



Bc. David Rozhon

Optimalizace využívání manipulační techniky na letišti Praha

Optimization of Use of Handling
Equipment at Prague Airport

Diplomová práce

Vedoucí práce:

doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam

Autor: Bc. David Rozhon, ROZ0076

Název práce: Optimalizace využívání manipulační techniky na letišti Praha

Studijní program: N1041A040002 – Dopravní systémy a technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 51

Klíčová slova: optimalizace, letiště, technické odbavení letadel, pásový nakladač zavazadel.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. ROZHON, David. *Optimalizace využívání manipulační techniky na letišti Praha: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2021, 51 s. Vedoucí práce: Teichmann, D.

Diplomová práce se zabývá optimalizací počtu pásových nakladačů zavazadel potřebných k obslužení daného počtu letů. Důvodem je např. efektivní hospodaření s vozidlovým parkem těchto prostředků a snížení nákladů na jejich pořízení a provoz. První část práce se věnuje charakteristice procesu technického odbavení letadel a popsání jednotlivých druhů manipulačních prostředků, které se do procesu handlingu zapojují. Další část práce je zaměřena na formulaci problému a vytvoření matematického modelu. Dále je popsána aplikace daného modelu včetně představení pracovního prostředí pro jeho řešení. Po ukončení optimalizačního výpočtu jsou dosažené výsledky zpracovány a interpretovány.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. ROZHON, David. *Optimization of Use of Handling Equipment at Prague Airport: Master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2021, 51 p. Thesis head: Teichmann, D.

This master thesis deals with the optimization of belt luggage loaders needed to operate at given number of flights. The reason is, for example, the efficient management of the vehicle fleet of these loaders and the reduction of the costs of their operation or equipment. The first part deals with the characteristics of the aircraft handling process and the description of individual ground handling equipment participating in the handling process. The next part of the thesis is focused on formulation of the problem and the creation of mathematical model. Furthermore, the application of the model is described, including the introduction of the working environment and its use. After completing of the optimization calculation, the results are processed and described.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod	8
1. Charakteristika technického odbavení letadel	9
1.1 Charakteristika odbavovací techniky pro technický handling	10
1.1.1 Pozemní zdroj energie	10
1.1.2 Klimatizační jednotka	10
1.1.3 Vzduchový startér.....	11
1.1.4 Refueler	12
1.1.5 Vozidlo s pitnou vodou a fekální vozidlo	12
1.1.6 Cateringové vozidlo	13
1.1.7 Schody	14
1.1.8 Autobusy.....	15
1.1.9 Vytlačovací tahač (Pushback tugs and tractors)	15
1.1.10 Nůžkový nakladač	17
1.1.11 Pásový nakladač zavazadel	18
1.1.12 Tahač vozíků	19
1.1.13 Vozíky.....	19
1.1.14 Odmrazovací vozidla.....	20
1.1.15 Vozidlo Follow me	21
2. Teoretická východiska řešení	23
2.1 Obecné poznatky o optimalizačních metodách	23
2.2 Lineární programování	24
3. Matematický model	25
3.1 Verbální formulace řešeného problému	25
3.2 Matematická formulace problému	25
3.3 Řešení optimalizační úlohy	25
4. Výpočetní experiment	28
4.1 Floydův algoritmus	30

4.2	Optimalizační software Xpress – IVE	33
4.2.1	Text programu	34
5.	Zhodnocení výsledků	37
6.	Závěr	43
	Seznam použité literatury	44
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek	50

Seznam použitých značek a symbolů

AIP	letecká informační příručka (aeronautical information publication)
APU	pomocný zdroj energie (auxiliary power unit)
C	matice přímých vzdáleností mezi středy stojánek
c_{ij}	prvek matice C reprezentující přímou vzdálenost mezi stojánkami i a j
D	matice vzdáleností mezi stojánkami
GPU	pozemní zdroj energie (ground power unit)
I	množina letů
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
L	prohibitivní konstanta
M	prohibitivní konstanta
n	počet letů
PAU	klimatizační jednotka (preconditioned air unit)
R	matice dob přejezdů mezi stojánkami
r_{ij}	doba přejezdu mezi stojánkou, na které je obsluhován let i a stojánkou, na které je obsluhován let j
s_i	doba, o jakou musí být dvojice pásových nakladačů zavazadel přistavena na stojánce před zastavením letadla obsluhujícího odbavovaný let
TBL	tahač bez tažné tyče (towbarless tug)
T_i	doba obsluhy letu i
t_i	čas zastavení letadla obsluhujícího let na příslušnou stojánku
TWY	pojezdová dráha (taxiway)
ULD	jednotkové nakládací zařízení
x_{ij}	bivalentní proměnná reprezentující uskutečnění přejezdu manipulačního prostředku mezi stojánkami
x_{0i}	bivalentní proměnná reprezentující výjezd manipulačního prostředku z výchozího depa na stojánku

Úvod

Téma této diplomové práce se zabývá problematikou efektivního využívání manipulační letištní techniky, jejíž pořízení a provoz je často velmi nákladné. Efektivita provozu manipulační techniky úzce souvisí s jejím počtem vztahem k intenzitě provozu. Čím nižší je počet manipulačních technik (dostatečné množství pro zachování provozuschopnosti letiště), tím je její provoz efektivnější. Úkolem je tedy zajistit, aby manipulační technika neměla zbytečné prostoje. Proto je třeba identifikovat adekvátní počet techniky odpovídající rozsahu provozu při určité míře zálohování, aby například nejen při technické poruše jednoho z prostředků nedošlo k omezení provozu letiště, což by bylo samozřejmě nežádoucí a nevýhody a penále by okamžitě převýšily náklady za pořízení a provoz záložní techniky, ale také, aby množství manipulační techniky nebylo zbytečně velké. K optimalizaci množství manipulační techniky bude využito matematické programování. Diplomová práce se zabývá využitím vybraného segmentu manipulační techniky pro technické odbavení letadel počínaje zastavením letadla na stojánce a konče jeho odjezdem ze stojánky. Technické odbavení na větších letištích zpravidla zabezpečují nasmlouvané handlingové agentury. Základním požadavkem na odbavení letadla je jeho rychlost a bezpečnost. V zájmu letiště i leteckých dopravců totiž je, aby letadlo strávilo na zemi co nejkratší dobu a aby v průběhu tohoto pobytu nedocházelo ke zpožděním. Správné a rychlé fungování odbavovací techniky je tak nezbytné.

Proces technického handlingu by měl být neustále zdokonalován, měla by být identifikována stále lepší, jednodušší a spolehlivější řešení, stejně tak by mělo docházet ke kontinuální modernizaci manipulační techniky a jejího zázemí. V dnešní době je také kladen velký důraz na ochranu životního prostředí, takže dochází k přechodu na elektrický pohon technických zařízení, popřípadě na jiné alternativní pohony. Všechny tyto modernizace jsou ovšem velmi nákladné, takže samozřejmě záleží na velikosti a finanční situaci daného letiště.

Cílem této diplomové práce je vytvořit matematický model a pomocí optimalizačních výpočtů v nástroji Xpress IVE vypočítat minimální počet pásových nakladačů zavazadel potřebných k obslužení určitého počtu letů na letišti Václava Havla v Praze. V rámci experimentální části práce bude počítáno pouze s vybranými stojánkami.

V úvodní kapitole je popsána charakteristika technického odbavení letadel. Je nastíněn průběh odbavení a jsou popsány různé technické prostředky, které se při odbavování letadel používají.

Následující kapitola obsahuje přehled základních obecných poznatků o optimalizačních metodách.

Ve třetí kapitole je verbálně a matematicky formulován řešený problém. Dále je v ní vysvětleno řešení optimalizační úlohy s využitím matematického modelu.

Čtvrtá část se věnuje aplikaci modelu, včetně aplikace Floydova algoritmu pro výpočet vzdáleností mezi jednotlivými stojánkami. Poté je stručně popsáno uživatelské prostředí nástroje Xpress IVE, ve kterém optimalizační výpočet probíhá, včetně uvedení plného výpisu textu programu.

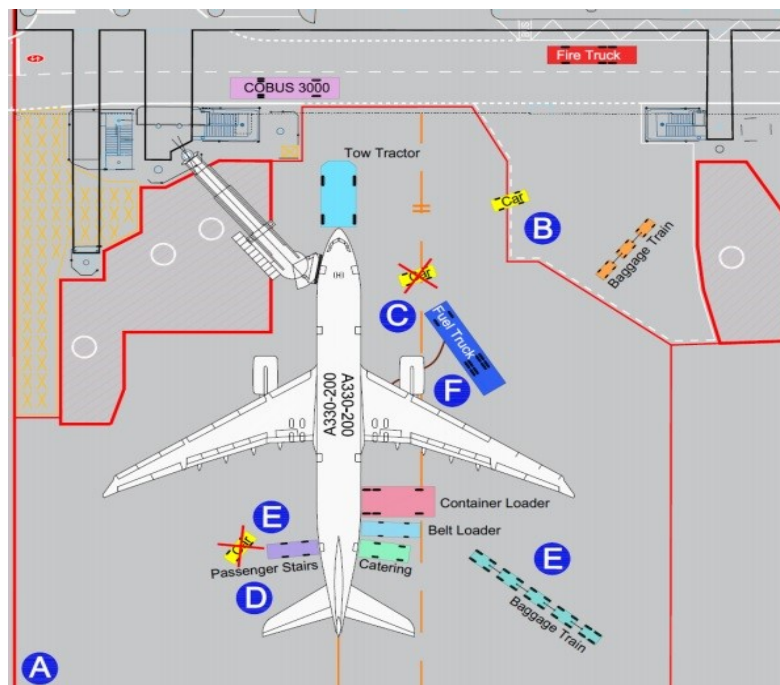
Pátá a poslední kapitola je věnována dosaženým výsledkům optimalizačního výpočtu a jejich interpretaci.

1. Charakteristika technického odbavení letadel

Pro správné a rychlé technické odbavení letadla je důležité načasování posloupnosti jednotlivých činností. Doba trvání technického odbavení závisí především na velikosti letadla, vybavenosti letiště, typu a množství nákladu, požadavků a také dostupnosti zdrojů. Kapitola byla zpracována s využitím zdrojů [1] – [11] a [39].

Technické odbavení začíná v momentě, kdy letadlo přistane a pojíždí za vozidlem „Follow me“ na svou stojánku. Toto pojíždění za vozidlem „Follow me“ je na letišti v Praze pro některé typy letadel (Airbus A380, Boeing 747-8, Antonov 124, Lockheed C5 A/B) povinné. V ostatních případech začíná v okamžiku zastavení letadla obsluhujícího daný let na stojánce. Po zastavení a zajištění letadla jsou přistaveny schody nebo nástupní most. Dále dochází k napojení pozemního zdroje energie GPU a v případě potřeby klimatizační jednotky, výstupu cestujících, vykládce nákladu a zavazadel, úklidu letadla, doplnění paliva a pitné vody a odčerpání odpadu z toalet. Před dalším letem také probíhá doplnění cateringu, nakládka zavazadel a nákladu, nástup cestujících, technická kontrola letadla, vytlačení ze stojánky a v případě potřeby a nepříznivého počasí k odstraňování námrazy z povrchu letadla.

Pro proces rychlého a bezproblémového průběhu technického handlungu je důležité vhodné rozmístění odbavovací techniky na stojánce. Na Obrázku 1 je ukázán příklad rozmístění techniky při obsluze letadla na Letišti Václava Havla v Praze.



Obrázek 1: Příklad rozmístění odbavovací techniky na letišti v Praze [1]

1.1 Charakteristika odbavovací techniky pro technický handling

1.1.1 Pozemní zdroj energie

Pozemní zdroj energie (Ground Power Unit zkráceně GPU) zásobuje letadlo elektrickou energií v průběhu jeho stání na stojánce. GPU se připojuje k letadlu, pokud má vypnutou svou APU (Auxiliary Power Unit vyskytující se většinou v zadní části letadla), popřípadě APU vůbec nemá. APU se na velkém množství letišť vypíná z důvodu hluku a taktéž z důvodu vyšší spotřeby než GPU, což přispívá k ekologičtějšímu a ekonomičtějšímu provozu při odbavení letadla na letišti. GPU má dvě hlavní podoby. Tou první je pozemní vlečné zařízení (obrázek 2), většinou s dieslovým pohonem zásobující letadlo elektrickou energií přímo z letištní plochy. Druhou variantou, která je poslední dobou stále rozšířenější, je spojení GPU a nástupního mostu (jetbridge, jetway) a propojení s letadlem pomocí elektrického kabelu (obrázek 3). Pokud je kabel připojen k letadlu, je nástupní most blokován proti pohybu, aby nedošlo k násilnému odpojení přívodního kabelu. Výhodou tohoto způsobu zásobování energií je jednoduchost, uvolnění manipulačního prostoru v okolí letadla a taktéž není třeba vozidlo pro přistavení vlečného GPU k letadlu. Další možností je ještě také fixní zdroj zapuštěný v zemi.



Obrázek 3: Pozemní vlečné GPU [12]



Obrázek 2: GPU umístěné na konstrukci nástupního mostu [13]

1.1.2 Klimatizační jednotka

Klimatizační jednotka (Preconditioned Air Unit, zkráceně PAU) může být také součástí nástupních mostů (obrázek 4), která je stejně jako GPU umístěna zespodu mostu. Na tyto jednotky jsou zpravidla napojeny jedna až dvě hadice, kterými je do letadla vháněn vzduch. Tato jednotka může kabinu letadla zásobovat jak studeným, tak také teplým vzduchem, aby byla teplota uvnitř vždy podle definovaného požadavku. Pro velká širokotrupá letadla je třeba většího počtu hadic napojených na velkokapacitní klimatizační jednotky. Pro ta největší letadla, jako je Boeing 747 a Airbus A380, je potřeba dokonce až čtyř takovýchto hadic s přísunem vzduchu, takže je občas zapotřebí i 2 klimatizačních jednotek.



Obrázek 4: Klimatizační jednotka [14]

1.1.3 Vzduchový startér

Vzduchový startér (Air start unit, obrázek 5) se používá ke spuštění motorů při nefunkční, popř. chybějící APU. Funguje na principu stlačeného vzduchu, který poskytuje prvotní roztočení turbín k zahájení startovacího procesu. Dodává potřebné množství vzduchu při stanoveném tlaku pomocí jedné, dvou nebo tří hadic připojených k letadlu.



Obrázek 5: Vzduchový startér [15]

1.1.4 Refueler

Tankování paliva může být zabezpečeno dvěma způsoby. Tím prvním je pomocí cisterny s palivem (obrázek 6) pohybující se po provozních plochách určených k pohybu vozidel. Následně je pomocí hydraulických čerpadel palivo vháněno do nádrží letadla prostřednictvím otvorů v křídlech. Druhý způsob je pomocí centrální palivové sítě, jejíž potrubí je vedeno pod stojánkou. K tankování paliva je však zapotřebí speciální vůz (fuel hydrant dispenser), který se napojí na tuto síť pomocí výstupu v zemi a přečerpává palivo do nádrží letadel (obrázek 7). Toto vozidlo je potřeba především z důvodu změny tlaku, jelikož tlak v centrální podzemní síti je mnohem vyšší, než je potřeba a bez jeho redukce by při přímém napojení ze sítě do letadla mohlo dojít k poškození letadla a jeho součástí. Velkou výhodou je kapacita této sítě, kdy na rozdíl od cisteren, které je třeba pravidelně doplňovat palivem, zde stačí pouze napojit přečerpávací vůz, který má také navíc mnohem menší rozměry, čímž dojde také k obsazení menší manipulační plochy v okolí letadla. Další výhodou je také zvýšení bezpečnosti a menší opotřebení provozních ploch vzhledem k velké hmotnosti mobilních cisteren.



Obrázek 7: Cisterna s palivem [16]



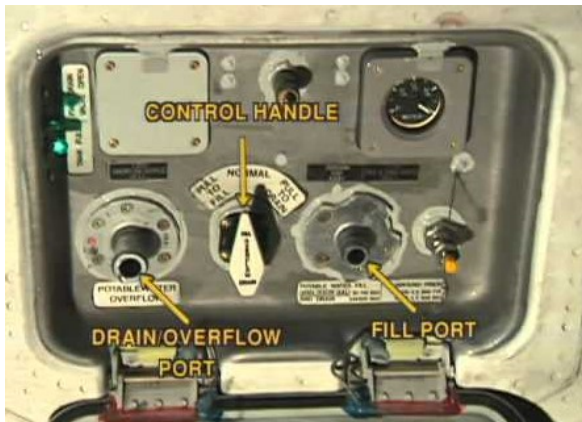
Obrázek 6: Fuel hydrant dispenser [17]

1.1.5 Vozidlo s pitnou vodou a fekální vozidlo

Pitná voda se v letadlech používá například na vaření teplých nápojů, nebo také na toaletách. Před každým letem je potřeba zajistit dostatečné množství pitné vody, přičemž její objem závisí na velikosti letadla. Dopravci se musí řídit přísnými hygienickými podmínkami na čistotu vody. Dochází také k pravidelnému čištění a dezinfekci nádrží a potrubí na palubě. Ta se provádí tak, že do nádrží je vpuštěn ozon, který okamžitě zneškodní veškeré bakterie, poté se celý systém propláchne a následně se nádrže naplní čistou vodou. Voda na letištích musí být prověřena certifikovanými laboratořemi a musí být prokázáno, že se ve vodě nenachází žádný indikátor kontaminace jako například koliformní bakterie. Voda je do letadel vháněna pomocí vozu s čerpadlem a servisním panelem (obrázek 8), který se nachází v zadní části trupu letadla. Do panelu musí být při čerpání dodávána elektrická energie.

Fekální vozidla (obrázek 10) vyprazdňují odpady a zároveň doplňují toalety letadel směsí vody a dezinfekční hmoty. Odpad z toalet je uchovávan v nádržích uvnitř letadla, které se vyprazdňují po zastavení letadla na stojánce. Po vyprázdnění nádrže je opětovně naplněna směsí vody a dezinfekční hmoty, které se také přezdívá „Blue Juice“. Na některých letištích se místo vozidel stále používají vozíky, které jsou menší a musí se tlačit. Doplnění vody a vyprazdňování toalet je striktně

odděleno a přístupy do jednotlivých systémů jsou od sebe vzdáleny. Tyto dvě činnosti nesmí probíhat zároveň, a navíc pracovník obsluhující fekální vůz nesmí už v rámci jedné směny doplňovat pitnou vodu.



Obrázek 8: Servisní panel [18]



Obrázek 9: Vozidlo s pitnou vodou [19]



Obrázek 10: Fekální vozidlo [20]

1.1.6 Cateringové vozidlo

Cateringový servis se skládá jak z vykládky nepoužitého jídla a nápojů, tak z nakládky čerstvého jídla a nápojů pro cestující a posádku. Jídla jsou až na výjimky, připravována v prostorech dodavatele cateringu a následně přepravena na letiště. Cateringová vozidla (obrázky 11 a 12) se skládají z plošiny, zdvihového systému a elektro-hydraulického kontrolního mechanismu. Plošinu je možné ovládat, jak dopředu a dozadu pro odbavení letadla, ale také doleva a doprava, aby bylo zajištěno přesné nasměrování do servisních dveří (umístěných na pravé straně letadla) a nemuselo se popojíždět s vozidlem. Nakládat je možné v závislosti na letadle zadními, předními nebo oběma servisními dveřmi.

Pro Airbus A380 byl vytvořen speciální cateringový vůz s vyšším dosahem. Některé společnosti jako Lufthansa nebo Emirates mají dceřiné společnosti specializované na cateringové služby.



Obrázek 12: Cateringové vozidlo [21]



Obrázek 11: Cateringová vozidla [22]

1.1.7 Schody

Schody se používají k nástupu a výstupu cestujících, posádky a zaměstnanců handlingové společnosti do/z letadla tam, kde to není možné zabezpečit jinak. To znamená např. tam, kde letadlo nestojí přímo u nástupního terminálu a není tedy možné použít nástupní most. Některá menší letadla a business jety mají vlastní schody, ovšem převážná většina dopravních letadel je nemají, protože mají značné rozměry a nebylo by je kde v trupu letadla složit. Schody mohou být bez pohonu (obrázek 13), které je třeba k letadlu přistavit pomocí jiného mobilního prostředku nebo mohou být s vlastním pohonem (obrázek 14). Takové schody mívají často také modifikovatelnou výšku schodů tak, aby byla zajištěna jejich kompatibilita s více druhy a typy letadel. Další rozdíly můžeme najít například v přítomnosti zastřešení, popřípadě vyhřívání nebo podsvícení. Schody se přistavují na žádost letecké společnosti. V závislosti na velikosti letadla se k urychlení nástupu a výstupu cestujících přistavují jedny nebo více schodů.



Obrázek 14: Tažné nástupní schody [23]



Obrázek 13: Nástupní schody s vlastním pohonem [24]

1.1.8 Autobusy

Autobusy (tzv. apron busy) se na letištích používají především k přepravě cestujících z terminálu k letadlu, a naopak nebo také k přepravě mezi jednotlivými terminály. K přepravě cestujících se autobusy využívají v případech, kdy letadlo stojí na stojánce, která je vzdálena od letištního terminálu. Aby se cestujícím co nejvíce usnadnil pohyb s příručními zavazadly, urychlil tím jejich nástup a výstup do autobusu a minimalizoval se nutný počet autobusů, jsou preferovány nízkopodlažní autobusy s větší délkou a šířkou a širšími dveřmi. Ve srovnání s běžnými autobusy mají také více dveří, které bývají na obou stranách, aby byl zefektivněn výstup a nástup cestujících. Z důvodu zvýšení kapacity a malých přepravních vzdáleností mají také minimum sedaček. Autobusy se po letištní ploše pohybují ve vyhrazených prostorách a z důvodu bezpečnosti nesmějí být přistavovány příliš blízko letadlům. Bezpečnostní zóna kolem stojícího letadla je např. na letišti v Praze definována fiktivní čarou bezpečnosti, lemující ve vzdálenosti 3 metry obrys celého letadla.



Obrázek 16: Autobus firmy Carbridge na letišti v Sydney [25]



Obrázek 15: Apron bus [26]

1.1.9 Vytlačovací tahač (Pushback tugs and tractors)

Vytlačovací tahače se používají k vytlačení letadel ze stojánky v případě, kdy stojí před u terminálu. Tahače jsou vybaveny výkonnými motory, aby mohly bez problému manipulovat s letadlem o hmotnosti několik set tun. Jejich využití není jenom pro vytlačování letadel od stojánek, ale například také k přemístění letadla do/z hangáru. Po provozních plochách se takto tažené letadlo pohybuje rychlostí přibližně 5 km/h. Existuje více druhů vytlačovacích tahačů. Některé vytlačovací tahače využívají tažná zařízení, na kterých letadlo táhnou za sebou (obrázek 17). Letadla jsou v tomto případě tažena na tyči, která se připevňuje k přední podvozkové noze. Každé letadlo má unikátní typ připojení této tyče, která tak funguje jako adaptér mezi standardním tahačem a specifickým podvozkem každého letadla. Tažná tyč musí být dostatečně dlouhá, aby neohrozil kontakt mezi tahačem a letadlem. Tažné tyče mají také vlastní kolový podvozek, který je napojen na hydraulický mechanismus, aby bylo možné letadlo k tahači připojit. Stejný mechanismus je potom využit na zdvižení kol během tažení.



Obrázek 17: Tahač s tažným zařízením [27]

V poslední době se stále více používají tahače bez tažné tyče, ale s tažným zařízením přímo implementovaným do tahače (towbarless tug/TBL, obrázek 18). Tento typ tahačů využívá výkonných hydraulických nebo pneumatických zvedáků, kterými zvedne přední podvozkovou nohu letadla, díky čemuž se s letadlem lépe manipuluje. Tento způsob redukuje čas, který je jinak potřeba k propojení tahače a letadla pomocí tažné tyče, a navíc také zcela eliminuje náklady na pořízení a údržbu tažných tyčí. V dnešní době, kdy se stále více dostávají do popředí otázky ochrany životního prostředí, se zvyšuje používání tahačů na elektrický pohon, které postupně nahrazují starší benzínové, popřípadě naftové tahače. Jako budoucnost této techniky se potom považují tahače typu TBL, které jsou ovládány dálkově a mají také menší rozměry (obrázek 19).



Obrázek 18: Towbarless tug [28]



Obrázek 19: Dálkově ovládaný, elektrický TBL [29]

1.1.10 Nůžkový nakladač

Tento typ nakladače se používá k manipulaci s paletami, kontejnery (ULD) nebo velkými rozměrnými náklady. Nůžkový nakladač je možno k letadlu přistavit až po úplném otevření dveří nákladového prostoru. Dveře nákladového prostoru po nakládce je možno uzavřít až po odstavení nakladače od trupu. Tato pravidla jsou uplatňována z důvodu zabránění poškození letadel, popřípadě k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví obsluhujících zaměstnanců. Většina nůžkových nakladačů má vlastní pohon a kolový podvozek. V poslední době se, analogicky, jako u jiných manipulačních prostředků přechází z benzínového/naftového pohonu na elektrický. Použití nůžkových nakladačů je především u širokotrupých letadel, kdy k vykládce/nakládce může dojít v závislosti na typu letadla buď přes boční, nebo zadní nákladové dveře, popřípadě přes odklápěcí příď letadla. Nůžkové nakladače jsou také rozděleny do různých kategorií především z pohledu hmotnostních omezení nákladu. Plošiny jsou tvořeny poháněnými kuličkovými nebo válečkovými pásy, které velmi zjednodušují pohyb a přesun nákladu, kdy tyto pásy se nacházejí také uvnitř nákladového prostoru. Kontejnery jsou po nich jednoduše přesouvány na určené místo, přičemž směr otáčení kuliček ovládá operátor.



Obrázek 21: Nůžkový nakladač s jednou plošinou [30]



Obrázek 20: Nůžkový nakladač s oddělenými plošinami [31]

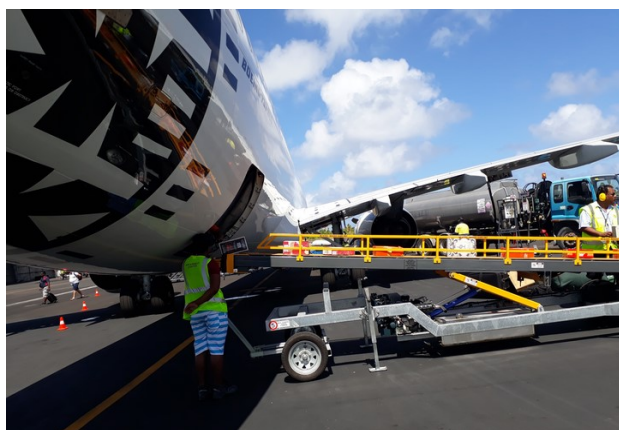
Nakladač může mít jednu plošinu (obrázek 20), která se zvedá celá nebo dvě oddělené plošiny, kdy se může zvednou jedna, nebo obě (obrázek 21). Pro vojenské účely existují také speciální nakladače, které je možno přepravit zároveň s nákladem.

1.1.11 Pásový nakladač zavazadel

Pásový nakladač zavazadel se používá převážně k nakládce a vykládce zavazadel a nákladu menších rozměrů (volně loženého) do letadla.

Pásové dopravníky se skládají z hnacího válečku poháněného hnacím motorem s napínacím válečkem na opačném konci. Ty jsou obepnuty dopravním pásem, který je v nekonečné smyčce obíhá. Pás je také podepřen skluzovou základnou nebo válečkovou základnou. Využití pásového dopravníku je v dnešní době značné. Pásové dopravníky se vyskytují v mnoha průmyslových odvětvích, kde urychlují a ulehčují práci. Mezi výhody těchto dopravníků patří například možnost určení velikosti pásu z důvodu použití nebo také poměrně malá nákladnost na obsluhu. Další s možností úpravy těchto dopravníků je možnost úpravy náklonu, popřípadě tvaru samotného pásu tak, aby odpovídal využití daného dopravníku.

Mimo tento pás je potřeba dvou manipulačních pracovníků, kdy jeden buď nakládá zavazadla/náklad na pás a druhý je vykládá a ukládá do úložného prostoru letadla, popřípadě na vozík v případě vykládky. Pásové nakladače zavazadel mohou být poháněny motorem (opět důraz na přechod na elektrickou energii, obrázek 22) nebo je možností je k letadlu přistavit ať již manuálně nebo pomocí vozíku (obrázek 23). Sklon ramena s pásovým dopravníkem lze potom upravovat tak, aby bylo možné tento nakladač použít u více typů letadel.



Obrázek 23: Tažný pásový nakladač zavazadel [32]



Obrázek 22: Pásový nakladač zavazadel s vlastním pohonem [33]

Výrobci těchto dopravníků často nabízejí úpravy dle přání zákazníka. Příkladem těchto úprav může být vlastní požadovaná délka pásu. Dnešní moderní poháněné nakladače už také nabízejí funkce, které by měly zjednodušit a zpříjemnit jejich obsluhu jako například kabina vybavena klimatizací a topením. Pásové dopravníky mají nosnost až 250 kg zavazadel a dosahují průměrných rychlostí kolem 25 km/h. Na letišti v Praze se používají převážně poháněné nakladače dieselového a elektrického pohonu.

V rámci AIP ČR jsou jako zařízení pro odbavení nákladu uvedeny pásové dopravníky s délkou pásu 9 metrů a nosností 200 kilogramů.

1.1.12 Tahač vozíků

Tahače vozíků (obrázky 24 a 25) se používají k přemísťování klecových, paletových či jiných vozíků bez vlastního pohonu po provozních plochách. Maximální počet vozíků, který může jeden tahač táhnout, je 5. V krajních případech se mohou používat také na manipulaci s letadly do určité hmotnosti pomocí tažné tyče (oje). Mohou se využívat i pro jakýkoliv jiný typ manipulace. Od zmíněných vozíků přes vlečné schody, vlečné GPU nebo pásové dopravníky až po právě výše zmiňovaná menší letadla.



Obrázek 24: Elektrický tahač vozíků [34]



Obrázek 25: Autonomní tahač vozíků [35]

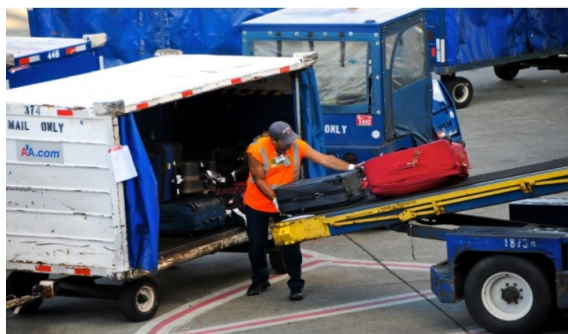
Tahače jsou konstruovány tak, aby umožnily dostatečný výhled pro obsluhu a svými rozměry a tvarem zbytečně nezatažovaly pozornost obsluhy při jízdě a vyhýbání se letadlům, či jiné manipulační technice. Pohon těchto tahačů může být různý. Základem a v minulosti nejpoužívanějším typem pohonu byly tahače s dieselovým motorem používané především pro svou výkonnost. V dnešní době jsou však již stále více provozovány tahače s elektrickým pohonem a někteří výrobci testují a už také vyrábějí tahače na vodíkový pohon. Analogicky jako v mnoha jiných odvětvích, se vyvíjejí autonomní tahače.

1.1.13 Vozíky

Vozíky (tzv. dollies) slouží k přepravě nákladu po letišti převážně mezi letadlem a třídírnou zavazadel, popřípadě jiného typu nákladu. Samostatné vozíky nemají vlastní pohon a je třeba je připojit k tahači.

Klecové vozíky se používají na přepravu zavazadel, poštovních balíků, volně loženého nákladu a podobně. Vozíky bývají vybaveny brzdovým systémem, který zablokuje kola v případě, kdy není připojen k tahači a tím brání v samovolném pohybu těchto vozíků. Většina takovýchto vozíků je uzavřená až na strany, kterými se zavazadly a nákladem manipuluje. Bývají vybaveny závěsem, který náklad chrání před nepříznivými vlivy počasí (obrázek 26).

Paletové vozíky (obrázek 27) jsou nejčastěji vybaveny válečkovým nebo kuličkovým pásem pro usnadnění manipulace s paletami. Jelikož jsou palety umístěny na těchto pásech, jsou tyto vozíky vybaveny blokovacím mechanismem, který zabrání v nežádoucím pohybu palet během jízdy. Stejně jako klecové vozíky jsou vybaveny brzdovým systémem, který brání pohybu vozíku, když není táhnut. Brzdy se automaticky odblokují po připojení k tahači. Existují samozřejmě vozíky, pro různé kategorie palet a nákladu a liší se velikostí a nosností.



Obrázek 26: Klecový vozík [36]



Obrázek 27: Paletové vozíky [37]

1.1.14 Odmrazovací vozidla

Především v zimních měsících (v závislosti na lokalitě letiště) jsou tato vozidla jednou z nejdůležitějších složek ground handlingu. V chladných obdobích se totiž na povrchu letadla může vytvořit vrstva ledu, popřípadě napadaného sněhu, který může následně zmrznout. Námraza na letadlech ohrožuje bezpečnost celého letadla především z hlediska výkonnosti, ale také hrozí náraz odlomeného kusu ledu do motoru, což by vedlo k jeho poškození a nesprávné funkci. Mezinárodní organizace ICAO odhaduje, že vrstva ledu na křídlech tenká jako papír může snížit vztlak křídel až o 30 % a zvýšit odpor až o 40 %. Tyto dopady by potom velice zhoršily výkon a ovladatelnost letadla a zároveň snížily bezpečnost provozu. Existují dvě části odmrazovacího procesu – deicing a anti-icing.

Deicing je prvním krokem procesu, který spočívá v odstraňování sněhu a ledu z povrchu letadla. Používanou kapalinou (kapalina oranžové barvy) je propylen glykol zahřátý přibližně na 60-65°C. Tento roztok, nazývaný Type I, je kombinován s vodou v závislosti na vnějších podmínkách. Poměr látek je automatizován na základě vnějších senzorů. Nástřik se provádí většinou pod úhlem 45° nebo méně a postupuje se od vrchní osy draku letadla (mimo okna), přes křídla a horizontální stabilizátory směrem od náběžné hrany.

Druhým krokem používaným v nepříznivých podmínkách je anti-icing. Základní funkcí kapaliny proti námraze je zabránit ulpívání ledu a namrzání povrchu na vyčištěných a odmrazených částech letadla. Kapalina nazývaná se Type IV (kapalina zelené barvy), je mnohem agresivnější než Type I. To jí pomáhá, aby se držela na povrchu letadla po delší dobu. Na rozdíl od Type I není vytvářena směs s vodou. Naopak, tato kapalina vodu absorbuje, čímž zabraňuje v jejím ulpívání na povrchu letadla.

Odmrazování letadel probíhá na stojánci, po odsunutí od terminálu nebo na speciálních místech k tomu určených. Odmrazování na stojánci u terminálu je poměrně časté, ale neefektivní. Dopravci a letištní operátoři chtějí zabránit zbytečnému blokování stojánky. Mnohá letiště tak mají speciální

plochy určené k odmrazování letadel. To má více výhod. Jednou z nich je již zmíněné uvolnění stojánky. Dalším problémem však může být na velkých letištích dlouhá vzdálenost od stojánky k prahu dráhy, a jelikož kapalina proti námraze má časově omezenou účinnost, je potřeba dobu mezi aplikováním kapaliny a startem letadla co nejvíce zkrátit. Proto se tato speciální místa pro odmrazování umísťují blíže prahu dráhy.

Samotná vozidla (obrázek 28) pro odmrazování jsou většinou vybavena diesellovým motorem. Součástí vozidla je pohyblivé se rameno, na konci kterého je kabina, ve které sedí operátor. Na kabině operátora jsou umístěny senzory ve tvaru červených tyčí, jejichž funkcí je zabránění neúmyslnému střetu kabiny s letadlem.



Obrázek 29: Odmrazovací vozidla [38]



Obrázek 28: Výstupy pro používané kapaliny [39]

1.1.15 Vozidlo Follow me

Follow me je vozidlo používané především k navádění letadla při pojíždění. Na menších letištích se většinou tato vozidla nepoužívají, ale na větších letištích se složitějším systémem pojezdových drah je toto vozidlo nezbytnou součástí. Piloti se totiž nemusí být jistí svou pozicí a špatným odbočením by letadlo mohlo zablokovat provoz letiště nebo například způsobit nehodu.

Follow me vozidlo se používá na žádost pilota nebo řídicího letového provozu, se kterými je řidič po celou dobu pojíždění na letišti v kontaktu. Může být využíváno nejen za účelem odstranění nejistoty pilota při pohybu letadla na provozních plochách letiště, ale také při navádění letadla například v případě oprav určité části TWY, snížené viditelnosti, nefunkčnosti osvětlovací techniky na letištích, porušení povrchu TWY, nefunkčnosti značení nebo právě v nepředvídatelných situacích jako je třeba kolize dvou letadel na TWY.

Vozidla bývají obvykle opatřena výraznou barvou, jako jsou žlutá nebo oranžová. Jsou vybavena vysílačkou potřebnou ke komunikaci s piloty či řídícími letového provozu, výstražnými majáky a světelným nápisem Follow me. Musí se samozřejmě řídit pravidly pohybu po provozních plochách, takže maximální rychlost, kterou se tato vozidla na provozních plochách mohou pohybovat je 30 km/h. Typ použitých vozidel se může lišit od pick-upů, přes VANY, SUV, hatchbacky až po kuriozitu, kterou mají na boloňském letišti. Jako Follow me vozidlo tam totiž používají Lamborghini Huracan (obrázek 30), kdy továrna této luxusní značky se nachází pouhých 8 kilometrů od letiště.



Obrázek 30: Lamborghini Huracan jako vozidlo Follow me na letišti v Boloni [40]



Obrázek 31 Antonov AN-124 neboli Ruslan pojíždějící za vozidlem Follow me [41]

2. Teoretická východiska řešení

Pro zpracování této kapitoly byly použity zdroje [44] a [47].

2.1 Obecné poznatky o optimalizačních metodách

Od každého pracovníka zastávajícího nějakou řídicí pozici se očekává, že bude dělat kvalitní rozhodnutí. Při řešení rozhodovacích úloh je z pravidla požadováno nalezení řešení, které bude splňovat podmínky účelnosti a efektivity. Efektivita a účelnost řešení se posuzuje z řady různých hledisek, kdy nejdůležitější bývá spokojenost uživatele a také hospodárnost řešení. K posouzení efektivity daného řešení musí být definována určitá veličina, které říkáme optimalizační kritérium nebo někdy také účelová funkce. Pokud máme optimalizační kritérium výnosového typu, hledáme maximum účelové funkce, pokud nákladového typu, hledáme, logicky, minimum. Abychom zvolili nejvhodnější kritérium pro posouzení efektivity daného procesu je třeba vycházet ze zkušeností (vlastní nebo získané). Řídíme se totiž efektem, který je z daného procesu uživatelem očekáván.

Když nejsou k dispozici vstupní údaje, které jsou pro vytvoření optimalizačního kritéria potřeba, potom se postupuje tak, že se volí náhradní optimalizační kritérium, pro které jsou veškeré potřebné údaje k dispozici. Je však třeba dbát na to, aby náhradní optimalizační kritérium alespoň částečně kopírovalo kritérium původní reprezentující jeho uživatelský zájem. Optimalizačních kritérií může být v řešené úloze více. Tato kritéria mohou být udávána ve stejných nebo různých jednotkách. Nejvhodnější je pro řešitele situace, kdy lze všechna kritéria převést na kritéria se stejnou jednotkou (např. finanční plnění), tím se vícekriteriální optimalizační úloha transformuje na úlohu s jedním jediným optimalizačním kritériem. Pokud transformace vícekriteriální optimalizační úlohy na optimalizační úlohu s jedním kritériem není možná, je třeba úlohu řešit s více kritérii současně. Je možné, že získáme řešení, které vyhovuje všem kritériím. Z praktického hlediska je tato šance ale velice malá. Vyžadovat optimum je v případech více kritérií často nemožné. Pokud nejsme schopni nalézt optimum z pohledu všech kritérií, požaduje se nalezení tzv. kompromisního řešení.

Postup, kterým optimální řešení najdeme, se nazývá optimalizační metoda. Na optimalizační metody jsou kladeny dva základní požadavky. Říkáme, že optimalizační metody by měly být spolehlivé a rychlé. Pro splnění prvního požadavku používáme test optimality. Pomocí tohoto testu jsme schopni stanovit, jestli je nebo není aktuální řešení optimální. Univerzální test optimality však neexistuje, protože každá metoda má svůj způsob realizace tohoto testu.

V praxi jsme při rozhodování o efektivitě téměř vždy limitováni určitými omezeními. V optimalizačních úlohách tato omezení nazýváme omezujícími podmínkami. Řešení, které potom získáme, označujeme jako přípustné, popřípadě nepřípustné, pokud není některé z nastavených omezení dodrženo.

Optimální řešení může být jak jedno, tak jich může být i více. Dokonce existují i úlohy, které mají nekonečně mnoho optimálních řešení. Je třeba také dodat, že nalezení optimálního řešení není zaručeno a některé úlohy ho z různých důvodů mít nemusí. Nejjednodušší způsob vyhledání optimálního řešení je tzv. metoda úplného prohledávání, kdy je nejprve vytvořena množina všech

přípustných řešení. Pro každé z nich je vypočítána hodnota optimalizačního kritéria a je vybráno to, které má pro uživatele maximálně efekt. Tento typ řešení však může být u úloh, kdy počet přípustných řešení dosahuje vysokých čísel, nepoužitelný, protože doba potřebná k prohledání všech přípustných řešení může překročit dobu, která je k dispozici pro provedení optimalizačního výpočtu nebo přesáhne paměťové možnosti počítače, na kterém je řešení realizováno.

Důležitým rozdělením optimalizačních metod je jejich dělení na exaktní a heuristické. Rozdíl mezi těmito dvěma typy metod je možnost otestovat, zda dané řešení splňuje podmínku optimality či nikoliv. U exaktních metod taková možnost existuje, u heuristických metod nikoliv. Přesto mají heuristické metody důležitou roli. Používají se totiž v případech, kdy exaktní metody nejsou dostatečně výkonné pro nalezení optima v daném čase. Při použití heuristické metody sice není vyloučeno nalezení optimálního řešení, neexistuje však možnost to spolehlivě ověřit. Pokud však máme k dispozici dostatečně výkonnou exaktní metodu, upřednostňujeme ji před jakoukoliv jinou heuristickou metodou.

2.2 Lineární programování

Lineárním programováním rozumíme nástroj, který slouží k řešení optimalizačních úloh v oblasti operační analýzy nazývané lineární programování. Předmětem lineárního programování je tedy tvorba matematických modelů rozhodovacích úloh s lineární účelovou funkcí a lineárními omezujícími podmínkami a jejich řešení.

V rámci lineárního programování klademe dva základní požadavky na matematický model. První z požadavků je jeho jednoduchost, kdy by měl být co nejjednodušší. Druhý požadavek nám potom říká, že by měl model co nejpřesněji vystihovat danou modelovanou situaci.

Jak již bylo uvedeno, matematický model je tvořen účelovou funkcí a omezujícími podmínkami. Účelová funkce nám umožňuje posoudit kvalitu přípustných řešení z pohledu optimalizačního kritéria. Soustavou omezujících podmínek potom vymezíme množinu přípustných řešení. Tyto omezující podmínky dělíme na strukturální a obligatorní. Strukturální podmínky zajistí splnění základních podmínek, které plynou ze zadání problému, kdežto obligatorní podmínky nám určí definiční obory proměnných, které se v modelu nachází.

Proměnné jsou, jak název napovídá, veličiny, jejichž hodnota se v průběhu výpočtu mohou měnit a pomocí jejich modelování můžeme získat optimální řešení. Jejich význam je důležitý zejména proto, že reprezentují rozhodnutí, která se od řešitele očekávají po ukončení optimalizačního výpočtu. Na začátku modelu je nutno pro každou proměnnou definovat jeden ze tří přípustných definičních oborů – množinu nezáporných čísel, množinu celých nezáporných čísel nebo množinu hodnot 0 nebo 1. Volba definičního oboru souvisí s povahou rozhodnutí.

Dále platí, že výrazy, které v modelu obsahují proměnné, lze mezi sebou pouze odčítat nebo přičítat, popřípadě násobit reálnou konstantou. V lineárním programování je v případě tvorby omezujících podmínek dovoleno používat pouze relační znaménka $=$, \geq a \leq .

3. Matematický model

Tato kapitola byla zpracována s využitím zdroje [45].

3.1 Verbální formulace řešeného problému

Na letištní ploše známe plán obsazení stojánek letadly, k jejichž obsluze je třeba přistavit technické prostředky pro jejich odbavení. V případě řešené diplomové práce bude technickým prostředkem pásový nakladač zavazadel. Budeme uvažovat homogenní park pásových nakladačů zavazadel, tzn. jeden typ pásového nakladače zavazadel, který je možno použít pro všechny typy letadel odbavovaných na vybraných stojánkách. Pro každý let budeme počítat s dvojicí pásových nakladačů zavazadel, která se bude přesouvat mezi jednotlivými stojánkami společně, a proto je bereme jako jeden celek. Cílem optimalizačního procesu je přiřadit jednotlivé dvojice pásových nakladačů zavazadel tak, aby k obsluze zadané množiny letů byl využit minimální počet dvojic pásových nakladačů zavazadel. Předpokládáme dále, že pro všechna letadla obsluhovaných letů zajišťuje jejich technické odbavení stejná handlingová agentura.

Pro čas přistavení pásových nakladačů zavazadel ke stojánce může být definováno, aby byly připraveny u stojánky s určitým předstihem zastavením letadla na stojánce. Je zvykem, že pásové nakladače zavazadel se odstavují od letadla až jako jedny z posledních technických prostředků. Hodnota času, kdy musí být pásové nakladače zavazadel odstaveny od letadel, je zvolena na 5 minut před časem ukončením obsluhy letadla.

3.2 Matematická formulace problému

Je známa množina letů I ($|I| = n$), po jejichž ukončení je potřeba odbavit letadla, která je obsluhovala. Pro každý let $i \in I$ je definován čas zastavení letadla na určené stojánce t_i a doba obsluhy letadla po tomto letu T_i . K dispozici je dále matice dob R potřebných k přejezdům dvojice pásových nakladačů zavazadel mezi jednotlivými stojánkami (prvek r_{ij} reprezentuje dobu přejezdu mezi stojánkou, na které bylo obsluženo letadlo po letu $i \in I$ a stojánkou, na které je potřeba obslužit letadlo po letu $j \in I$). Dále je pro každý let $i \in I$ definována časová hodnota s_i , o kterou musí být pásové nakladače zavazadel přistaveny na stojánce dříve, než letadlo obsluhující daný let na stojánce zastaví. Cílem je rozhodnout o posloupnostech (pořadí) letů, které mají být obsluženy stejnou dvojicí pásových nakladačů zavazadel tak, aby každý let z množiny I byl obslužen a celkový počet dvojic pásových nakladačů zavazadel nasazených k jejich obsluze byl minimální.

3.3 Řešení optimalizační úlohy

Pokud bychom chtěli úlohu zobrazit graficky, je vhodné vytvořit graf, ve kterém bude množina obsluhovaných letadel reprezentována množinou vrcholů a množina hran je spojujících bude reprezentovat časově přípustné přesuny pásových nakladačů zavazadel mezi stojánkami.

Do úlohy si, kromě vrcholů reprezentujících jednotlivé lety, zavedeme také dva pomocné vrcholy s indexy 0 a $n + 1$. Vrchol s indexem 0 bude reprezentovat tzv. „výchozí depo“, ze kterého budou

pásové nakladače zavazadel k obsluze letadel vyjíždět a vrchol s indexem $n + 1$ bude představovat tzv. „koncové depo“ neboli místo, do kterého se budou pásové nakladače zavazadel po ukončení obsluhy letadel zase vracet.

Do úlohy zavedeme skupinu bivalentních proměnných x_{ij} , pro $i \in I \cup \{0\}$ a $j \in I \cup \{n + 1\}$, které budou modelovat rozhodnutí o přesunech dvojic pásových nakladačů zavazadel po obslužení letadla po letu $i \in I$ nebo z výchozího depa přesune k obsluze letadla po letu $j \in I$ nebo do koncového depa. Pokud některý z uvedených přesunů dvojice pásových nakladačů zavazadel realizuje, bude hodnota proměnné $x_{ij} = 1$. A naopak, pokud přesun proveden nebude, bude hodnota proměnné $x_{ij} = 0$.

Při použití matematického programování pro optimalizaci je vhodné reálné časové údaje převést do tzv. vnitřního kalendáře (podobně jako např. v síťové analýze při použití metody kritické cesty pro plánování projektů), tedy zvolit referenční čas, od kterého se reálné časy přepočítávají ve zvolených časových jednotkách (v případě předložené práce budou zvolenou časovou jednotkou minuty). Referenční čas je stanoven na 5:00. Čas 5:00 tedy odpovídá hodnotě 0 ve vnitřním kalendáři a ostatní časy odletů a příletů se k referenčnímu času přepočítají (např. čas 5.45 bude mít ve vnitřním kalendáři vzhledem ke stanované časové jednotce hodnotu 45).

Hodnota účelové funkce musí vyjadřovat optimalizovanou veličinu, tedy celkový počet dvojic pásových nakladačů zavazadel použitých k obsluze letadel. K její formulaci nám poslouží pomocné vrcholy s indexy 0 a $n + 1$, protože je zřejmé, že počet nakladačů nasazených k obsluze množiny letadel bude odpovídat takovému počtu dvojic pásových nakladačů zavazadel, který bude vypraven z výchozího depa (vrchol s indexem 0) nebo takovému počtu dvojic pásových nakladačů letadel, který se bude po obsluze letadel vracet do koncového depa (vrchol s indexem $n + 1$). Máme tedy dvě ekvivalentní varianty účelové funkce.

$$f(x) = \sum_{j \in I} x_{0j}$$

$$f(x) = \sum_{i \in I} x_{i,n+1}$$

V řešeném případě bude zvolena varianta první, tedy varianta obsahující pomocný vrchol s indexem 0.

Matematický model řešené optimalizační úlohy má tvar:

$$\min f(x) = \sum_{i \in I} x_{0i} \tag{1}$$

za podmíněk:

$$\sum_{i \in I \cup \{0\}; i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } j \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I \cup \{n+1\}; j \neq i} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (3)$$

$$t_i - s_i + T_i + r_{ij} \leq t_j - s_j + M(1 - x_{ij}) \quad \text{pro } i \in I, j \in I \text{ a } i \neq j \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I \cup \{0\}, j \in I \cup \{n+1\} \text{ a } i \neq j \quad (5)$$

Účelová funkce (1) reprezentuje optimalizační kritérium – celkový počet dvojic pásových nakladačů zavazadel nasazených k obsluze množiny letadel po letech z množiny I , který máme minimalizovat. Skupina omezujících podmínek (2) zajistí, že k obsluze každého letadla po letu $j \in I$ bude nasazena právě jedna dvojice pásových nakladačů zavazadel, která se na stojánku obsluhovaného letadla po letu $j \in I$ přemístí buď z výchozího depa, nebo po ukončení technického odbavení letadla po ukončení jiného letu. Skupina omezujících podmínek (3) zajistí, že po konci obsluhy letadla po letu $i \in I$ se dvojice pásových nakladačů zavazadel přesune k obsluze dalšího letadla po jiném letu, nebo do koncového depa. Skupina omezujících podmínek (4) bude aktivní pouze v případě, kdy hodnota výrazu $t_i - s_i + T_i + r_{ij}$ bude větší než hodnota výrazu $t_j - s_j$. To znamená, že dvojice pásových nakladačů zavazadel obsluhující letadlo $i \in I$ by byla připraven k obsluze letadla $j \in I$ později, než je nejzazší čas nutný k jejich přistavení letadla k obsluze letadla po letu $j \in I$ na dané stojánce. Obsluha obou letadel stejnou dvojicí pásových nakladačů zavazadel tak nebude časově přípustná, a proto nebude umožněn jejich přejezd. V ostatních případech je podmínka neaktivní (nezajišťuje jednoznačnost hodnoty proměnné x_{ij}). Skupina omezujících podmínek (5) reprezentuje definiční obory proměnných použitých v modelu.

4. Výpočetní experiment

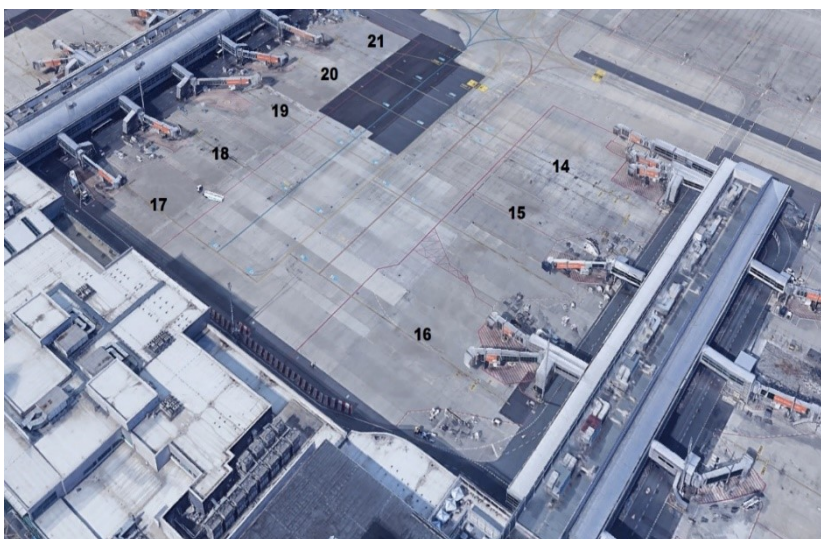
V rámci použitého modelu počítáme s následujícími předpoklady. Dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být připravena u stojánky 5 minut před zastavením letadla obsluhujícího konkrétní let. U každého letu známe délku odbavení. Jak je obvyklé na velkých letištích, nakládací zařízení se odstavují od letadla až jako jedna z posledních. Pro účely výpočetního experimentu bude tato doba nastavena opět na 5 minut před ukončením obsluhy letadla (bez ohledu na celkovou dobu pobytu letadla na stojánce). Tzn., že získané optimální řešení bude pesimistickým odhadem hodnoty účelové funkce (provoz za nejméně příznivých podmínek). Výchozím a zároveň koncovým depem dvojic pásových nakladačů letadel bude odstavná plocha mezi stojánkami 15 a 16, kde jsou pásové nakladače zavazadel odstavovány.

Stojánky také nemohou být obsazovány bezprostředně za sebou, takže mezi lety musí být časová prodleva. Do optimalizačního výpočtu zařazujeme pouze odbavené lety, u kterých bylo možné jednoznačně prokázat čas zahájení a ukončení obsluhy. Jako zdroj vstupních dat bude uvažován fragment letového řádu pražského letiště ze dne 14. srpna 2019. Referenční čas, ke kterému se vztahují časové hodnoty v tabulce je 5:00 = 0.

pořadí letu	číslo stojánky	čas přiletu		čas odletu		čas přistavení nakladačů	čas ukončení obsluhy nakladači	doba pobytu na stojánce
1	18	5:45	45	6:25	85	40	80	40
2	21	6:20	80	6:55	115	75	110	35
3	15	7:10	130	8:00	180	125	175	50
4	16	7:20	140	7:50	170	135	165	30
5	18	7:25	145	7:55	175	140	170	30
6	21	7:40	160	8:20	200	155	195	40
7	19	10:30	330	11:00	360	325	355	30
8	21	11:00	360	11:35	395	355	390	35
9	18	11:10	370	11:45	405	365	400	35
10	19	11:50	410	12:35	455	405	450	45
11	21	12:20	440	13:05	485	435	480	45
12	21	14:10	550	14:40	580	545	575	30
13	16	14:20	560	15:15	615	555	610	55
14	21	15:40	640	16:25	685	635	680	45
15	18	15:55	655	16:45	705	650	700	50
16	19	17:15	735	17:55	775	730	770	40
17	17	17:45	765	18:35	815	760	810	50
18	21	18:40	820	19:20	860	815	855	40
19	16	19:05	855	22:55	1075	850	1070	220

Tabulka 1: Tabulka se základními informacemi o letech [43]

Optimalizaci budeme provádět pro lety obsluhované na vybraných stojáncích. Vybrána byla skupina stojánek mezi prsty B a C, jedná se tedy o sektory stojánek B2 a C1 (obrázky 32 a 33). V rámci sektoru stojánek B2 jsou zřízeny celkem 3 stojánky (č. 14, 15, 16) a v rámci sektoru stojánek C1 je zřízeno celkem 5 stojánek (č. 17, 18, 19, 20, 21). Pro výpočet minimálních dob přejezdů mezi stojánci byl použit Floydův algoritmus. Vycházeno bylo z délek tras dvojic pásových nakladačů zavazadel mezi jednotlivými stojánci a prostřednictvím Floydova algoritmu byly vypočítány vzdálenosti (délky minimálních cest v teorii grafů) v metrech. Vzdálenosti vypočítané Floydovým algoritmem byly následně přepočítány na minimální doby přejezdů, a to vydělením vypočítaných vzdáleností rychlostí pásových nakladačů zavazadel, která byla stanovena na 25 km/h.



Obrázek 33: Vybrané sektory stojánek na Letišti Václava Havla v Praze [42]



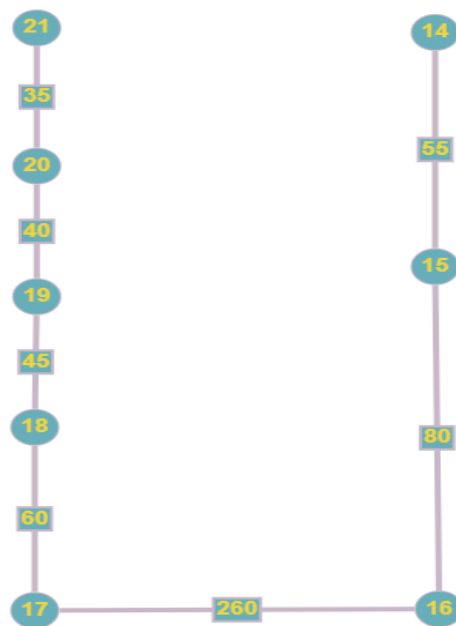
Obrázek 32: Umístění vybraných stojánek v rámci mapy letiště [1]

4.1 Floydův algoritmus

Floydův algoritmus slouží k vyhledávání vzdáleností v dopravních sítích (v hranově ohodnocených grafech). Algoritmus je založen na porovnání hodnot přímých a nepřímých vzdáleností. [46]

Na obrázku č. 34 můžeme vidět graf, kdy vrcholy představují jednotlivé stojánky (jejich označení) a ohodnocení hran představuje hodnoty přímých vzdáleností mezi jejich středy v metrech. Pracujeme s tím, že hrana (i, j) patří do minimální cesty v případech, kdy minimální cesta nevede jinudy. Matematickým zápisem takto:

$$d(i, j) + o(i, j) < d(r, j)$$



Obrázek 34: Graf reprezentující rozmístění stojánek a délek přímých vzdáleností

Prvním krokem Floydova algoritmu je sestavení matice přímých vzdáleností C , kdy pro prvky c_{ij} platí:

- $c_{ij} = 0$ pokud $i=j$
- $c_{ij} = o(i, j)$ pokud $i \neq j$ a ohodnocená hrana spojující uzly i a j existuje
- $c_{ij} = \infty$ pokud $i \neq j$ a ohodnocená hrana spojující uzly i a j neexistuje

To znamená, že na hlavní diagonále budou nulové hodnoty. Pokud jsou dva vrcholy spojeny hranou, tak pozici daného prvku zapíšeme hodnotu ohodnocení hrany, která tyto vrcholy spojuje. V situaci, kdy dva různé vrcholy nejsou spojeny hranou, zapíšeme hodnotu ∞ .

	14	15	16	17	18	19	20	21
14	0	55	∞	∞	∞	∞	∞	∞
15	55	0	80	∞	∞	∞	∞	∞
16	∞	80	0	260	∞	∞	∞	∞
17	∞	∞	260	0	60	∞	∞	∞
18	∞	∞	∞	60	0	45	∞	∞
19	∞	∞	∞	∞	45	0	40	∞
20	∞	∞	∞	∞	∞	40	0	35
21	∞	∞	∞	∞	∞	∞	35	0

Tabulka 2: Tabulka hodnot přímých vzdáleností po prvním kroku Floydova algoritmu

Dalším krokem je zavedení pomocné proměnné k , jejíž hodnota nabývá v průběhu výpočtu postupně hodnot $1, 2, \dots, n$, kdy n reprezentuje počet vrcholů grafu. Hodnota k reprezentuje index vrcholu, přes který provádíme testování.

Ve třetím kroku propočítáme jednotlivé prvky c_{ij} podle vztahu:

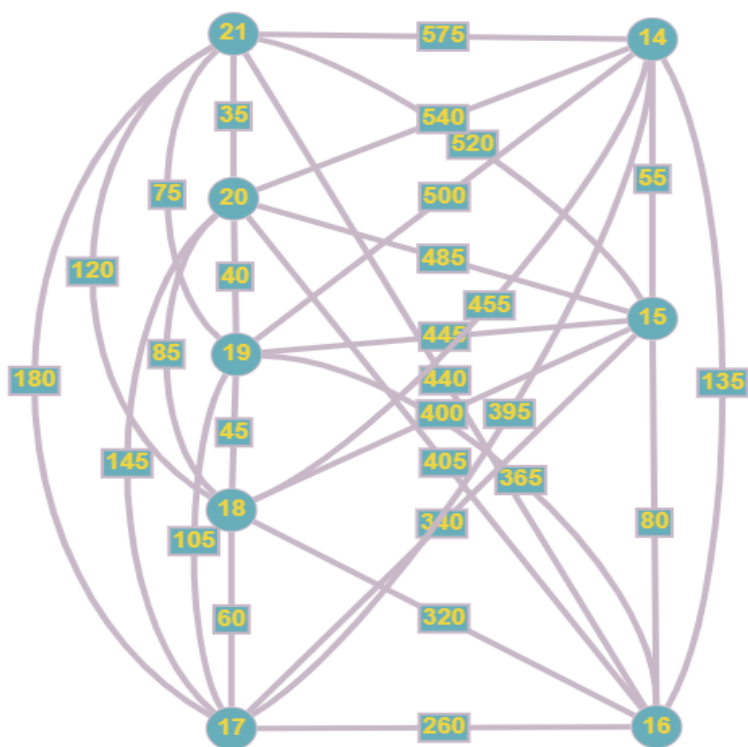
$$c_{ij} = \min\{c_{ij}, c_{ik} + c_{kj}\}$$

Po ukončení třetího kroku zkontrolujeme, jestli platí, že $k < n$ a pokud ano, tak zvýšíme hodnotu pomocné proměnné na $k = k + 1$ a opakujeme třetí krok. V opačném případě můžeme považovat algoritmus za ukončený a výsledkem je požadovaná matice vzdáleností.

	14	15	16	17	18	19	20	21
14	0	55	135	395	455	500	540	575
15	55	0	80	340	400	445	485	520
16	135	80	0	260	320	365	405	440
17	395	340	260	0	60	105	145	180
18	455	400	320	60	0	45	85	120
19	500	445	365	105	45	0	40	75
20	540	485	405	145	85	40	0	35
21	575	520	440	180	120	75	35	0

Tabulka 3: Konečná podoba matice vzdáleností po dokončení Floydova algoritmu

Tabulka č. 3 představuje výsledek Floydova algoritmu a hodnoty v jednotlivých buňkách jsou tedy vzdálenosti mezi jednotlivými stojánkami. Na obrázku č. 35 je potom znázorněn tento výsledek graficky.



Obrázek 35: Grafická reprezentace vzdáleností mezi jednotlivými stojánkami

Vzhledem k tomu, že v rámci Floydova algoritmu byly počítány délky minimálních cest mezi jednotlivými vrcholy, které představují stojánky, je potřeba v rámci naší práce přepočítat tyto vzdálenosti na čas neboli na minimální doby přejezdů mezi stojánkami. Proto, je třeba hodnoty v tabulce č. 2 přepočítat pomocí stanovené průměrné rychlosti nakladačů (25 km/h) základním fyzikálním vzorcem:

$$t = \frac{s}{v}$$

	14	15	16	17	18	19	20	21
14	0	7,92	19,44	56,88	65,52	72	77,76	82,80
15	7,92	0	11,52	48,96	57,60	64,08	69,84	74,88
16	19,44	11,52	0	37,44	46,08	52,56	58,32	63,36
17	56,88	48,96	37,44	0	8,64	15,12	20,88	25,92
18	65,52	57,60	46,08	8,64	0	6,48	12,24	17,28
19	72	64,08	52,56	15,12	6,48	0	5,76	10,80
20	77,76	69,84	58,32	20,88	12,24	5,76	0	5,04
21	82,80	74,88	63,36	25,92	17,28	10,80	5,04	0

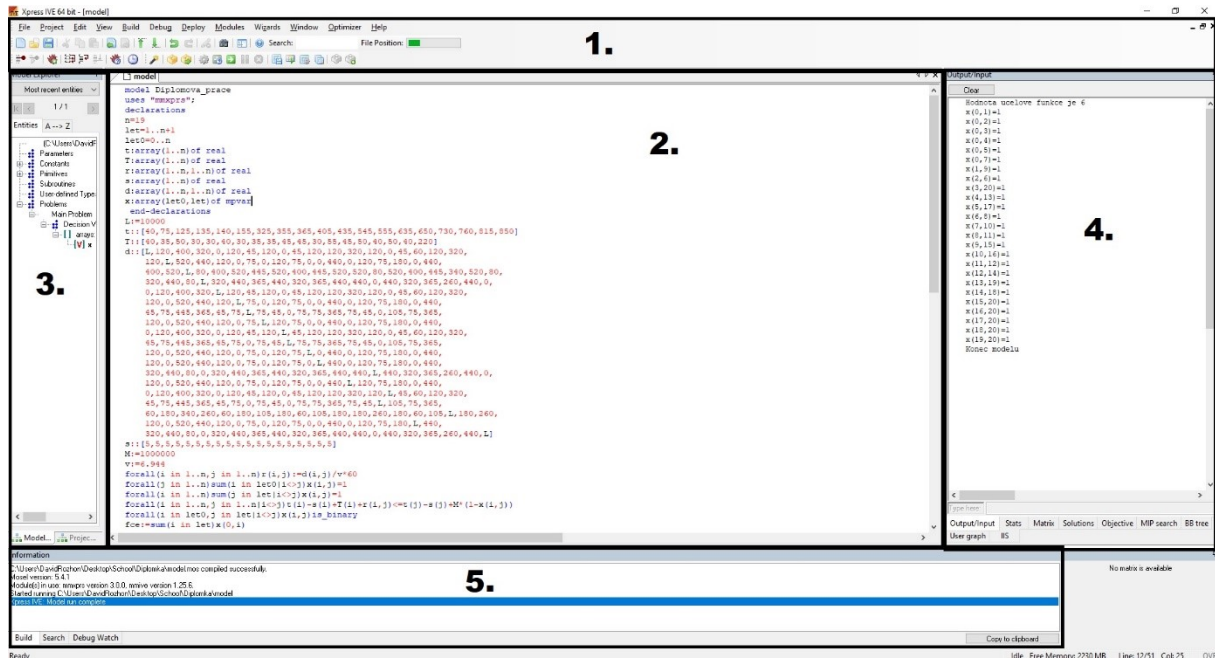
Tabulka 4: Tabulka dob přejezdů mezi jednotlivými stojánkami

Po vydělení vzdáleností rychlostí nakladačů (25 km/h \approx 6,944 m/s) můžeme vidět v tabulce č. 4 doby přejezdů mezi jednotlivými stojánkami. V rámci přejezdů nepočítáme s možnými zdrženímí kvůli dávání přednosti jiným vozidlům nebo z jakéhokoliv jiného důvodu.

4.2 Optimalizační software Xpress – IVE

Xpress – IVE je jeden z komerčních optimalizačních nástrojů pro řešení různých typů lineárního programování. Tento nástroj byl původně vyvinut společností Dash Optimization a byl získán společností FICO v roce 2008. Původními autory nástroje jsou Bob Daniel a Robert Ashford. První verze software Xpress dokázala řešit pouze základní úlohy lineárního programování. Další funkce získal nástroj až později. Po vydání v roce 1983 byl Xpress první komerční software pro řešení úloh lineárního programování.

Na začátku tvorby programu je třeba stanovit základní informace, mezi které patří název a všeobecné nastavení modelu a deklarace indexů, proměnných a polí. Dále je třeba naplnit úlohu koeficienty vstupních veličin a zapsat soustavy omezujících podmínek a účelovou funkci. Poté už stačí zapsat příkaz optimalizace a můžeme zahájit řešení. Pokud má řešitel potřebu zapisovat si do textu programu poznámky, je možno takto učinit zapsáním symbolu „!“ kdekoliv do textu a za něj psát danou poznámku, která nikterak neovlivní funkčnost modelu.



Obrázek 36: Rozdělení pracovního prostředí nástroje Xpress IVE

Uživatelské prostředí software Xpress – IVE by se dalo rozdělit do pěti základních sekcí (obrázek 36). V první sekci (1.), která se nachází v horní části, máme lištu nástrojů a menu. Nejdůležitější funkce se pro nás v této oblasti skrývají pod tlačítky ,Compile', které slouží ke kompilaci modelu, a ,Run model' sloužící k zahájení optimalizačního výpočtu. Druhá sekce (2.) se nazývá tzv. ,editor window'. Do této oblasti se zapisuje text programu. Třetí sekce, nacházející se v levé části (3.), je určena pro navigaci příkazů, kde jsou uvedeny všechny veličiny použité v textu programu a jejich hodnoty. Pravá sekce (4.) slouží k výpisům výsledků výpočtu a souvisejících informací. Tato sekce je rozdělena do několika záložek (pro nás nejdůležitější Input/Output a Stats). V nich jsou uvedeny výsledky výpočtu a také informace o jeho průběhu. Pátá a poslední sekce je umístěna ve spodní části obrazovky (5.) a slouží k výpisu všech hlášení, které získáme provedením kompilace textu programu. Převážně se jedná o chyby v sintaxi textu programu nebo jiných hlášení.

4.2.1 Text programu

Text programu úlohy, ve které se minimalizuje celkový počet nakladačů potřebných k obsluze daných letů má tvar:

```
model Diplomova_prace
uses "mmxprs";
```

```

declarations
n=19
let=1..n+1
let0=0..n
t:array(1..n)of real
T:array(1..n)of real
r:array(1..n,1..n)of real
s:array(1..n)of real
d:array(1..n,1..n)of real
x:array(let0,let)of mpvar
end-declarations

L:=100000
t::[40,75,125,135,140,155,325,355,365,405,435,545,555,635,650,730,760,815,850]
T::[40,35,50,30,30,40,30,35,35,45,45,30,55,45,50,40,50,40,220]
d::[L,120,400,320,0,120,45,120,0,45,120,120,320,120,0,45,60,120,320,
    120,L,520,440,120,0,75,0,120,75,0,0,440,0,120,75,180,0,440,
    400,520,L,80,400,520,445,520,400,445,520,520,80,520,400,445,340,520,80,
    320,440,80,L,320,440,365,440,320,365,440,440,0,440,320,365,260,440,0,
    0,120,400,320,L,120,45,120,0,45,120,120,320,120,0,45,60,120,320,
    120,0,520,440,120,L,75,0,120,75,0,0,440,0,120,75,180,0,440,
    45,75,445,365,45,75,L,75,45,0,75,75,365,75,45,0,105,75,365,
    120,0,520,440,120,0,75,L,120,75,0,0,440,0,120,75,180,0,440,
    0,120,400,320,0,120,45,120,L,45,120,120,320,120,0,45,60,120,320,
    45,75,445,365,45,75,0,75,45,L,75,75,365,75,45,0,105,75,365,
    120,0,520,440,120,0,75,0,120,75,L,0,440,0,120,75,180,0,440,
    120,0,520,440,120,0,75,0,120,75,0,L,440,0,120,75,180,0,440,
    320,440,80,0,320,440,365,440,320,365,440,440,L,440,320,365,260,440,0,
    120,0,520,440,120,0,75,0,120,75,0,0,440,L,120,75,180,0,440,
    0,120,400,320,0,120,45,120,0,45,120,120,320,120,L,45,60,120,320,
    45,75,445,365,45,75,0,75,45,0,75,75,365,75,45,L,105,75,365,

```

```

60,180,340,260,60,180,105,180,60,105,180,180,260,180,60,105,L,180,260,
120,0,520,440,120,0,75,0,120,75,0,0,440,0,120,75,180,L,440,
320,440,80,0,320,440,365,440,320,365,440,440,0,440,320,365,260,440,L]
s::[5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5]
M:=1000000
v:=6.944
forall(i in 1..n,j in 1..n)r(i,j):=(d(i,j)/v)/60
forall(j in 1..n)sum(i in let0|i<>j)x(i,j)=1
forall(i in 1..n)sum(j in let|i<>j)x(i,j)=1
forall(i in 1..n,j in 1..n|i<>j)t(i)-s(i)+T(i)+r(i,j)<=t(j)-s(j)+M*(1-x(i,j))
forall(i in let0,j in let|i<>j)x(i,j)is_binary
fce:=sum(i in let)x(0,i)
minimise(fce)
writeln("Hodnota ucelove funkce je ",getobjval)
forall(i in let0, j in let|getsol(x(i,j))=1)writeln("x(",i,",",j,")=",getsol(x(i,j)))
end-model

```

Hodnota n udává počet letů, které je třeba obsloužit na všech 8 stojánkách zahrnutých do optimalizačního výpočtu.

Prvky vektoru t jsou uvedeny časy, ve kterých dojde k zastavení letadel obsluhujících jednotlivé lety na stojánku.

Prvky matice T určují doby obsluhy letů. Prvky matice d reprezentují vzdálenosti mezi stojánkami v metrech, na kterých jsou lety obsluhovány, a které byly vypočítány s využitím Floydova algoritmu.

Konstanty M a L jsou tzv. prohibivní konstanty. Jsou to pomocné konstanty vysokých hodnot, které se využívají k tvorbě podmínek modelu.

Hodnota v je potom průměrná rychlost nakladačů 25 km/h přepočítána na m/s.

5. Zhodnocení výsledků

Po ukončení optimalizačního výpočtu pro minimalizaci celkového počtu dvojic pásových nakladačů zavazadel potřebných k odbavení letadel obsluhujících množinu ukončených letů byly získány následující výsledky (obrázek 37).

```
Hodnota ucelove funkce je 4
x(0,1)=1
x(0,2)=1
x(0,3)=1
x(0,4)=1
x(1,5)=1
x(2,6)=1
x(3,20)=1
x(4,20)=1
x(5,7)=1
x(6,8)=1
x(7,9)=1
x(8,10)=1
x(9,11)=1
x(10,12)=1
x(11,13)=1
x(12,14)=1
x(13,15)=1
x(14,16)=1
x(15,17)=1
x(16,18)=1
x(17,19)=1
x(18,20)=1
x(19,20)=1
```

Obrázek 37: Výsledky optimalizačního výpočtu

Účelová funkce má po ukončení optimalizačního výpočtu hodnotu 4. Po skončení optimalizačního výpočtu bylo tedy zjištěno, že k obsluze letadel obsluhujících množinu ukončených letů bude zapotřebí minimálně 4 dvojic pásových nakladačů (tedy celkově 8).

Posloupnosti letů obsluhovaných stejnými dvojicemi nakladačů jsou na základě vypočítaných výsledků následující:

- 1) $x(0,1)=1$; $x(1,5)=1$; $x(5,7)=1$; $x(7,9)=1$; $x(9,11)=1$; $x(11,13)=1$; $x(13,15)=1$; $x(15,17)=1$;
 $x(17,19)=1$; $x(19,20)=1$
- 2) $x(0,2)=1$; $x(2,6)=1$; $x(6,8)=1$; $x(8,10)=1$; $x(10,12)=1$; $x(12,14)=1$; $x(14,16)=1$; $x(16,18)=1$;
 $x(18,20)=1$
- 3) $x(0,3)=1$; $x(3,20)=1$
- 4) $x(0,4)=1$; $x(4,20)=1$

Plán činnosti první dvojice pásových nakladačů zavazadel

Jako první bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 1 s plánovaným zastavením v 5:45 na stojánce 18. Nejzazší doba přistavení první dvojice pásových nakladačů je 5:40. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 6:25, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 6:20.

Protože další letadlo po letu 5 využívá také stojánku 18, není nutno uvažovat s dobou přesunu první dvojice pásových nakladačů zavazadel na jinou stojánku. Dvojice nakladačů je tedy připravena k obsluze letadla po letu 5 v 6:20, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 7:20. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 7:55, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 7:50.

Následně bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 7 na stojánce 19. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 18, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 5, na stojánku 19, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 7, činí 0,108 minut, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel je připravena k obsluze letadla po letu 7 mezi 7:50 a 7:51, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 10:25, protože zastavení letadla po letu 7 na stojánce 19 je naplánováno v 10:30. Odlet letadla ze stojánky 19 je naplánován na 11:00, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 10:55.

Následně bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 9 na stojánce 18. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 19, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 7, na stojánku 18, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 9, činí 0,108 minut, tzn., že první dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 9 mezi 10:55 a 10:56, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 11:05. Odlet letadla ze stojánky 18 je naplánován na 11:45, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 11:40.

Poté bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 11 na stojánce 21. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 18, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 9, na stojánku 21, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 11, činí 0,288 minut, tzn., že první dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 11 mezi 11:40 a 11:41, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 12:15. Odlet letadla ze stojánky 21 je naplánován na 13:05, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 13:00.

Následně bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 13 na stojánce 16. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 21, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 11, na stojánku 16, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 13, činí 1,056 minut, tzn., že první dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 13 mezi 13:01 a 13:02, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 14:15. Odlet letadla ze stojánky 16 je naplánován na 15:15, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 15:10.

Poté bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 15 na stojánce 18. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 16, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 13, na stojánku 18, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 15, činí 0,768 minut, tzn., že první

dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 15 mezi 15:10 a 15:11, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 15:50. Odlet letadla ze stojánky 18 je naplánován na 16:45, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 16:40.

Následně bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 17 na stojánce 17. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 18, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 15, na stojánku 17, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 17, činí 0,144 minut, tzn., že první dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 17 mezi 16:40 a 16:41, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 17:40. Odlet letadla ze stojánky 17 je naplánován na 18:35, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 18:30.

Jako poslední bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 19 na stojánce 16. Doba přejezdu první dvojice nakladačů ze stojánky 17, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 17, na stojánku 16, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 19, činí 0,624 minut, tzn., že první dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 19 mezi 18:30 a 18:31, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 19:00. Odlet letadla ze stojánky 16 je naplánován na 22:55, tzn., že první dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 22:50.

Tímto povinnosti první dvojice nakladačů zavazadel končí a dochází k jejich přejezdu na odstavnou plochu mezi stojánkami 15 a 16.

Plán činnosti druhé dvojice pásových nakladačů zavazadel

Jako první bude druhou dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 2 s plánovaným zastavením v 6:20 na stojánce 21. Nejzazší doba přistavení druhé dvojice pásových nakladačů je 6:15. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 6:55, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 6:50.

Protože další letadlo po letu 6 využívá také stojánku 21, není nutno uvažovat s dobou přesunu druhé dvojice pásových nakladačů zavazadel na jinou stojánku. Druhá dvojice nakladačů je tedy připravena k obsluze letadla po letu 6 v 6:50, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 7:35. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 8:20, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 8:15.

Protože další letadlo po letu 8 využívá také stojánku 21, není nutno uvažovat s dobou přesunu druhé dvojice pásových nakladačů zavazadel na jinou stojánku. Druhá dvojice nakladačů je tedy připravena k obsluze letadla po letu 8 v 8:15, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 10:55. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 11:35, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 11:30.

Následně bude první dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 10 na stojánce 19. Doba přejezdu druhé dvojice nakladačů ze stojánky 21, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 8, na stojánku 19, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 10, činí 0,18 minut, tzn., že druhá dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 10 mezi 11:30 a 11:31, přičemž

nejzazší doba jejich přistavení je v 11:45. Odlet letadla ze stojánky 19 je naplánován na 12:35, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 12:30.

Poté bude druhou dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 12 na stojánce 21. Doba přejezdu druhé dvojice nakladačů ze stojánky 19, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 10, na stojánku 21, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 12, činí 0,18 minut, tzn., že druhá dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 12 mezi 12:30 a 12:31, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 14:05. Odlet letadla ze stojánky 21 je naplánován na 14:40, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 14:35.

Následně bude druhou dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 14 na stojánce 21. Protože další letadlo po letu 14 využívá také stojánku 21, není nutno uvažovat s dobou přesunu druhé dvojice pásových nakladačů zavazadel na jinou stojánku. Druhá dvojice nakladačů je tedy připravena k obsluze letadla po letu 8 v 14:35, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 15:35. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 16:25, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 16:20.

Poté bude druhou dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 16 na stojánce 19. Doba přejezdu druhé dvojice nakladačů ze stojánky 21, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 14, na stojánku 19, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 16, činí 0,18 minut, tzn., že druhá dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 16 mezi 16:20 a 16:21, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 17:10. Odlet letadla ze stojánky 19 je naplánován na 17:55, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 17:50.

Jako poslední bude druhou dvojicí pásových nakladačů zavazadel obsluhováno letadlo po letu 18 na stojánce 21. Doba přejezdu druhé dvojice nakladačů ze stojánky 19, na které bylo obsluhováno letadlo po letu 16, na stojánku 21, na které má proběhnout obsluha letadla po letu 18, činí 0,18 minut, tzn., že druhá dvojice nakladačů je připravena k obsluze letadla po letu 18 mezi 17:50 a 17:51, přičemž nejzazší doba jejich přistavení je v 18:35. Odlet letadla ze stojánky 21 je naplánován na 19:20, tzn., že druhá dvojice pásových nakladačů zavazadel musí být odstavena nejpozději v 19:15.

Tímto povinnosti druhé dvojice nakladačů zavazadel končí a dochází k jejich přejezdu na odstavnou plochu mezi stojánkami 15 a 16.

Plán činnosti třetí dvojice pásových nakladačů zavazadel

Třetí dvojice nakladačů má k obsluze pouze letadlo po letu 3 s plánovaným zastavením na stojánce 15 v 7:10. Nejzazší doba třetí dvojice pásových nakladačů zavazadel je tedy 7:05. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet v 8:00, tzn., že třetí dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději v 7:55 a následně je přemístěna na odstavnou plochu mezi stojánkami 15 a 16.

Plán činnosti čtvrté dvojice pásových nakladačů zavazadel

Čtvrtá dvojice pásových nakladačů zavazadel má k obsluze také pouze jedno letadlo, a to po obsluze letu 4 s plánovaným zastavením na stojánce 16 v 7:20. Nejzazší doba přistavení čtvrté dvojice pásových nakladačů zavazadel je tedy 7:15. Obsluhované letadlo má z dané stojánky naplánován odlet

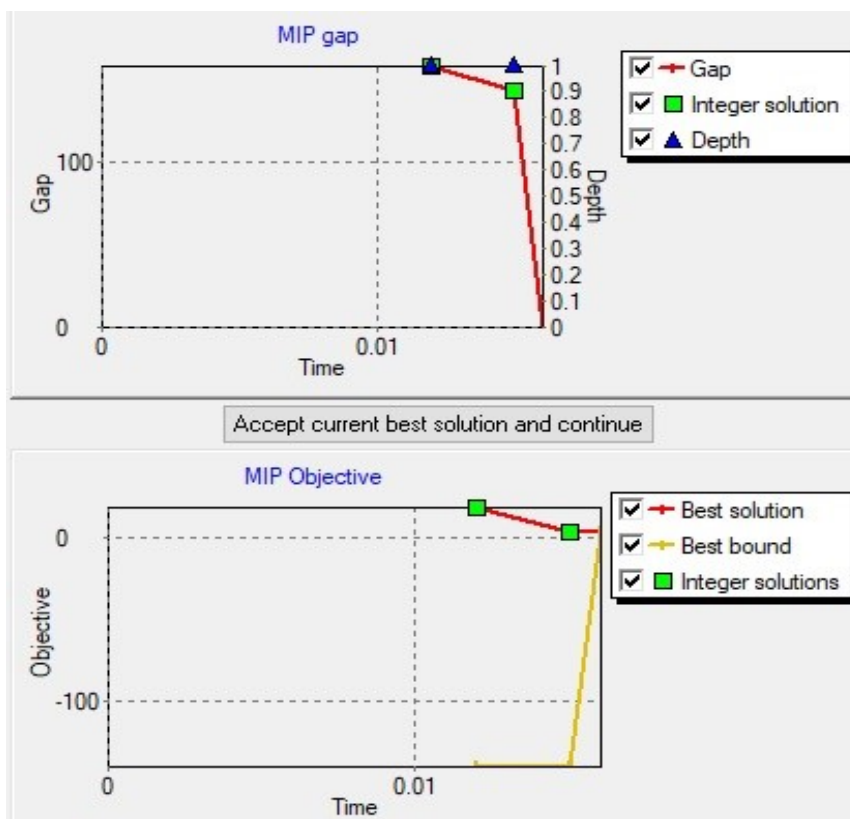
v 7:50, tzn., že čtvrtá dvojice pásových nakladačů zavazadel je odstavena nejpozději 7:45 a následně je přemístěna na odstavnou plochu mezi stojánkami 15 a 16.

Zhodnocení

Během kontroly zjistíme, že výsledek výpočtu je takový, že dvě dvojice pásových nakladačů zavazadel se používají pouze k obsluze jednoho letu v rámci ranní špičky. Zbylé dvě dvojice jsou schopny bez problémů obsloužit zbývajících 17 letů naplánovaných během dne.

Stats			
Matrix:		Presolved:	
Rows(constraints):	38	Rows(constraints):	34
Columns(variables):	381	Columns(variables):	158
Nonzero elements:	722	Nonzero elements:	316
Global entities:	381	Global entities:	158
Sets:	0	Sets:	0
Set members:	0	Set members:	0
Overall status: Finished global search.			
LP relaxation:		Global search:	
Algorithm:	Simplex dual	Current node:	1
Simplex iterations:	17	Depth:	1
Objective:	4	Active nodes:	0
Status:	Unfinished	Best bound:	4
Time:	0.0s	Best solution:	4
		Gap:	0%
		Status:	Solution is optimal.

Obrázek 39: Statistické hlášení



Obrázek 38: Grafy reprezentující průběh hodnoty účelové funkce v čase

Ze statistického hlášení lze vyčíst, že bylo nalezeno optimální řešení („Solution is optimal“). Dále je patrné, že vzhledem k poměrně malému objemu počtu vstupních dat nepřekročila doba optimalizačního výpočtu hodnotu 0,1 sekundy. Na obrázku 39 lze vidět grafický výstup průběhu hodnoty účelové funkce. Dolní graf reprezentuje vývoj hodnot „Best solution“ (nejlepší celočíselné řešení) – červený průběh a „Best bound“ (dolní ohraničení nejperspektivnější větve řešícího stromu) – žlutý průběh. Z grafu je vidět, že optimální řešení bylo nalezeno jako druhé v pořadí. Rozdíl mezi průběhem hodnot Best solution a Best bound „Gap“ (velikost prohledávaného pásma efektivity). Když se žlutá průběh přibližuje k červenému, hodnota „Gap“ se snižuje. Pokud se žlutá a červená čára protne, „Gap“ bude roven 0 a dojde k ukončení optimalizačního výpočtu a tímto je zároveň potvrzena optimalita řešení.

6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit matematický model a pomocí optimalizačních výpočtů v softwaru Xpress – IVE vypočítat minimální počet pásových nakladačů zavazadel potřebných k obslužení určitého počtu letů na Letišti Václava Havla v Praze. V rámci práce bylo počítáno pouze s vybranými stojánkami.

Úvodní kapitola diplomové práce je věnována problematice manipulační techniky sloužící k technickému odbavení letadel. V rámci této části jsou následně popsány jednotlivé technické prostředky, které jsou používány při handlingu na většině letišť. Popsány jsou jednotlivé prostředky, které se podílejí na odbavení letadla už od samotného začátku jako je například vozidlo „Follow me“, které dovede letadlo z pojezdové dráhy až na samotnou stojánku. Poté je letadlo obsluženo standartní technikou, jako jsou nástupní schody, popřípadě nástupní most, pozemní zdroj energie GPU, klimatizační jednotka apod. až po odmrazovací vozidla, která bývají většinou v případě použití posledním technickým prostředkem sloužícím k technickému odbavení letadel. Optimalizace byla prováděna pro pásové nakladače zavazadel.

Druhá kapitola práce je zaměřena na základní obecné poznatky o optimalizačních metodách včetně uvedení používaných termínů a základní charakteristikou lineárního programování, které bylo použito při řešení zadaného problému.

Následující kapitola se věnuje popisu použitého matematického modelu. Řešený problém je nejprve popsán verbálně a následně také matematicky. Poté je formulován matematický model – účelová funkce a soustava omezujících podmínek.

Čtvrtá kapitola se zabývá aplikací modelu při řešení problému. Na začátku jsou nastíněny podmínky a popis softwaru, ve kterém bude optimalizační výpočet probíhat. Byla prezentována tabulka letů s potřebnými daty. Floydovým algoritmem byly zjištěny vzdálenosti (délky minimální cesty) mezi jednotlivými stojánkami. Dosažené vzdálenosti byly přepočítány na minimální časy přejezdů při průměrné rychlosti 25 km/h. Dále bylo popsáno prostředí nástroje Xpress IVE, ve kterém probíhal optimalizační výpočet uvedení zobrazení textu programu.

Pátá kapitola je zaměřena na zpracování výsledků dosažených optimalizačním výpočtem v nástroji Xpress – IVE. Jsou prezentovány statistiky optimalizačního výpočtu a jednotlivé grafy popisující průběh řešení.

Pro bezproblémové obslužení letadel obsluhujících zadanou množinu letů na vybrané množině stojánek je potřeba minimálně osmi pásových nakladačů zavazadel, kdy počítáme s tím, že pro každý let je potřeba dvou těchto nakladačů. Samozřejmě je potřeba mít nějakou rezervu nakladačů pro případy poruchy nebo jiných nepředvídatelných událostí. Stanovení velikosti této rezervy však již není předmětem této práce.

Seznam použité literatury

- [1] *DOPRAVNÍ ŘÁD LETIŠTĚ PRAHA RUZYNEĚ*. Praha, 2019. Dostupné také z: https://www.prg.aero/sites/default/files/obsah/staticke-stranky/5224/soubory/dopravni-rad-letiste-praha-ruzyne_0.pdf
- [2] *Safety kampaň 2019: Prevence poškození letadel*. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://www.prg.aero/sites/default/files/obsah/O-letisti/O%20spole%C4%8Dnosti/Bezpecnost%20na%20letisti/Safety/Safety%20Brief/SAFETY%20BRIEF%20LKPR%2064%20Opening-closing%20cargo%20door.pdf>
- [3] *AIP ČR* [online]. Praha [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm
- [4] *Czech Airlines Handling: Odbavení letadel letiště Praha* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.czechairlineshandling.com/handlingove-sluzby/odbaveni-letadel>
- [5] *Leoš Janáček Ostrava Airport: Odbavení cestujících, letadel a nákladu* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.airport-ostava.cz/cz/page-investice-pro-posileni-odbaveni-cestujicich-letadel-a-nakladu/>
- [6] *Ground Handling*. SKYbrary [online]. 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Ground_Handling
- [7] *H2O on board: How Delta gets water on your plane*. *Delta News Hub* [online]. 2017 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://news.delta.com/h2o-board-how-delta-gets-water-your-plane>
- [8] *The Basics Of Preconditioned Air*. *AviationPros* [online]. 2012 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aviationpros.com/gse/gpus-pcas-power-carts-accessories/article/10704019/the-basics-of-preconditioned-air>
- [9] *Ground support equipment*. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_support_equipment
- [10] TOLAR, David. *PROBLEMATIKA SDÍLENÍ MANIPULAČNÍ TECHNIKY PRO TECHNICKÉ ODBAVENÍ LETADEL* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85349/F6-BP-2019-Tolar-David-Problematika%20sdileni%20manipulacni%20techniky%20pro%20technicke%20odbaveni%20letadel.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT.
- [11] TOMÁŠOVÁ, Pavla. *TECHNICKÁ ZLEPŠENÍ ODBAVOVACÍCH PLOCH NA LKPR PRO EFEKTIVNĚJŠÍ POZEMNÍ ODBAVENÍ* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80174/F6-DP-2018-Tomasova-Pavla-Prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT.

- [12] Best 400Hz Ground Power Unit. *Medium* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://medium.com/@aeromaxgse11/best-400hz-ground-power-unit-185f7ad9a58f>
- [13] Fixed ground power unit 2400 Power Coil. *AeroExpo* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aeroexpo.online/prod/itw-gse-hobart-j-b-aviation/product-177560-16938.html>
- [14] PRECONDITIONED AIR UNIT (PCA) – ZEPHIR. *Adelte* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.adelte.com/airports/preconditioned-air-zephir/>
- [15] Air MAK industries inc. has successfully delivered a 270PPM Air start unit to Jet Star, New Zealand at Auckland airport. *AirMak* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.airmak.com/index.php/news/air-mak-industries-inc-successfully-delivered-270ppm-air-start-unit-jet-star-new-zealand-auckland-airport/>
- [16] New SkyMark 10,000 Gallon Jet Refueler servicing KLM Boeing 787. *Skymark Refuelers* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://skymarkrefuelers.com/blog/new-skymark-10000-gallon-jet-refueler-servicing-klm-boeing-787/>
- [17] How Aircraft Refueling Works & The Role of Fuel Hydrant Dispensers & Aircraft Refueling Trucks. *Aviation Learnings* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://aviationlearnings.com/how-airplane-refueling-works/>
- [18] AIRBUS A320 Family Potable Water Tank Servicing. *Youtube* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=UObRkyWyHx4>
- [19] TOILET SERVICE UNITS. *Vestergaard company* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://vestergaardcompany.com/news/gallery/#images-18>
- [20] Lavatory Service Vehicles Market Plugging In. *Communal news* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://communalnews.com/lavatory-service-vehicles-market-plugging-in/>
- [21] CATERING TRUCKS. *Doll* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.doll.eu/en/products/ground-support-equipment/catering-trucks/>
- [22] Aircraft Catering Vehicle serving an aircraft. *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aircraft_Catering_Vehicle_serving_an_aircraft.JPG
- [23] Towable Passenger Stairs. *Mallaghan* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://mallaghange.com/portfolio-items/towable-passenger-stairs/>
- [24] A Vietnam Airlines aircraft attached to stairs at Tan Son Nhat International Airport in HCMC. *VN Express* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://e.vnexpress.net/news/news/woman-falls-off-plane-stairs-at-hcmc-airport-dies-4116973.html>
- [25] Apron Buses. *AviationPros* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aviationpros.com/ground-handling/ground-handlers-service-providers/passenger-services/product/11193176/cobus-industries-lp-apron-buses>

- [26] Carbridge. *LinkedIn* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://cz.linkedin.com/company/carbridge-airside-transport-pty-ltd>
- [27] A SINGLE TOW-BAR FOR ALL WIDE-BODY AIRCRAFT. *Hydro* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.hydro.aero/en/newsletter-details/a-single-tow-bar-for-all-wide-body-aircraft.html>
- [28] Expediter™ Towbarless Tractors. *JBT* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.jbtc.com/en/north-america/aerotech/products-and-services/ground-support-equipment/expediter-towbarless-tractors>
- [29] REMOTELY CONTROLLED AIRCRAFT TUGS: THE FUTURE OF GROUND HANDLING. *Mototok* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.mototok.com/blog/remotely-controlled-aircraft-tugs-the-future-of-ground-handling>
- [30] U.S. Air Force Air mobility command. *Wikimedia* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/US_Navy_060831-N-3560G-051_Members_of_Naval_Mobile_Construction_Battalion_Four_%28NMCB-4%29_load_Tricon_Containers_loaded_with_construction_equipment_destine_for_field_testing_in_Iraq%2C_into_a_U.S._Air_Force%2C_Air_Mobility_Command%2C_C.jpg
- [31] Cargo high loaders. *Trepel* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://trepel.com/products/cargo-high-loaders/>
- [32] Towable Belt Loader. *AviationPros* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aviationpros.com/gse/baggage-cargo/belt-loaders-conveyors/product/12340060/flight-gse-ltd-towable-belt-loader>
- [33] Powerstow. *Aeroleasing* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://aeroleasing.com.sg/products/powerstow/>
- [34] Letiště ve Stuttgartu rozšiřuje flotilu elektrických nákladních traktorů. *Smart novinky* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://smartnovinky.cz/2019/10/letiste-ve-stuttgartu-rozsiruje-flotilu-elektricky-nakladnich-traktoru/>
- [35] JAL to Pilot TractEasy Autonomous Towing Tractors at Narita International Airport. *Airside International* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.airsideint.com/jal-to-pilot-tracteasy-autonomous-towing-tractors-at-narita-international-airport/>
- [36] A baggage handler at Logan Airport in Boston. *The Telegraph* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.telegraph.co.uk/travel/news/Toss-the-bag-and-other-games-airport-staff-play-with-your-luggage/>
- [37] Dollies. *Blumenbecker* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.blumenbecker.com/industrial-trade/capital-goods/dollies>
- [38] Air Canada planes get de-iced on the tarmac by crews at Pearson International Airport in Toronto. *Macleans* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.macleans.ca/economy/business/is-this-finally-the-end-of-de-icing-delays/>

- [39] How Aircraft De-Icing Works. *The Points Guy* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://thepointsguy.com/news/how-aircraft-de-icing-works/>
- [40] Follow me car. *Autosalon.tv* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.autosalon.tv/novinky/autopunk/bolonske-letiste-ma-follow-me-car-jak-se-patri-desetivalcove-lamborghini-huracan>
- [41] 'Follow me' car stalked by predator. *Reddit* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/absoluteunit/comments/b7md19/follow_me_car_stalked_by_predator/
- [42] *Google Earth* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://earth.google.com/web/@50.10769699,14.26515945,355.10857839a,374.18938539d,35y,-102.95590814h,59.8185989t,0r>
- [43] VOLT, Jiří. *OPTIMALIZACE POČTU A ROZMÍSTĚNÍ ODBAVOVACÍ TECHNIKY NA LETIŠTI VÁCLAVA HAVLA* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90647/F6-BP-2020-Volt-Jiri-Optimalizace_techiky_LKPR.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT.
- [44] TEICHMANN, Dušan. *Optimalizace technologických procesů* [online]. In: . Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2017 [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-248-3269-2. Dostupné z: https://issuu.com/michdor/docs/m14_text
- [45] TEICHMANN, Dušan. *Matematické modely pro oběhy vozidel – podklady pro přednášky z předmětu Optimalizace dopravních procesů II*. Ostrava.
- [46] DORDA, Michal. *Vyhledávání vzdáleností v grafech – Floydův algoritmus* [online]. In: Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://issuu.com/michdor/docs/m14_animace_1
- [47] DORDA, Michal. *Základy matematického programování* [online]. In: . Ostrava: VŠB-TU Ostrava [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Dopravni_uloha.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 40: Příklad rozmístění odbavovací techniky na letišti v Praze [1]

Obrázek 41: Pozemní vlečné GPU [12]

Obrázek 42: GPU umístěné na konstrukci nástupního mostu [13]

Obrázek 43: Klimatizační jednotka [14]

Obrázek 44: Vzduchový startér [15]

Obrázek 45: Cisterna s palivem [16]

Obrázek 46: Fuel hydrant dispenser [17]

Obrázek 47: Servisní panel [18]

Obrázek 48: Vozidlo s pitnou vodou [19]

Obrázek 49: Fekální vozidlo [20]

Obrázek 50: Cateringové vozidlo [21]

Obrázek 51: Cateringová vozidla [22]

Obrázek 52: Tažné nástupní schody [23]

Obrázek 53: Nástupní schody s vlastním pohonem [24]

Obrázek 54: Autobus firmy Carbridge na letišti v Sydney [25]

Obrázek 55: Apron bus [26]

Obrázek 56: Tahač s tažným zařízením [27]

Obrázek 57: Towbarless tug [28]

Obrázek 58: Dálkově ovládaný, elektrický TBL [29]

Obrázek 59: Nůžkový nakladač s jednou plošinou [30]

Obrázek 60: Nůžkový nakladač oddělenými plošinami [31]

Obrázek 61: Tažný pásový nakladač zavazadel [32]

Obrázek 62: Pásový nakladač zavazadel s vlastním pohonem [33]

Obrázek 63: Elektrický tahač vozíků [34]

Obrázek 64: Autonomní tahač vozíků [35]

Obrázek 65: Klecový vozík [36]

Obrázek 66: Paletové vozíky [37]

Obrázek 67: Odmrazovací vozidla [38]

- Obrázek 68: Výstupy pro používané kapaliny [39]
- Obrázek 69: Lamborghini Huracan jako vozidlo Follow me na letišti v Boloni [40]
- Obrázek 70 Antonov AN-124 neboli Ruslan pojíždějící za vozidlem Follow me [41]
- Obrázek 71: Vybrané sektory stojánek na Letišti Václava Havla v Praze [42]
- Obrázek 72: Umístění vybraných stojánek v rámci mapy letiště [1]
- Obrázek 73: Graf reprezentující rozmístění stojánek a délek přímých vzdáleností
- Obrázek 74: Grafická reprezentace vzdáleností mezi jednotlivými stojánkami
- Obrázek 75: Rozdělení pracovního prostředí nástroje Xpress IVE
- Obrázek 76: Výsledky optimalizačního výpočtu
- Obrázek 77: Statistické hlášení
- Obrázek 78: Grafy reprezentující průběh účelové funkce v čase

Seznam tabulek

Tabulka 5: Tabulka se základními informacemi o letech [43]

Tabulka 6: Tabulka hodnot přímých vzdáleností po prvním kroku Floydova algoritmu

Tabulka 7: Konečná podoba matice vzdáleností po dokončení Floydova algoritmu

Tabulka 8: Tabulka dob přejezdů mezi jednotlivými stojánkami

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D., za odborné rady, cenné připomínky, trpělivost a ochotu během celého období řešení práce.