paliva oproti st.
Standard taxi	0	90,6	0	90,6	0
SET	15,2	45,3	30,6	91,1	-0,6
TaxiBot	20,2	0	30,6	50,8	39,8
WheelTug	20,4	0	30,6	51,0	39,5
ATS	15,2	0	30,6	45,8	44,7
EGTS	15,2	0	30,6	45,8	44,7



Obrázek 16: Mapa trasy pojiždění letadla k dráze 30 – vzdálenost 2844 m [16]



7. Alternativní model – paralelní postupy

Předchozí model počítal s faktem, kdy všechny postupy – pojíždění a zahřívání motorů, se konají postupně neboli za sebou v sérii. Tedy, že nejdříve letadlo provede pojíždění na vyčkávací místo, až tam provede zahřívání a poté vstupuje na dráhu a provádí vzlet. Toto řešení bylo zvoleno, jelikož startování motorů při pojíždění představuje bezpečnostní riziko pro ostatní letadla. Dalším limitem startování motorů při pojíždění je výkon APU, který nemusí být v případě on-board systémů vybavených elektromotorem dostatečný. Problém pak může být zvýšená pracovní zátěž na posádku, která by se při pojíždění musela navíc soustředit na start motorů. [13]

Je však možné, že se v budoucnu zavedou nové postupy, které by umožňovaly bezpečné startování motorů během pojíždění a tento problém by se tak vyřešil. Proto byl vytvořen alternativní model, který obsahuje stejné základní hodnoty jako předchozí model, avšak pracuje s tím, že se jednotlivé procesy dějí zároveň tedy paralelně, tzn. start motorů proběhne během pojíždění 3 minuty před dosažením dráhy, motory tak budou zahřáté na provozní teploty a letadlo může ihned vstoupit na dráhu a provést vzlet.

Jelikož se procesy v tomto modelu dějí paralelně, je **čas APU** (t_{APU}) kratší o tři minuty nutné k zahřátí. Piloti tři minuty před dosažením dráhy startují motory a poté, jakmile jsou motory v provozu, vypínají APU. Motory poté fungují na volnoběžný výkon a zahřívají se, zatímco je letadlo taženo dále k dráze. Při pojíždění s jedním motorem piloti startují druhý motor, který byl do té doby vypnutý a jakmile je nahozen, vypínají APU a pojíždí již standardně na dva motory. U systému TaxiBot je stále nutno zohlednit čas pro odpojení od letounu.

Čas APU (t_{APU}) byl v tomto modelu určen pomocí následující rovnice.

$$t_{APU} = t_t - t_w$$

Rovnice 6: Čas APU – paralelní procesy

Kde t_t je čas pojíždění a t_w je čas zahřívání v minutách.



Pro **spotřebu motorů** $c_{ENG}[\text{kg}]$ v případě pojíždění s jedním motorem musel být využit jiný vzorec, a to z důvodu, že druhý motor bude po nastartování během pojíždění pracovat na tah 7 % namísto volnoběžných otáček, jako tomu bylo v předchozím modelu. Pro SET byl tedy využit vzorec:

$$C_{ENG} = (t_{APU} * 60 * f_{eng}) + (2 * 60 * f_{eng} * t_W)$$

Rovnice 7: Spotřeba motorů – paralelní procesy

Kde f_{eng} je spotřeba paliva motory v kg/s, t_W je čas zahříváním v minutách a t_{APU} je čas, po který bylo zapnuté APU v minutách. První závorka $(t_{APU} * 60 * f_{eng})$ udává spotřebu jednoho motoru během pojíždění, při kterém zároveň běží APU. Druhá závorka $(2 * 60 * f_{eng} * t_W)$ počítá se spotřebou obou motorů při pojíždění po dobu nutnou pro zahřátí.



7.1. Alternativní model – dráha 24

Vstupní hodnoty časů poježdění jsou v těchto modelech stejné jako v těch předchozích. Rozdílný je ale čas APU, který je uveden v tabulce 15. Z výstupních hodnot v tabulce 16 je možné vidět, že oproti předchozím modelům, kde se postupy konaly v sérii, je zde nižší spotřeba APU, a tedy i celková spotřeba. To má za následek i vyšší očekávané úspory paliva, a to přibližně o 6 kg v případě alternativních systémů. Spotřeba u TaxiBotu je i v těchto alternativních modelech negativně ovlivněna procesem odpojování. Největší rozdíl spotřeby lze pak vidět u SET, které bylo v předchozích modelech velmi ovlivněno zahříváním, během kterého běžel i druhý, v tu dobu již zahřátý motor. I přesto však SET nedosahuje tak vysokých potenciálních úspor na palivu jako alternativní systémy poježdění.

Tabulka 15: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 24 [autor]

	Čas poježdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	4,8	0	0
SET	4,8	1,8	3
TaxiBot	4,8	4,3	3
WheelTug	4,8	1,8	3
ATS	4,8	1,8	3
EGTS	4,8	1,8	3

Tabulka 16: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 24 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Očekávaná úspora paliva d [kg]
Standard taxi	0	56,2	0	56,2	0
SET	3,5	45,7	0	49,3	6,9
TaxiBot	8,5	0	30,6	23,8	17,1
WheelTug	3,5	0	30,6	18,8	22,1
ATS	3,5	0	30,6	18,8	22,1
EGTS	3,5	0	30,6	18,8	22,1



7.2. Alternativní model – dráha 06

Vstupní časy jsou opět stejné. U tohoto modelu je možné v tabulce 17 vidět rozdílné časy APU u jednotlivých systémů, což je také zapříčiněno limitující rychlostí WheelTugu a časem pro odpojení systému TaxiBot. Oproti modelu s postupnými procesy pro dráhu 06 je tento čas opět nižší o 3 minuty a úspory o přibližně 6 kg vyšší (tabulka 18).

Tabulka 17: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 06 [autor]

	Čas poježdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	6,4	0	0
SET	6,4	3,4	3
TaxiBot	6,4	5,9	3
WheelTug	10,8	7,8	3
ATS	6,4	3,4	3
EGTS	6,4	3,4	3

Tabulka 18: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 06 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Úspora paliva oproti st.
Standard taxi	0	74,9	0	74,9	0
SET	6,7	55,1	0	61,7	13,1
TaxiBot	11,6	0	30,6	26,9	32,7
WheelTug	15,4	0	30,6	30,7	28,9
ATS	6,7	0	30,6	22,0	37,6
EGTS	6,7	0	30,6	22,0	37,6



7.3. Alternativní model – dráha 12

I v případě alternativního modelu jsou výsledky modelu dráhy 12 velmi podobné, těm z modelu dráhy 24. Dochází tedy k vyšší úspoře paliva než v případě postupných procesů, avšak vzdálenost k dráze není velká a úspory tak nejsou tak značné.

Tabulka 19: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 12 [autor]

	Čas poježdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	5,1	0	0
SET	5,1	2,1	3
TaxiBot	5,1	4,6	3
WheelTug	5,1	2,1	3
ATS	5,1	2,1	3
EGTS	5,1	2,1	3

Tabulka 20: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 12 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Úspora paliva oproti st.
Standard taxi	0	59,8	0	59,8	0
SET	4,1	47,5	0	51,7	8,1
TaxiBot	9,1	0	30,6	24,4	20,1
WheelTug	4,1	0	30,6	19,4	25,1
ATS	4,1	0	30,6	19,4	25,1



7.4. Alternativní model – dráha 30

U tohoto modelu pro dráhu 30, kdy byly předpokládány procesy v sérii, byla úspora okolo 50 %. V případě, že by tyto procesy probíhaly paralelně, se tyto úspory zvýšily o dalších 5 % (tabulka 22). Vzhledem k paralelním procesům a dlouhým časům poježdění na tuto dráhu, jsou výsledné úspory paliva v tomto modelu nejvyšší.

Tabulka 21: Hodnoty spotřeby pro alternativní model dráhy 30 [autor]

	Čas poježdění t_t [min]	Čas APU t_{APU} [min]	Čas zahříváním t_w [min]
Standard taxi	7,7	0	0
SET	7,7	4,7	3
TaxiBot	7,7	7,2	3
WheelTug	10,3	7,3	3
ATS	7,7	4,7	3
EGTS	7,7	4,7	3

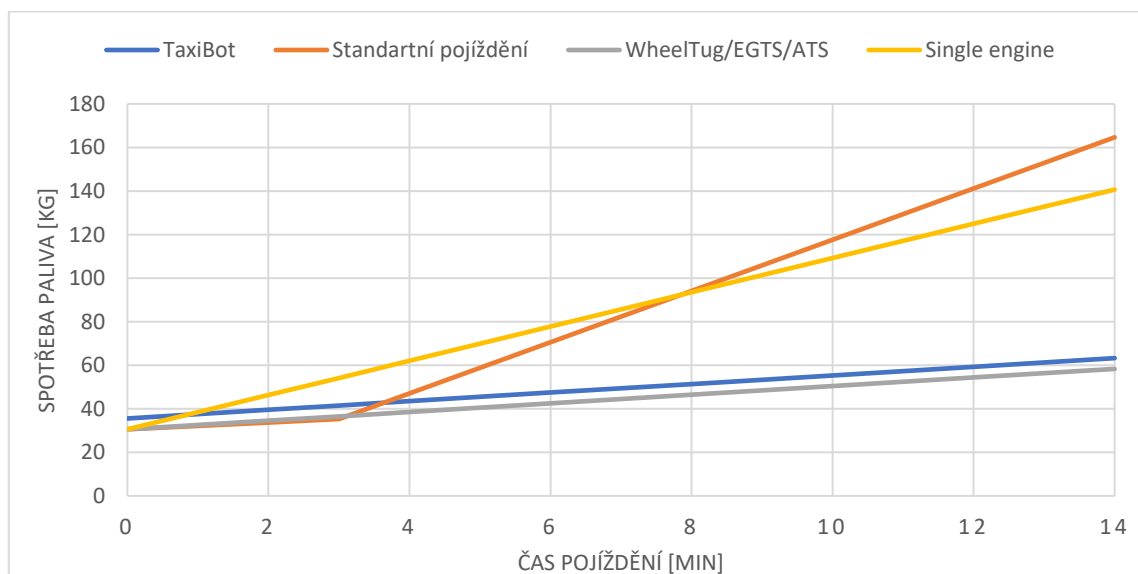
Tabulka 22: Hodnota spotřeby pro alternativní model dráhy 30 [autor]

	Spotřeba APU c_{APU} [kg]	Spotřeba motorů c_{ENG} [kg]	Spotřeba zahříváním c_w [kg]	Spotřeba celkem c [kg]	Úspora paliva oproti st.
Standard taxi	0	90,6	0	90,6	0
SET	9,3	62,9	0	72,2	18,3
TaxiBot	14,3	0	30,6	29,6	45,7
WheelTug	14,5	0	30,6	29,8	45,4
ATS	9,3	0	30,6	24,6	50,6
EGTS	9,3	0	30,6	24,6	50,6

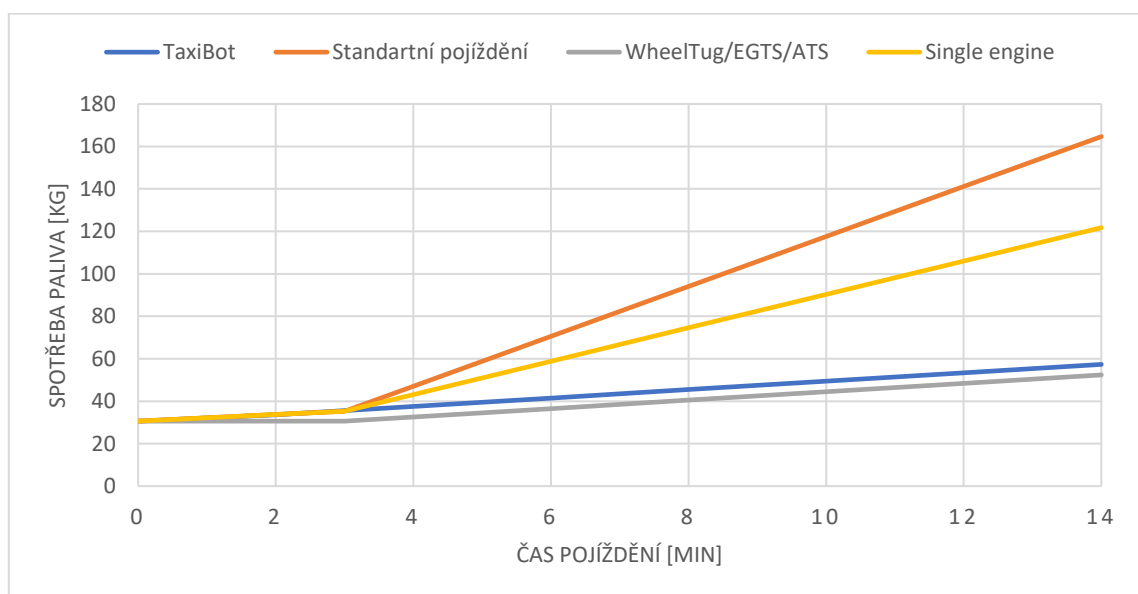
8. Výsledky

8.1 Graf spotřeby paliva

Z dat využitých v předchozích modelech byly vytvořeny dva grafy závislosti spotřeby paliva na době poježdění. Jeden graf pro sériové procesy (obrázek 17) a druhý pro paralelní procesy (obrázek 18). V těchto grafech je znázorněná spotřeba paliva jednotlivými systémy za jednotku času. Jelikož WheelTug, EGTS a ATS v tomto případě přinášejí stejné úspory, jsou tyto systémy zobrazeny dohromady. Vzhledem k povaze grafu zde není zohledněna nižší maximální rychlost poježdění systému WheelTug.



Obrázek 17: Graf spotřeby paliva za čas při postupných procesech [autor]



Obrázek 18: Graf spotřeby paliva za čas při paralelních procesech [autor]



V obou grafech je možné vidět, všechny způsoby pojiždění jsou limitovány nutností zahřívání motorů, a proto je spotřeba paliva vždy vyšší než 30,6, což je hodnota spotřebovaného paliva právě při zahřívání motorů. Z toho důvodu je množství spotřebovaného paliva v prvních třech minutách u každého systému podobné, kromě SET v grafu postupných procesů. Postup SET je v tomto případě znevýhodněn tím, že po dokončení pojiždění pomocí jednoho motoru je nutné, aby byl druhý motor zahříván po dobu tří minut. Během této doby zároveň běží i první motor, který byl již zahříván během pojiždění. Standardní pojiždění se tento problém netýká, pokud letadlo pojíždí například dvě minuty s oběma motory, stačí pak zahřívání oba motory už jen jednu další minutu.

Od času tří minut pojiždění je vidět, že rozdíl mezi spotřebami se začne prudce a lineárně zvyšovat. Z grafů je možné určit i čas, od kterého se začínají projevovat úspory alternativního pojiždění. Tento čas je mezi třemi až čtyřmi minutami. Možné je vidět rozdíl mezi systémy WheelTug, EGTS, ATS a systémem TaxiBot, jehož vyšší spotřeba je způsobena časem nutným k odpojení vozidla od letounu. Z obou grafů tedy vyplývá, že nejvyšší úspory pro provozovatele na palivu pro pojiždění přináší on-board řešení EGTS a WheelTug a ground-based systém ATS. Nutné je však opět počítat s tím, že grafy nezohledňují limitaci v podobě maximální rychlosti.

8.2. Finanční úspory

V modelech je uvedena potenciální úspora paliva v kilogramech. Finanční úspory s tím spojené jsou znázorněny v následujících tabulkách. Hodnoty jsou uvedeny v amerických dolarech (USD).

Tabulka 23: Finanční úspory na palivu – sériové procesy [autor]

	RWY 24	RWY 06	RWY 12	RWY 30
Standard taxi	63,4	84,5	67,4	102,2
Rozdíl oproti standardnímu pojiždění				
SET	-13,5	-6,5	-12,2	-0,6
TaxiBot	12,6	30,1	16,0	44,9
WheelTug	18,2	25,9	21,6	44,6
ATS	18,2	35,7	21,6	50,4
EGTS	18,2	35,7	21,6	50,4

Tabulka 24: Finanční úspory na palivu – paralelní procesy [6]

	RWY 24	RWY 06	RWY 12	RWY 30
Standard taxi	63,4	84,5	67,4	102,2
Rozdíl oproti standardnímu pojiždění				
SET	7,8	14,8	9,2	20,7
TaxiBot	19,3	36,8	22,7	51,6
WheelTug	24,9	32,6	28,3	51,3
ATS	24,9	42,4	28,3	57,1
EGTS	24,9	42,4	28,3	57,1

Řádek „standard taxi“ udává celkové finanční náklady za palivo pro danou trasu v případě pojiždění pomocí hlavních motorů letadla. V ostatních řádcích jsou uvedeny rozdíly vůči této částce. Záporné hodnoty indikují, že náklady za danou trasu jsou vyšší, než by byly v případě standardního pojiždění. Pro výpočet hodnot byla využita průměrná cena leteckého petroleje za rok 2022, která činí 143,5 amerických dolarů za barel [7]. V tabulce jsou pro lepší přehlednost zvýrazněny minimální (červeně) a maximální hodnoty úspory paliv (zeleně).

Z tabulek i z předchozích grafů vyplývá, že čím je čas pojiždění vyšší, tím jsou potenciální finanční úspory díky alternativním systémům vyšší. Také je zřejmé, že pokud procesy probíhají paralelně, úspory jsou ještě vyšší. Naopak v případě SET na kratší vzdálenosti a procesů prováděných postupně v sérii jsou úspory dokonce záporné – tedy spotřeba paliva je vyšší než při standardním pojiždění a náklady s tím spojené jsou také vyšší. Systém TaxiBot je limitován časem nutným pro odpojení od vozidla, což se negativně odráží i na samotné úspoře financí. Podobně je také WheelTug limitován svojí maximální rychlostí pojiždění, která v případě kratších vzdáleností nemá žádný vliv na čas pojiždění, tzn. rychlost pojiždění po ploše SEVER je malá. Pokud se však pojiždí na vzdálenější dráhu, maximální rychlost systému WheelTug se již projeví i na úsporách paliva, jelikož pojiždění trvá déle a tím pádem i APU musí pracovat delší dobu, což se odráží na jeho vyšší spotřebě.



9. Implementace

Práce se zabývá možnostmi teoretické implementace systémů na Letišti Praha. Tato část se tedy zaměřuje na požadavky na infrastrukturu, personál a další náležitosti, týkající se teoretického zavedení jednotlivých systémů. Náročnost implementace se velmi liší v závislosti na tom, jestli se jedná o on-board nebo ground-based systém. Tato část se zaměřuje hlavně na ground-based systémy, jejichž případná instalace a implementace by ovlivnila celé letiště, a ne pouze jeden letoun.

9.1. TaxiBot

Zásadní informace ohledně implementace a provozu systému TaxiBot byly získány ze studie proveditelnosti na letišti Schiphol. Právě tyto poznatky jsou v následujícím textu aplikovány v prostředí Letiště Praha.

9.1.1. Instalace

TaxiBot je oproti ATS koncepčně jednodušší, a tudíž jeho instalace není tak rozsáhlá a nákladná a úpravy stávající infrastruktury by tak nebyly velké. Vozidla TaxiBot jsou podobné aktuálním pushback traktorům a dokážou, mimo jiné, plnit jejich funkci. V praxi by to znamenalo, že by mohly být pushback traktory částečně nahrazeny TaxiBotem. V ideálním případě, ve kterém by všechna letadla na letišti využívala tento systém pojíždění, by mohly být pushback traktory plně nahrazeny TaxiBotem. Za podmínek, kdy by každé letadlo využívalo vozidel TaxiBot, by jich v praxi bylo potřeba více než pushback traktorů. To je zapříčiněno tím, že pushback traktor dokončí vytlačování během relativně krátké chvíle, zatímco TaxiBot musí letadlo dovézt až k dráze a poté se dostat zpět. V případě nízkého počtu vozidel TaxiBot by tak mohly často nastat případy, kdy by letadla čekala na volný TaxiBot a docházelo by k jejich zpoždění.

Dle informací od Letiště Praha jsou aktuálními provozovateli všech pushback traktorů handlingové společnosti a pokud by měly být jejich vozidla nahrazeny TaxiBotem, musely by tyto společnosti vynaložit velké zdroje. Instalace by tak pravděpodobně musela probíhat ve spolupráci s Letištěm Praha. Zároveň pro handlingové společnosti chybí motivace pro takto nejen finančně náročný projekt. Pro letiště může být v budoucnu motivací snížit emise, v tom případě by se letiště muselo na implementaci systému výrazně finančně podílet.



9.1.2. Odpojení a návrat

System aktuálně funguje způsobem, kdy je pomocí vozidla letadlo pod kontrolou pilota odtaženo co nejbližší k požadované dráze, zde je odpojeno, pilot zapíná motory letadla, vstupuje na dráhu a mezitím se TaxiBot s řidičem vrací zpět na místo (stojánka nebo kde je zrovna potřeba). Zde však vzniká pár problémů. Prvním problémem je vyřešit, kde dojde k odpojení TaxiBotu od letadla a zároveň kde bude letoun startovat a zahřívát motory. Požadavky na takové místo jsou následující:

1. Plocha musí umožnit alespoň 10 metrů přímočaré jízdy pro odpojení od TaxiBotu.
2. Pilot by měl být schopen identifikovat místo, kde zastavit jak ve tmě, tak i ve špatných meteorologických podmínkách. Doporučeno instalovat značení a osvětlení místa, kde provést odpojení.
3. Musí být zajištěno, aby mohl řidič TaxiBotu kdykoliv bezpečně vystoupit z vozidla
4. Řidič musí být schopen bezpečně dojet na tzv. all-clear point a bezpečně zde zastavit
 - All-clear point je místo v bezpečné vzdálenosti od letadla, kde dá řidič pilotovi znamení all-clear
5. Pilot i řidič musí být schopni vzájemné vizuální komunikace i za špatné viditelnosti a tmy
6. Vozidlo s řidičem je schopné bezpečně odjet z místa odpojení zpět na stanoviště/stojánku

Jedna z možností pro takové místo je odmrazovací plocha, která splňuje většinu požadavků a vyžadovala by pouze pár menších úprav. Odmrazovací plocha obvykle bývá napojena na obslužnou cestu pro odmrazovací vozidla, kterou by TaxiBot mohl využívat pro návrat zpět. Letiště Praha však takových cest nemá dostatek. Samotné vozidlo TaxiBot má pak na šířku 4.10 metrů a není zaručeno, že by bylo schopné se pohybovat po stejných cestách jako ostatní letištní vozidla.

Další možností, kde provést odpojení od vozidla, je přímo pojezdová dráha. Problémem tohoto řešení je narušení plynulého pojiždění, kdy odpojované letadlo může zdržovat letadla pojiždějící za ním a ve špičce tak vytvářet dlouhá zpoždění letů. Dalším problémem je návrat vozidla zpět na stanoviště. Na letišti Schiphol, kde byl systém testován, jsou využívány jednosměrné pojezdové dráhy, po kterých vozidlo mohlo bezpečně projet, aniž by byl výrazně ovlivněn provoz. Letiště Praha však nemá jednosměrné pojezdové dráhy, což v mnoha situacích může znamenat, že by TaxiBot při návratu na stanoviště jel protisměrně vůči pojiždějícím letadlům. Takové řešení tedy

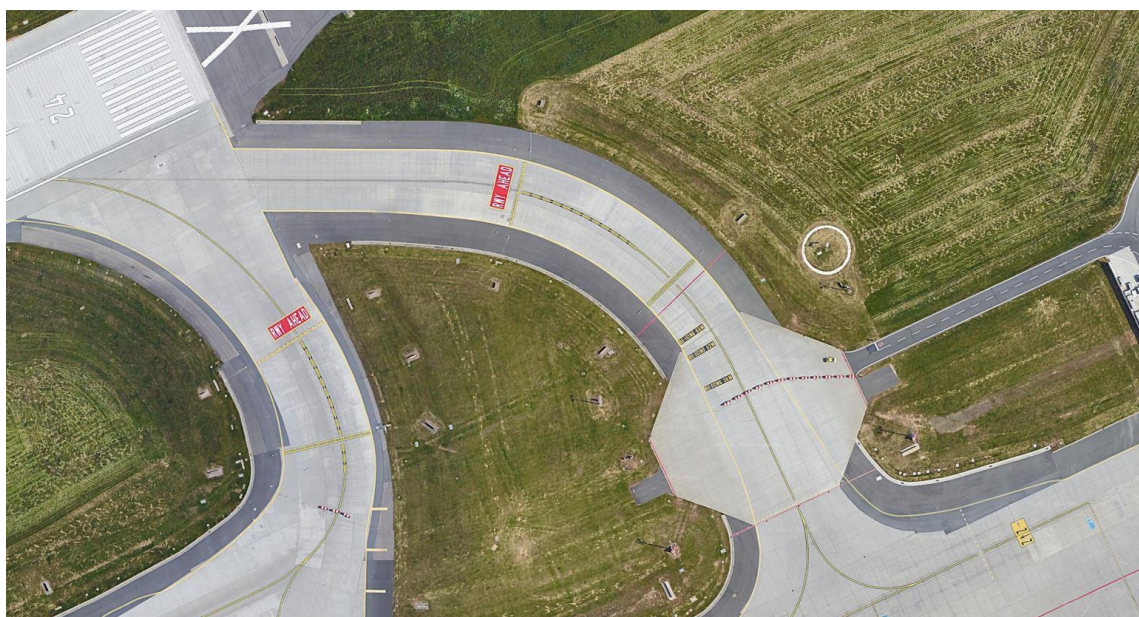
přináší vážná bezpečnostní rizika jako je kolize TaxiBotu a letadla. Proto je toto řešení považováno za neuskutečnitelné, což bylo potvrzeno i odborníky z Letiště Praha.

Dráha 24

Dráha 24 je nejvyužívanější drahou Letiště Praha. Dle dat Eurocontrol je využívána pro vzlety a přistání v 66 % případů. Dráha je však velmi blízko k odbavovací ploše sever a efektivita využití TaxiBotu pro tuto dráhu není taková jako v případě dráhy 30 či 06.

V blízkosti prahu dráhy 24 na pojezdové dráze Z se nachází odmrazovací plocha 1. Tato plocha by mohla být použita jako místo pro odpojení letounu od TaxiBot, a to hned z několika důvodů.

- Plocha umožňuje 10 m přímočarého pohybu a je tak možné provést odpojení vozidla od letounu.
- V případě potřeby, například za tmy, je možné plochu nasvítit čtyřmi reflektory. Dodatečně by bylo tedy potřeba jen instalovat označení místa, zároveň by tak mohl být vyřešen problém vzájemného vizuálního kontaktu mezi řidičem a pilotem.
- K ploše je zřízena přístupová cesta
- Plocha je velmi blízko prahu dráhy 24
- Pojezdová dráha Z není jediná, která ústí na prah dráhy 24 a tudíž by odpojovaná letadla neblokovala ostatní provoz, který by mohl případně využít pojezdovou cestu A.



Obrázek 19: Odmrazovací plocha 1 [30]



Dle letecké informační příručky (AIP) je vyčkávací místo na této pojezdové dráze (Z) způsobilé pro provoz letadla za takových meteorologických podmínek, kdy je přízemní dohlednost minimálně 5 km a základ oblačnosti minimálně 1000 ft. Pokud jsou hodnoty meteorologických podmínek nižší, je toto vyčkávací místo použitelné pouze pro letadla, která byla odmrazena právě na odmrazovací ploše 1 a jsou schopna odletu bez zdržení ze strany letové posádky.

Pro návrat vozidel zpět na stanoviště by mohla být využita přístupová cesta, která je dále napojena na síť obslužných cest. Je tedy možné se přes danou přístupovou cestu dostat ke všem stojánkám na odbavovací ploše sever. Limitujícím faktorem může být šířka vozovky vzhledem k šířce vozidla (4,10m). Maximální povolená šířka na této cestě je však 4,5 metru a vozidlo TaxiBot by mohlo tuto cestu teoreticky využít. Tato teorie byla odborníky potvrzena jako proveditelná.

Dráha 06

Dráha 06 je využívána ve 27 % případů a je tedy druhou nejvytíženější dráhou Letiště Praha. Vzhledem ke vzdálenosti od odbavovací plochy sever by bylo využití TaxiBotu pro dráhu 06 efektivnější a přineslo by větší úspory paliva. Oproti dráze 24 je zde absence plochy vhodná pro odpojení a také zde není zřízena obslužná cesta určená pro pohyb vozidla.

Dráha 12

Dráha 12 je nejméně využívaná, a to konkrétně ve 2 % případů. Dráha je v blízkosti odbavovací plochy sever a chybí zde potřebná infrastruktura pro odpojení a návrat vozidla. Vzhledem ke zmíněným faktorům je využití TaxiBotu pro tuto dráhu nevhodné.

Dráha 30

Dráha 30 je využívána ve 4 % případů a její vzdálenost od odbavovací plochy sever je, stejně jako je tomu v případě dráhy 06, příhodná k efektivnímu využití TaxiBotu. Nicméně stejně jako u dráhy 06 chybí zde plocha vhodná pro odpojení. V blízkosti prahu dráhy se nachází obslužná cesta spojující odbavovací plochy SEVER a JIH. Její šířka by však nemusela být dostatečná pro bezpečný návrat vozidla zpět.

9.1.3. Školení

Řidiči

Stávající řidiči pushback traktorů mohou být přeškoleni na TaxiBot, a to v rámci jednoho dne. Školení se skládá z teoretické přípravy a následně z praktického školení. Poznatky



z testování ukazují, že pokud řidiči nebudou delší dobu využívat TaxiBot, začnou dělat chyby v postupech a celková efektivita procesu se sníží. Z těchto důvodů je potřebné pro řidiče zřídit pravidelné školení.

Piloti

Školení pilotů probíhá v rámci studia na počítači a není potřeba žádné praktické části. Celé školení navíc trvá pouze 40 minut, což by mohlo oslovit větší množství provozovatelů pro využívání TaxiBotu na Letišti Praha.

9.2. ATS

Jelikož je systém ATS relativně nový a v praxi nebyl vyzkoušen, není mnoho dostupných informací ohledně implementace systému jako takového do stávající infrastruktury letiště. Následující kapitoly vycházejí z oficiálních informací výrobce, kde jsou některé detailně popsány, jiné zase nejsou popsány vůbec.

9.2.1. Instalace

Aircraft Towing System je velmi komplexní řešení, jehož implementace by vyžadovala rozsáhlou úpravu infrastruktury letiště. Pojezdové dráhy by musely být rozkopány a na místo středové čáry by byl vyhlouben 80 cm výkop, do kterého by byly umístěny kolejnice po 15-17ti metrových modulech. Strategie instalace je taková, aby byl dopad na běžný provoz letiště minimální. Toho je dosaženo právě díky instalování kolejnic po modulech a práce by byla prováděna během noci, kdy je letiště bez provozu a denní fungování by tak nemělo být ovlivněno. Společnost uvádí, že během jedné osmihodinové noční směny nainstaluje až 250 metrů kolejnic. V případě Letiště Praha, kde jsou vzdálenosti poježdění krátké by instalace nemusela trvat příliš dlouhou dobu. V modelových situacích, které máme pro LKPR, by to tak znamenalo minimálně 4 dny pro model dráhy 24 a minimálně 14 dní pro model dráhy 06. Tato úvaha však bere v potaz pouze jednu konkrétní stojánku. Pro reálné využití by bylo potřeba kolejnice instalovat ke všem stojánkám, které jsou běžně používány. Doba instalace by pak byla značně delší. Samotné tažné vozíky jsou pak vyrobeny a dovezeny v závislosti na potřebách letiště.

Konečná fáze instalace je samotná integrace softwaru ATS do již existujícího softwaru letiště. Systém by byl pak ovládán a monitorován stanovištěm GROUND. Samotná letadla žádnou úpravu nevyžadují. Na rozdíl od systému TaxiBot, který by mohla provozovat handlingová společnost, u ATS by byl z důvodu rozsáhlé integrace systému do existující infrastruktury a pozemních stanovišť pravděpodobný provozovatel letiště.

[23]



9.2.2. Návrat vozíků

Vozíky jezdí v tunelu po kolejnici a není tedy možné, aby se vraceli stejnou cestou, aniž by omezili ostatní vozíky, které například táhnou další letadlo ke vzletu. Řešením je, že vozíky se budou vracet jinou kolejnicí. Tato kolejnice by mohla být usazena paralelně ke kolejnici zapuštěné v pojezdové cestě a vozíky by cestovaly obousměrně. Výhodou by byla jednodušší a levnější instalace, kdy by mohly být kanály dvojitě/obousměrné, a tedy umístěovány jako jeden modul. Druhá možnost, která je zobrazena i ve videomateriálech společnosti ATS, je že kolejnice určena pro návrat vozíku vede pod zemí a mimo pojezdovou dráhu. Takové řešení by přineslo výhodu, že by trasa vozíku byla přímá a co možná nejkratší. To by přineslo výhodu tu, že návrat vozíku na stanoviště by netrval tak dlouho, což by systém udělalo efektivnější. Zároveň pokud by vozíky netrávily tolik času návratem, jejich počet by mohl být nižší a celý projekt by byl ve výsledku levnější. [23]

9.2.3. Školení

Zavedení ATS by si vyžádalo nábor nových zaměstnanců, kteří jej budou monitorovat, aktualizovat software, udržovat a případně opravovat. Stejně tak bude potřeba proškolení stávající zaměstnance, kteří se systémem budou pracovat. Na rozdíl od TaxiBotu, kde je školení pilotů v rámci samostudia, je možné předpokládat, že vzhledem ke komplexnějšímu řešení, bude nutné i praktické školení pilotů. Tento fakt by mohl zapříčinit, že letecké společnosti, obzvláště zahraniční, zvolí raději na LKPR standardní pojiždění. Stejně jako u TaxiBot je pro implementaci ATS nutné zavést nové postupy a přijmout nová opatření – opět je pravděpodobné, že tento komplexní systém bude vyžadovat více nových postupů a opatření oproti TaxiBot.

Otázkou je, zdali na letišti, kde by byl tento systém zaveden, by byla stále možnost standardního pojiždění. ATS ve své podstatě nahrazuje středovou čáru pojezdových drah a pokud by jeho instalace omezila nebo úplně znemožnila konvenční způsob pojiždění, značně to snižuje celkovou flexibilitu využití. Odborníci z Letiště Praha tvrdí, že by kolejnice samotná mohla případně sloužit jako středová čára, tedy pouze pokud tím nevznikne riziko poškození letadla nebo systému. Další obava s tímto problémem spojená se týkala malých letadel, u kterých vzniká reálná šance, že by se mohlo kolo příďového podvozku zaseknout ve štěrbině mezi povrchem a kanálem s kolejnicí. Stejně jako je tomu u systému TaxiBot i zde platí, že letadlo musí 3 minuty před vzletem nastartovat a zahřát motory. Pokud by zahřívání motorů bylo možné provádět během tažného pojiždění, znamenalo by to, že by byl celý proces více časově efektivní, tzn. nebyla by mezi odpojením od vozidla a samotným vzletem. [23]



9.3. WheelTug a EGTS

WheelTug a EGTS jsou systémy typu on-board, kdy vše potřebné pro jejich provoz je součástí letounu, tudíž z hlediska letiště nejsou nutné žádné úpravy. Pro Letiště Václava Havla tak nevznikají žádné dodatečné náklady v případě, že by některá letadla tyto systémy využívala. Jelikož je systém WheelTug limitován svojí maximální rychlostí pojíždění a také sklonem a trakčními vlastnostmi pojezdových drah a je tak možné, že nebude letoun pojíždějící pomocí tohoto systému schopen pojíždět určitým úsekem. V takovém teoretickém případě by posádka musela ukončit elektrické pojíždění a provést start hlavních motorů, pomocí kterých pojíždění dokončí. Pokud by se takový systém stal rozšířeným napříč leteckými společnostmi, bylo by třeba zavést nové postupy, aby se zamezilo třeba právě výše zmíněné situaci – například vydat mapu, podobnou mapě tras pro kritické typy letadel, která by stejným způsobem označovala pojezdové cesty nevhodné pro WheelTug/EGTS. Jelikož minimální rychlost pojíždění není definována a na stojánce SEVER jsou stejně zavedeny limity rychlosti pojíždění na 10 kt, neměla by tato limitace činit problémy pro provoz. WheelTug je dle výrobce jednoduchý na instalaci, která proběhne v krátkém čase a případná demontáž také nedělá problém. Veškerou instalaci a údržbu zajišťuje také firma samotná. Z dostupných informací víme, že instalace EGTS by byla vzhledem k umístění náročnější a pravděpodobně i trvalé.

Co se týče školení, tak v případě WheelTug je školení vyřešeno podobně jako u předchozího systému, a to tedy krátkým školením prostřednictvím počítače. Možností je také využití jednoduchého simulátoru, který je složen z kabiny letounu, kde je instalován ovládací panel WheelTug a projektoru, který zobrazuje simulované okolní prostředí letiště. Tento simulátor bylo možné vidět již v propagačních videích WheelTug a jeho případné využití pro školení posádek by mohlo mít pozitivní vliv. Ohledně školení EGTS není k dispozici žádná informace, vzhledem k velmi podobnému ovládání je pravděpodobné, že by školení probíhalo také na počítači a případně na jednoduchém simulátoru.



10. Náklady na implementaci a provoz

Vzhledem k odlišnému způsobu řešení vybraných systémů, nelze bohužel jednoznačně porovnat náklady na jejich implementaci a provoz. Hlavním problémem je porovnání on-board a ground-based. On-board systém je v plné kompetenci provozovatele letounu a hradí také veškeré náklady na implementaci a údržbu. Zároveň je to právě provozovatel, kdo z tohoto systému má benefity v podobně nižších nákladů za palivo při pojiždění či údržbu motorů.

V případě ground-based systémů je za celý systém zodpovědné letiště, tudíž jdou veškeré náklady na zavedení a údržbu za ním. Provozovatelem systému TaxiBot může být teoreticky i handlingová agentura, která spravuje právě i pushback traktory. V každém případě však vzniká problém, kdy užitek z těchto systémů mají hlavně aerolinky na uspořené palivo, ačkoliv náklady za pořízení a provoz hradí letiště či handlingová agentura. Jednou z možností, jak toto vyřešit je zavést poplatek za využití služby. Tato cena by se mohla odvíjet od typu letounu a také vzdálenosti pojiždění. Dalším řešením, které navrhuje společnost ATS, by byla dohoda mezi aerolinkami a provozovatelem systému o procentuálním poplatku z hodnoty ušetřeného paliva. ATS navrhuje konkrétně 50 % podíl – tedy aerolinka, která díky ground-based systému ušetří 50 USD za palivo pro pojiždění by z této částky odevzdala polovinu (25 USD), jako poplatek za službu. V takovém případě by mohly ze systému benefitovat obě strany. Z modelů, kde byla vypočtena potenciální úspora paliva a následně i financí, je patrné, že úspory paliva v prostředí Letiště Praha jsou velmi malé. Je tak pravděpodobné, že by procentuální poplatek za ušetřené palivo nepokryl ani náklady na provoz samotného systému.

Hlavním nákladem na implementaci systému TaxiBot je samotná koupě vozidel a úprava infrastruktury, jako je vymezení ploch pro odpojení a zajištění obslužných cest pro návrat vozidel. Jedním z provozních nákladů je spotřeba dieselových generátorů pohánějících elektromotory vozidla. Ze dokumentu studie proveditelnosti letiště Schiphol víme, že výše spotřeby dieselového paliva jednoho vozidla je 0,55 kg/min. Pro odhad nákladů spojených se spotřebou vozidla můžeme vytvořit jednoduchý model. Předpokládejme, že vozidlo se připojí k letadlu, odtáhne ho před dráhu, kde provede odpojení a následně se vrátí zpět na místo, odkud vyjelo. Počítejme se stejnými časy pojiždění jako u předchozích modelů, kde zohledníme čas pro odpojení a pro návrat vozidla. Dobu návratu pak budeme uvažovat stejnou jako dobu pojiždění. Lze však předpokládat, že doba návratu bude vzhledem k odlišné trase vozidla delší. Z těchto dat při aktuální ceně ropy v ČR 1,9 USD za litr [36] lze dostat následující hodnoty nákladů za pojiždění.



Tabulka 25: Srovnání nákladů za palivo vozidla TaxiBot proti potenciálním úsporám systému [autor]

	RWY 24	RWY 06	RWY 12	RWY 30
Náklady za palivo vozidla TaxiBot	15	19	16	22
Úspora vůči standardnímu pojiždění	12,6	30,1	16	44,9

Hodnoty v tabulce odpovídají hodnotám v USD. V prvním řádku je odhad nákladů za palivo na danou trasu uvedenou v hlavních modelových případech. V druhém řádku jsou pak pro porovnání hodnoty finančních úspor, které TaxiBot může přinést. Hodnoty časů pro návrat TaxiBotu byly zvoleny spíše konzervativně a lze tedy očekávat že ve skutečném provozu by byly náklady ještě vyšší. Je zřejmé, že náklady Je tedy zřejmé, že v případě blízkých drah 24 a 12 jsou náklady na palivo systému TaxiBot stejné nebo dokonce vyšší, než je potenciální úspora paliva. To by znamenalo, že i kdyby byl poplatek za využití 100 % finanční úspory na palivu, provozovatel TaxiBotu by byl ve ztrátě. Zároveň poplatek vyšší, než je 100 % by odradil letecké společnosti od využití tohoto systému úplně. V případech vzdálenějších drah 06 a 30 by procentuální poplatek mohl vytvořit situaci výhodnou jak pro aerolinku, tak i pro provozovatele systému. Výrobce TaxiBotu také zmínil, že se v budoucnu počítá s plně elektrickou verzí TaxiBotu, jejíž provoz by nemusel být tak finančně náročný.

U druhého ground-based systému ATS je z dostupných informací pravděpodobné, že náklady na jeho provoz budou vyšší než v případě TaxiBotu. ATS je sice plně elektrický a náklady za fosilní paliva jsou nulová, avšak spotřeba elektrické energie takto rozsáhlého systému může mít za následek velké finanční náklady. Dalším nezanedbatelným faktorem je údržba systému, u které můžeme také předpokládat vysoké náklady.

Jak již bylo zmíněno on-board řešení je v ohledu financování jednoznačné a je jen na aerolince, aby zhodnotila, jestli se takový systém pro jejich potřeby vyplatí. Přidaná váha letounu se samozřejmě negativně projeví na spotřebě paliva při letu. Pro pochopení situace slouží tabulka 26 s uvedenou přibližnou hmotností paliva, které bude spáleno navíc, pokud letoun Boeing 737 MAX 8 bude vybaven jedním z on-board systémů. Data pro tabulku byla pro lepší přehlednost přepočítána z imperiálních jednotek do jednotek SI a následně využita pro výpočet dodatečné spotřeby.



Tabulka 26: Spotřeba navíc vlivem váhy systémů [autor]

	Váha [kg]	Spotřeba navíc [kg/hod]
WheelTug	130	6,7
EGTS	400	20,8

Vzhledem k dodatečné váze systému na letadle je zřejmé, že využití těchto systémů bude výhodné jen v případě letů na kratší vzdálenosti. Při delším letu by mohly dopady dodatečné váhy systému převážit pozitiva. Pokud bychom porovnali hodnoty z modelu dráhy 24 a tabulky 26, zjistíme, že přínos systému na zemi převáží negativa za letu do zhruba 2,5 hodin. U systému EGTS je to přibližně pouze 45 minut.

Systém WheelTug bude poskytován způsobem pronájmu, kdy aerolinka bude platit pouze za čas, kdy systém využívala. Pro provozovatele by to mohl být velice výhodný systém, jelikož veškeré náklady za instalaci a údržbu bude hradit společnost WheelTug. Jelikož vývoj EGTS byl ukončen, nebyl představen žádný finanční model, jak by byl systém prodáván či pronajímán.



11. Zhodnocení výsledků

Jako hlavní výhoda u alternativních systémů pojiždění se jeví úspora paliva, a tedy i finančních prostředků. Jednotlivé modely pracovaly právě s potenciálními úsporami paliva. Z těchto výsledků je ale patrné, že úspory na palivu nejsou zásadní a systémy tak v prostředí LKPR nejsou efektivně využity. Příčinou této nízké efektivity je krátké pojiždění jak vzdálenostně, tak i časově. Obzvláště krátké časy jsou k dráze 24, která je zároveň nejvyužívanější drahou letiště, a tudíž je na ni brán zřetel při zhodnocování výsledků.

S nízkými časy pojiždění souvisí i fakt, že letecké motory, jak proudové, tak i turbovrtulové a pístové, potřebují před vzletem určitý čas běžet z důvodu zahřátí na provozní teploty. V podmínkách Letiště Praha však čas nutný pro zahřátí téměř dosahuje hodnot času pojiždění na dráhu 24, což by v praxi znamenalo, že by po většinu doby pojiždění motory letadla stejně běžely. Tento problém byl znázorněn i v grafech spotřeby paliva, z kterých je patrné, že minimální nutná doba pojiždění, aby byl kterýkoliv systém přínosem, činí 3-4 minuty. Doba pojiždění na dráhu 24 (4,8 minut) je sice vyšší než toto minimum, je ale nutné podotknout, že uvedená hodnota je mediánem všech hodnot pro tuto dráhu. Fakt, že se jedná o medián znamená, že polovina všech časů je nižší než 4,8 minut a je velmi pravděpodobné, že některé časy budou dosahovat i hodnot nižších než právě 3 minuty. Žádný z dostupných systémů tedy nepřinese zásadní úspory na palivu, obzvláště když opět uvážíme, že 66 % všech pohybů se odehrává na dráze 24.

Druhým faktorem pro určení neoptimalnějšího systému pro použití na LKPR byla náročnost implementace a údržby pro Letiště Praha. Řešení ATS je nejnáročnější jak na implementaci, tak i na údržbu a pochybnosti ohledně celkového fungování a realizace tohoto systému přináší více otázek než odpovědí. TaxiBot pak za značně nižší náklady na implementaci i na provoz přináší podobné výsledky, co se úspory paliva týče. Oba tyto systémy ale vyžadují jistou úpravu stávající letištní infrastruktury a investici ze strany letiště. On-board systémy jsou z hlediska implementace nenáročné – letiště nemusí podniknout žádné kroky a provozovatelé si vše zařídí sami. Nejzajímavější je řešení WheelTug, které se zdá výhodné pro všechny zúčastněné strany – provozovatel sníží náklady za palivo, přičemž část uspořených financí připadne společnosti WheelTug. Letišti pak nevznikají za provoz tohoto systému žádné náklady.

Pokud bychom měli určit, který systém se jeví jako nejideálnější pro využití na LKPR, tak dle výsledků z modelů a srovnání půjde o systém WheelTug. Nevýhoda tohoto systému, tedy malá rychlost pojiždění, se v případě trasy na dráhu 24 nejeví jako problém a při



pojízdní na ostatní dráhy není rozdíl v úsporách mezi WheelTug a ostatními systémy zásadní. Co se týče vlastností, EGTS je na zemi lepší systém, avšak jeho násobná váha oproti WheelTug není zanedbatelná. Dodatečná spotřeba paliva za letu právě kvůli přidané váze EGTS dokáže i na krátké trati převážit úsporu paliva na zemi, což je při porovnání úspor z modelů s hodnotami z tabulky 26 zřejmé. Přidaná váha systému WheelTug dle odhadu v tabulce 26 zvýší spotřebu jen o 6,7 kg, což by v případě kratších letů v rámci Evropy nemuselo převažovat úspory na zemi. Ground-based systémy byly zhodnoceny jako nevýhodné pro využití na LKPR, jelikož jejich provoz na krátké vzdálenosti, tedy i na dráhu 24, stojí více, než dokážou přinést na úsporách. Zároveň návratnost takového velice drahého zařízení by byla pro letiště jako provozovatele velmi malá či dokonce žádná.

Celkově však žádné z řešení nepřináší v podmínkách Letiště Praha očekávané úspory, a i v případě systému WheelTug je jeho přínos v oblasti pojízdní diskutabilní. Další vývoj v odvětví alternativního pojízdní však může přinést efektivnější systémy, jejichž využití přinese skutečně velké úspory i v prostředí LKPR. Hlavním problémem ve využití těchto systémů na Letišti Praha jsou relativně krátké vzdálenosti a časy pojízdní. Výstavba nové paralelní dráhy k dráze 06/24, která bude ve větší vzdálenosti od stojanky SEVER, by však mohla otevřít nové možnosti využití alternativních systémů pro pojízdní.



12. Závěr

Tato práce se zabývá možností implementace určitého systému, který by umožnil letadlu pojíždět bez využití síly vlastních motorů. V teoretické části práce byl analyzován aktuální stav pojíždění se všemi jeho problémy i výhodami a přiblížena byla také situace na Letišti Praha, které je předmětem této práce. Následně byly představeny alternativy neboli systémy alternativního pojíždění, které jsou nebo byly ve vývoji. Teoretická část tak přibližuje problémy, které by zavedení systémů přinášelo a zároveň ukazuje rozdílné řešení každého systému, a tedy i náročnost vzájemného porovnání.

V praktické části bylo cílem objektivně porovnat systémy a určit, který z nich by byl nejideálnější pro využití v podmínkách LKPR s tím, že se počítalo i s možností, že to nebude žádný z nich. Při vytváření modelů, které měly za cíl kvantifikovat jinak obtížně srovnatelné řešení/systémy, bylo cílem vytvořit modely co nejvíce odpovídající skutečným situacím. Zároveň bylo cílem zohlednit v modelech v rámci možností každou proměnnou, která se může vyskytnout. Bohužel ne s každou proměnnou bylo možné počítat. Mediány časů pojíždění, poskytnuté společností Letiště Praha a.s. jsou počítány od prvního pohybu letadla až po čas, kdy letadlo vstoupí na dráhu. Tedy neberou v potaz případnou frontu před vstupem na dráhu. Problémem, na který bylo během psaní práce často naráženo, byl také fakt, že ohledně systému ATS není k dispozici dostatečné množství informací z různých zdrojů. Výsledky z modelů však i tak přinesly velmi zajímavé informace, pomocí kterých mohly být jednotlivé systémy porovnány.

Je důležité zmínit, že tato práce zároveň počítala pouze se situacemi pojíždění taxi-out. Jelikož výsledky úspor paliva nebyly příliš vysoké, je jisté že v případě modelových situací taxi-in by byly ještě nižší, nulové nebo až záporné. Pokud by se však úspory pro taxi-out v této práci ukázaly být takové, že by to jasně indikovalo vysokou účinnost systému, pak by bylo na místě zvážit i modelové situace pro taxi-in.

Mnoho informací týkající se systému TaxiBot vycházelo ze studie proveditelnosti na letišti Schiphol. Tato studie byla cenným zdrojem různých zajímavých informací a poznatků, které pak byly v práci využívány, obzvláště pak v části zabývající se teoretickou implementací. Zároveň byla možnost implementace diskutována i s odborníky na tuto problematiku. Ve výsledku tato část odhalila problémy spojené s implementací jednotlivých systémů, konkrétně pak těch ground-based.



Ve finální části byla na základě předchozích poznatků zhodnocena možnost využití jednotlivých systémů v prostředí Letiště Praha a určen potenciálně nejvhodnější systém. Výsledky však nebyly jednoznačně přesvědčivé, aby mohl být s jistotou vybrán jeden systém a určen jako ten správný, který přinese úspory při pojiždění na tomto letišti. Jelikož se v blízké době bude konat studie proveditelnosti systému WheelTug na LKPR, je možné tuto práci využít jako podklad pro následující práce s tím spojené. Jelikož je tato problematika relativně nová, tak je možné očekávat vývoj dalších nových řešení, proto může tato práce sloužit jako podklad pro další budoucí práce a studie navazující na tuto problematiku.



13. Zdroje

- [1] EVROPSKÁ KOMISE, , GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ PRO MOBILITU A DOPRAVU a GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ PRO VÝZKUM A INOVACE. *Flightpath 2050 : Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs* [online]. Publications Office, 2011 [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: doi:10.2777/50266
- [2] GUO, Rui, Yu ZHANG a Qing WANG. Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. 2014, **44**, 98-109 [cit. 2022-05-27]. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2014.03.006
- [3] HOSPODKA, Jakub. Cost-benefit analysis of electric taxi systems for aircraft. *Journal of Air Transport Management* [online]. 2014, **39**, 81-88 [cit. 2022-06-23]. ISSN 09696997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jairtraman.2014.05.002
- [4] Taxi times - Summer 2019. In: *Eurocontrol* [online]. [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/taxi-times-summer-2019>
- [5] Airline Industry Economic Performance - December 2019 - Report. In: *IATA* [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industry-economic-performance---december-2019---report/>
- [6] MERKERT, Rico a Hassan SWIDAN. Flying with(out) a safety net: Financial hedging in the airline industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2019, **127**, 206-219 [cit. 2022-07-07]. ISSN 13665545. Dostupné z: doi:10.1016/j.tre.2019.05.012
- [7] Jet Fuel Price Monitor. In: *IATA* [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>
- [8] T. TURGUT, Enis, Ozgur USANMAZ a Marc A. ROSEN. Estimation of Commercial Aircraft Emissions According to Flight Phases. *Research Journal of Environmental Sciences* [online]. 2014, **8**(5), 294-299 [cit. 2022-07-25]. ISSN 18193412. Dostupné z: doi:10.3923/rjes.2014.294.299



- [9] STETTLER, M., G. KOUDIS, S. HU, A. MAJUMDAR a W. OCHIENG. The impact of single engine taxiing on aircraft fuel consumption and pollutant emissions. *The Aeronautical Journal* [online]. 2018, **122**(1258), 1967-1984 [cit. 2022-05-27]. ISSN 0001-9240. Dostupné z: doi:10.1017/aer.2018.117
- [10] F. GUGLIERMETTI, , FABIO BISEGNA, ANNA CARMELA VIOLANTE a C. AURELI. *Noise exposure of the ramp's operators in airport apron* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/293100788_Noise_exposure_of_the_ramp's_operators_in_airport_apron/related
- [11] HUSSIN, R, N ISMAIL a S MUSTAPA. A study of foreign object damage (FOD) and prevention method at the airport and aircraft maintenance area. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2016, **152** [cit. 2022-07-25]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/152/1/012038
- [12] INSIGHT SRI. *The economic cost of FOD to airlines* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <http://fod-detection.com/wp-content/uploads/2009/12/the-economic-cost-of-fod.PDF>
- [13] LUKIC, Milos, Paolo GIANGRANDE, Ahmed HEBALA, Stefano NUZZO a Michael GALEA. Review, Challenges, and Future Developments of Electric Taxiing Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* [online]. 2019, **5**(4), 1441-1457 [cit. 2022-06-21]. ISSN 2332-7782. Dostupné z: doi:10.1109/TTE.2019.2956862
- [14] *WheelTug* [online]. [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: <https://www.wheeltug.com/>
- [15] OSORIO, Angelica a Martin ZORRILLA. The EGTS: When the Aerospace Ecosystem is not Ready. *2018 IEEE ANDESCON* [online]. IEEE, 2018, 1-6 [cit. 2022-06-23]. ISBN 978-1-5386-8372-9. Dostupné z: doi:10.1109/ANDESCON.2018.8564729
- [16] Safran suspends electric jet taxiing project after Airbus ends talks. In: *Reuters* [online]. [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-safran-airbus-taxi-idUSKBN1Y72MN>
- [17] Airport-Data.com. In: *Airport-Data.com* [online]. [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.airport-data.com/aircraft/photo/001058743.html>



- [18] HOSPODKA, Jakub. Electric taxiing – Taxibot system. *MAD - Magazine of Aviation Development* [online]. 2014, 2(10), 17-20 [cit. 2022-06-27]. ISSN 1805-7578.
Dostupné z: doi:10.14311/MAD.2014.10.03
- [19] *TaxiBot* [online]. [cit. 2022-06-27]. Dostupné z:
<https://www.taxibot-international.com/>
- [20] LUKIC, M., A. HEBALA, P. GIANGRANDE et al. *State of the Art of Electric Taxiing Systems* [online]. IEEE, 2018, 1-6 [cit. 2022-06-28]. ISBN 978-1-5386-4192-7.
Dostupné z: doi:10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607786
- [21] TaxiBot Now Certified on Airbus A320 Family. In: *AviationPros* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z:
<https://www.aviationpros.com/gse/pushbacks-tractors-utility-vehicles/press-release/12335619/tld-taxibot-now-certified-on-airbus-a320-family>
- [22] Ricardo engineered vehicle concept aims to reduce aircraft fuel costs, CO2 emissions – and noise. In: *Ricardo* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z:
<https://ricardo.com/news-and-media/news-and-press/ricardo-engineered-vehicle-concept-aims-to-reduce>
- [23] *Aircraft Towing Systems* [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z:
<https://aircrafttowingsystems.com/>
- [24] Airbus Aircraft. In: *Airbus Aircraft* [online]. x: x, x [cit. 2021-06-09]. Dostupné z:
<https://services.airbus.com/en/flight-operations/system-upgrades/fuel-efficiency/single-engine-taxi-without-apu.html>
- [25] O společnosti: Historie Letiště Václava Havla. In: *Letiště Praha* [online]. [cit. 2022-06-11]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/historie-letiste-vaclava-havla-praha>
- [26] Paralelní dráha. In: *Letiště Praha* [online]. [cit. 2022-06-11]. Dostupné z:
<https://www.prg.aero/paralelni-draha>
- [27] Historie dráhového systému. In: *Letiště Praha* [online]. [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/historie-drahoveho-systemu>
- [28] *Aeronautical information publication* [online]. Air Navigation Services of Czech Republic, 2021 [cit. 2022-06-11]. Dostupné z:
https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm



- [29] Eurocontrol: Public Airport Corner. In: *Eurocontrol* [online]. [cit. 2022-07-28].
Dostupné z: https://ext.eurocontrol.int/airport_corner_public/strategic
- [30] *Google Earth* [online]. Google, 2019 [cit. 2022-06-11]. Dostupné z:
earth.google.com
- [31] LETIŠTĚ PRAHA A.S. % podíl zastoupení konkrétních typů letadel: Období
1.1.2019-31.12.2019.
- [32] LETIŠTĚ PRAHA A.S. Časy pojíždění z jednotlivých sektorů na RWY: Median za
období 1.1.2019-31.12.2019.
- [33] Aircraft - Emission Indices and Fuel Consumption Rates. In: *Environmental
Protection Department: The Government of the Hong Kong Special Administrative
Region* [online]. [cit. 2022-06-25]. Dostupné z:
https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_2232014/html/Appendix%205.3.1-2a.pdf
- [34] NOWACKI, Marcin a Damian OLEJNICZAK. Analysis of Boeing 737 MAX 8 Flight,
in Terms of the Exhaust Emission for the Selected Flight. In: *Transportation
Research Procedia* [online]. 2018, , s. 158-165 [cit. 2022-07-13]. ISSN 23521465.
Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2018.12.033
- [35] DIRK BRESSER, a SIMON PRENT:. *Schiphol* [online]. In: . [cit. 2022-07-06].
Dostupné z: <https://www.schiphol.nl/en/innovation/blog/single-engine-taxiing/>
- [36] Diesel prices, litre, 01-Aug-2022. In: *Global Petrol Prices* [online]. [cit. 2022-08-04].
Dostupné z: https://www.globalpetrolprices.com/diesel_prices/