

VYUŽITÍ BADA MODELŮ PRO MALÉ CIVILNÍ LETOUNY

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 24.5.2013

.....
Petr Vála

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá modelováním parametrů malých civilních letounů. Je v ní uveden a stručně popsán vývoj modelování parametrů letounů a uvedeny modely, které jsou v současné době používány. Je brán zvláštní důraz na BADA model, jehož struktura je popsána. Popsané modely jsou porovnány z hlediska vhodnosti pro modelování malých civilních letounů a BADA model je vybrán jako nejvhodnější. Jsou popsány nedostatky tohoto modelu pro modelování malých civilních letounů. Je popsán postup testů pro identifikaci letounu pro použití v modelování pomocí BADA. Dále je vytvořen model pro letoun Tecnam P92ECHO a ověřen z hlediska parametrů letounu. V prostředí AgentFly je vygenerována trajektorie, která je autopilotem letounu experimentálně proletěna a porovnána s plánem.

ABSTRACT

The subject of this work is modeling of parameters for light civil aircraft. The development of performance modeling and different approaches used in present are briefly described. BADA model and its structure is described with greater detail. Presented modeling approaches are compared with respect to modeling of light civil aircraft while BADA model being chosen as the most fitting. The deficiencies of BADA model towards light civil aircraft are described. Sequence of tests for model identification for usage in BADA model is presented. Next, a model for Tecnam P92ECHO aircraft is created and confirmed for the aircraft parameters. In AgentFly simulation the trajectory for this plane is generated. The trajectory is experimentally flown with autopilot, recorded, and compared with the flight plan.

OBSAH

Prohlášení.....	2
Abstrakt	3
Seznam příloh.....	5
1 Úvod	6
1.1 Trocha historie.....	6
1.2 Struktura práce.....	7
2 BADA model.....	8
2.1 Co je BADA model?.....	8
2.2 Rodiny BADA modelů	10
2.3 Popis a struktura BADA 3.10	11
2.4 Aplikace BADA modelů	12
2.5 Shrnutí	13
3 Jiné modely.....	14
3.1 GAME model.....	14
3.2 MIT model	14
3.3 PIANO model	15
3.4 Look-up table.....	15
3.5 Boeing INFLT a REPORT	15
3.6 Shrnutí	15
4 Modelování malých civilních letounů.....	17
4.1 Rozdíly mezi modelováním malých civilních letounů a běžných dopravních letounů	17
4.2 Vhodné modely pro malé civilní letouny.....	18
4.2.1 GAME model.....	18
4.2.2 MIT model	18
4.2.3 PIANO model	19
4.2.4 Look-up table.....	19
4.2.5 INFLT a REPORT	19
4.2.6 BADA model.....	19
4.3 Nedostatky BADA modelu při modelování malých civilních letounů.....	21
4.4 Shrnutí	23
5 Testy modelů	24
5.1 Postup identifikace	24

5.2	Určení modelu	25
5.2.1	Ověření podmínek BADA.....	25
5.2.2	Nalezení potenciálních synonym.....	25
5.2.3	Ověření rozmezí jiných synonym.....	25
5.2.4	Chybová analýza	27
5.2.5	Zápis do souborů	27
5.3	Shrnutí	27
6	Integrace do AgentFly.....	28
6.1	AgentFly.....	28
6.2	Průlet plánu	28
6.3	Shrnutí	29
7	Závěr.....	30
	Citovaná literatura.....	32

SEZNAM PŘÍLOH

Obrázek 1:	Chyba rychlosti stoupání v celé letové obálce (10).....	18
Obrázek 2:	Absolutní chyba výšky h [fpm] pro BADA 3.x (5)	20
Obrázek 3:	Letouny ve Fort Worth (19).....	22
Obrázek 4:	Porovnání chyby výšky pro různé letouny (19).....	22
Obrázek 5:	Seznam letounů spadajících pod označení ICAO P28A (38) (částečný výpis)	26
Obrázek 6:	Průlet waypointů autopilotem.....	28
Tabulka 1:	Hmotnostní kategorie letounů	17
Tabulka 2:	Porovnání vhodnosti modelů pro malé civilní letouny	20
Tabulka 3:	Seznam limitací Global Aircraft Parameters (6).....	25
Tabulka 4:	Porovnání modelů pro použití v BADA	26
Tabulka 5:	Chybová analýza P28A a ECHO	26
Tabulka 6:	Letový plán.....	28
Graf 1:	Struktura BADA modelu (4).....	8

1 ÚVOD

Jedním z trendů moderní doby je modelování parametrů letadel. V současnosti se díky stále rostoucímu leteckému provozu věnují skupiny vědců počítačovému modelování trajektorií, detekci kolizí a simulaci letového provozu.

Vědecká skupina Agent Technology Group působící na Českém vysokém učení technickém v Praze se mimo jiné zabývá plánováním a simulací trajektorií pro malé civilní letouny. Tyto simulace probíhají v multi-agentním simulátoru AgentFly, který byl v ATG za tímto účelem stvořen. Ověřování těchto simulací a jejich praktická aplikace vyžaduje testování na reálných datech, která jsou poskytována letouny vybavenými záznamovým zařízením.

Skupina ATG se v současnosti účastní projektu Safefly, ve kterém se používá záznamové zařízení Integra firmy TL-Elektronic, která je druhým účastníkem Safefly. Upravené zařízení Integra, spojené s GPS systémem se používá v letounech třetí firmy, která se účastní Safefly, a to F-AIR. Letoun Tecnam P92 ECHO, na kterém je tento prostředek namontovaný, však musí být adekvátně vložen do simulace AgentFly tak, aby bylo možné na základě simulace jeho parametrů plánovat trajektorie, které by tímto letounem měly být proletěny.

1.1 TROCHA HISTORIE

Letadla jsou s námi tento rok již 110 let, a za toto období se i díky nim svět značně změnil. Vidina rychlé přepravy na, do té doby velmi dlouhé vzdálenosti, navíc akcelerovaná oběma světovými a posléze i studenou válkou, vedla k rychlému rozmachu leteckého provozu po světě. Tento, i přes ekonomickou krizi stále rostoucí trend vede logicky k mnohem hustšímu využívání leteckého prostoru. V loňském roce (2012) bylo přepraveno na nejfrekventovanějším letišti na světě, na Hartsfield–Jackson Atlanta International Airport více než 95 mil. pasažérů. (1)

S rozmachem počítačů ve druhé polovině dvacátého století na sebe nenechaly dlouho čekat ani metody modelování chování letadel. Počáteční motivací pro modelování vlastností letadel byly peníze a čas, které bylo nutné vynaložit na stále rostoucí poptávku po testech. Důvod nárůstu různých testů pramenil hlavně z nárůstu různých měnitelných parametrů letounů (geometrie křidel sání, ...), ale i ze stále extrémnějších podmínek, ve kterých byly provozovány. Příkladem hovořícím za sebe můžou být světové rekordy letounu F-104 v dosažené výšce (36 800m, 1963, neoficiální) a také v rychlosti (639m/s, 1964). Modelováním vlastností letadel bylo možné vyloučit nevhodné návrhy a zabývat se více těmi slibnými. Modelování začalo před rokem 1968, a pravděpodobně se jednalo o vojenský projekt, jak je patrné z (2) (3). Dalším důkazem hovořícím pro použitelné počítačové modelování je existence a úspěch programu Apollo (1961-1972). Jak je zmíněno v (2), již v roce 1968 existovalo dokonce několik počítačových programů a modelů, simulujících trajektorie jednoho i více letadel ve dvou- či třídimenzionálním prostoru. Jmenovitě jde o modely ATAC a RAND TACTICS. V sedmdesátých letech byl mimo jiné vyvinut i EROCOA/PARZOC model, ze kterého se později vyvinul jeden z modelů používaných dnes.

V dnešní době se však vynořila další motivace pro modelování letounů. Jsou jí stále rostoucí nároky na dispečery, jejichž povinností je dohlížet na bezpečný provoz. Dispečeri jsou však na hranici svých možností a roste chybovost jejich rozhodnutí.

Moderní modelování výkonnostních vlastností letadel a simulace letu je poměrně rychle se rozvíjející odvětví. Modelování výkonnostních parametrů letadel je praktikované výrobci letadel, konkrétně lze zmínit například Boeing, ale i kontrolními úřady pro letectví a leteckou přepravu. Zmínkyhodné jsou rozhodně FAA (Federal Aviation Administration) a EUROCONTROL. Což jsou organizace zabývající se zajištěním bezpečné letecké přepravy ve Spojených Státech, respektive v Evropě. Klíčovým pro modelování letadel, i pro řízení letového provozu – ATM (Air Traffic Management) je poskytnout realistické, přesné a kompletní modely letounů, které:

- lze použít pro přesný výpočet geometrických, kinetických i kinematických aspektů chování letadel;
- jsou platné pro široké spektrum typů letadel, v celém operačním letovém obalu¹, a ve všech fázích letu;
- jsou adekvátně komplexní, udržovatelné, a výpočetně náročné.

V současnosti existuje několik přístupů k modelování, pro autora podstatné jsou kinematický a zejména kinetický model. Rozdíl mezi těmito dvěma přístupy tkví v tom, že kinematický přístup k modelování ignoruje fyziku, která s letem souvisí - modeluje pouze trajektorii. Kinetický model, oproti tomu, uvažuje působení sil na hmotný bod a z těchto určuje výslednou dráhu letu (4).

1.2 STRUKTURA PRÁCE

Nejprve je stručně uvedeno modelování vlastností letadel a zasazeno do historických skutečností 20. století. Kapitola „BADA model“ se pak zabývá popisem modelu Base of Aircraft Data, který je v současné době velice používaným. Je popsána struktura modelu a rodiny, které tvoří BADA. V kapitole „Jiné modely“ se autor věnuje dalším modelovacím prostředkům, které jsou v současnosti dostupné, a stručně je popisuje. V následující kapitole jsou zmíněné modely rozebrány z pohledu modelování civilních letounů s cílem vybrat nejvhodnější model, který by tyto letouny reprezentoval. Kapitola „Testy modelů“ se zabývá postupem identifikace letounu tak, aby bylo možná jej použít jako model v databázi BADA. Dále se zabývá zapracováním modelu letounu Tecnam P92 ECHO do BADA modelu tak, aby byl použitelný pro budoucí simulace. Poslední kapitola je pak věnována popisu simulace AgentFly, naplánování trajektorie v tomto prostředí, a praktickému průletu naplánovaných bodů průletu autopilotem.

Na závěr bych rád poděkoval vedoucímu této práce, Ing. Milanu Rollovi, PhD. Za cenné náměty a připomínky a svým rodičům Petrovi a Janě Válovým za jejich neutuchající podporu.

¹ Volně přeloženo z anglického *operation flight envelope*, což znamená interval rychlosti a výšky takové, že spadají do bezpečného použití letadla.

2 BADA MODEL

V této kapitole je představen a popsán BADA model. První část se věnuje obecnému popisu BADA a ve druhé části jsou popsány rodiny 3 a 4 jakož i rozdíly mezi nimi panující. Poslední dvě části jsou věnovány detailnějšímu popisu modelu BADA revize 3.10, a aplikovatelnosti BADA modelů v realitě.

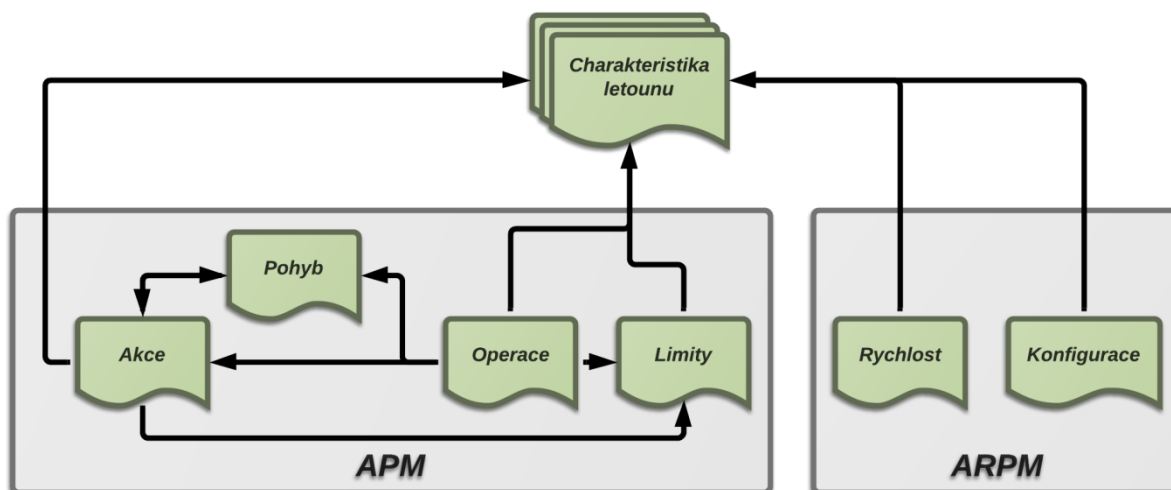
2.1 Co je BADA MODEL?

BADA je zkratkou pro Base of Aircraft Data. Jedná se o databázi parametrů popisujících letouny i prostředí, v němž se pohybují, jakož i způsob, kterým tak činí. Tento model byl poprvé zveřejněn roku 1994 a jedná se o projekt vyvíjený a udržovaný Eurocontrol Experimental Centre (EEC). BADA je používán pro simulace a predikce, ale i modelování a plánování současných ATM výzkumů.

BADA se skládá ze dvou modelů: Aircraft Performance Model (APM) a Airline Procedure Model (ARPM). Tyto modely využívají charakteristiky letounů - soubory fyzikálních parametrů a koeficientů popisující vlastnosti letadel.

BADA APM je kinetický model. Je založený na působení sil na hmotný bod, kde tento má proměnlivou hmotnost v čase. Je tedy nutné modelovat i síly působící na letoun, aby bylo možné zjistit výsledný pohyb. Tento model se dále dělí na čtyři další modely: Akce, Pohyb, Operace a Limity. Struktura BADA modelu je zobrazena v Grafu 1 (4).

Model Akce umožňuje výpočet sil působících na letoun. Jsou zde tři kategorie akcí: aerodynamické (vztlak L a aerodynamický odpor D), pohonné (tah motorů T), a gravitační (váha W). Jelikož BADA počítá s proměnlivou hmotností, kategorie pohonných akcí poskytuje přidružený model sloužící k výpočtu spotřeby paliva F . Matematické modely jsou vyjádřeny polynomiálními výrazy.



Graf 1: Struktura BADA modelu (4)

Model energií používaný v BADA – Total-Energy Model (TEM) souvisí s geometrickými, kinematickými a kinetickými aspekty pohybu letounu, respektive s pohybovým modelem BADA. Tento model umožňuje výpočet výkonů a dráhy letounu. TEM dává do úměrnosti množství práce vykonané na letadle silami na něj působícími a nárůst potenciální a kinetické energie:

$$(T - D)v = W\dot{h} + mv\dot{v} \quad 1.$$

kde h je výška, \dot{h} je vertikální rychlost, v je True Airspeed² (TAS) a m je hmotnost letounu. Pro výpočet lze rovnici 1. upravit na tvar 2., kde je vertikální rychlost vyjádřena takto:

$$\dot{h} = \left(\frac{T-D}{mg}\right) v \cdot \text{ESF} \quad 2.$$

Zde g představuje gravitační zrychlení a ESF je takzvaný Energy Share Factor, definovaný:

$$\text{ESF} = \left(1 + \frac{v}{g} \frac{dv}{dh}\right)^{-1} \quad 3.$$

a změna hmotnosti je zahrnuta modelem spotřeby paliva:

$$\dot{m} = -F \quad 4.$$

Rovnice 2. a 4. Dohromady tvoří soustavu obyčejných diferenciálních rovnic, které lze použít s příslušnými počátečními nebo okrajovými podmínkami v každém letovém segmentu pro výpočet pohybu letounu v tomto intervalu. Výsledná trajektorie je pak výsledkem složeným z řešení těchto jednotlivých segmentů. (4)

Ačkoli systém diferenciálních rovnic zahrnuje všechny možné způsoby pohybu letounu, různé režimy letu mají za výsledky různé trajektorie, vedoucí k specifickým formám ESF. Tyto různé formy rovnic s respektem k režimu letu jsou zachyceny v modelu operací. Jedná se o aspekty nesouvisející přímo se silami či pohybovými zákony, ale nezbytné vzít v potaz při výpočtu trajektorie pohybu letounu vzhledem k režimu letu. (4)

Hypotézy, rovnice a výsledky získané z jiných modelů jsou platné jen v jistých limitech, dokud adekvátně reflektují reálné chování letounů. Model limitů omezuje chování letounu za účelem jeho setrvání v takovýchto podmínkách, omezujíc nebezpečí a degradaci instrumentů. Limitace se opět dělí do čtyř dalších kategorií: geometrické, kinematické, dynamické a environmentální. Geometrické limity obsahují maximální certifikovanou výšku, výškový limit pro manévry atp. Kinematické limity souvisí s rychlostmi. Například maximální provozní rychlost³, „buffet“⁴ v nízkých i vysokých rychlostech, rychlostní limity související s podvozkem a nastavením klapků a rychlosti sloužící k definici letového obalu pro různé manévry. Dynamické limity obsahují omezení tahu motorů a hmotností letounu, například maximální vzletová hmotnost či maximální náklad. Environmentální limity pak souvisí s obálkou prostředí, tedy s oblastí teplot a výšek, ve které je povolen provoz letounu. (5)

ARPM je model letových procedur, používaných v letovém prostoru. Jedná se o rozpis rychlostí, letových hladin, a nastavení letounu, která jsou standardně používána v letovém prostoru. Pojmem „standardně“ je zde míněno: v oblasti výzkumu BADA modelů, tedy ve Francii, jelikož z dat letů na/z těchto letišť byly fáze letu a procedury identifikovány. Tyto procedury se liší v různých

² True Airspeed (TAS) je rychlost vzhledem k mase vzduchu.

³ Maximum operating airspeed/Mach (VMO/MMO) znamená maximální provozní rychlost letounu vzhledem k mase vzduchu. Tato rychlost bývá udávána v uzlech (VMO) nebo v jednotkách Mach (MMO).

⁴ „Buffet“ je vysokofrekvenční nestabilita vznikající při separaci vzduchu za křídlem. Může vznikat při nízkých i vysokých rychlostech, v těch nízkých však vede k dramatickému poklesu vzlaku. (39)

oblastech v závislosti na dominantních přepravních, nemusí tedy vždy odpovídat lokálním podmínkám. (4)

2.2 RODINY BADA MODELŮ

Existují dvě rodiny BADA modelů – rodina 3 a rodina 4. Obě dvě rodiny jsou založeny na stejném přístupu k modelování a mají stejnou strukturu a komponenty, jak bylo již popsáno výše. BADA rodina 3 byla poprvé vyvinuta v roce 1994⁵ a její účel byl poskytnout realistický model výkonnostních parametrů letadel v nominální letové obálce – tedy za standardních letových a provozních podmínek. Návrh bral v potaz zejména dostupnost a kvalitu dat, kterých bylo třeba pro referenci, stejně tak jako dostupných výpočetních prostředků. (4)

Od první verze BADA modelu se však používání výkonnostního modelování značně rozšířilo a stejně tak se i zvýšily požadavky na tyto modely, zejména týkající se pokročilých nástrojů na podporu řízení letového provozu a na pokročilé simulace. Nové požadavky se vztahují k přesnosti modelovaných parametrů, pokrytí celé letové obálky, možnost reprezentace všech fází letu a typy operací, které modely mohou podporovat. Moderní optimalizační nástroje stejně jako dnes dostupná vysoce kvalitní data byla použita na ověření schopnosti BADA 3 modelu postihnout výkonnostní parametry letounu v celé letové obálce a na zjištění přesnosti s jakou jsou tyto parametry poskytovány. Tato studie potvrdila, že BADA 3 model se svým matematickým základem není schopen dostatečně přesně modelovat parametry v celé letové obálce. (4)

Toto zjištění bylo hnacím motorem pro vývoj rodiny BADA 4 s cílem přesně modelovat chování letounu v celé letové obálce, postihující všechny fáze letu a ve všech různých konfiguracích. Zatímco při vývoji BADA 3 byl brán v potaz nedostatek vysoce kvalitních referenčních dat a požadavkem na jednoduchost výpočetních algoritmů modelu vzhledem k velmi omezeným výpočetním prostředkům, při vývoji BADA 4 byla současná dostupnost těchto vysoce kvalitních dat stejně jako podstatně pokročilejších výpočetních prostředků. Modelová rodina BADA 4 byla založena na analýze fyzikálních zákonů řídících chování letounů a identifikaci fyzikálních proměnných, které by měly chování letounu reprezentovat. (4)

Použití přesných fyzikálních závislostí a výběr adekvátních matematických modelů poskytuje vyšší přesnost modelů. Fyzikální závislosti v BADA 4 jsou vyjádřeny jako bezrozměrné parametry, využívajíc ten fakt, že bezrozměrné vztahy zjednodušují analýzu, porovnání a snižují chybovost. Dále umožňují objevování fyzikálních souvislostí za podmínky správného výběru bezrozměrných výrazů. Je však nutné zdůraznit, že pro správnou identifikaci parametrů konkrétního letounu je zapotřebí vysoce kvalitních referenčních dat pokrývajících celou letovou obálku. V opačném případě BADA 4 nemůže pokročilé možnosti a vysokou přesnost modelů poskytnout. (4)

Zde je nutné podotknout, že veškeré informace o modelové rodině BADA 4 pocházejí od skupiny, která jej vytváří pod záštitou úřadu EUROCONTROL. Dle těchto informací měl být BADA 4 vypuštěn na světlo veřejnosti již v roce 2011, nicméně tak se ještě nestalo. Co se týče počtu modelovaných letadel, BADA 4 model byl ověřen na 25 typech letounů. (4)

⁵ V té době to ovšem byla revize 2.1. Poprvé se na prvním místě objevila číslice 3 v roce 1998, v návaznosti na o rok starší revizi 2.6.

2.3 POPIS A STRUKTURA BADA 3.10

BADA je skupina souborů ve znakové sadě ASCII, které specifikují výkonnostní operační parametry a parametry letových procedur pro, v současné verzi 3.10, 399 různých typů letounů. Reference k těmto letounům mohou být dvou typů. Za prvé se jedná o letouny přímo podporované, také nazývané originálními modely, takovýchto letounů je v současné verzi 127. Případ druhý se týká letounů, které sice přímo podporované nejsou, nicméně vzhledem k výkonnostním charakteristikám jednoho každého letounu je tento považován za ekvivalentní některému letounu z množiny přímo podporovaných. Tyto letouny se nazývají synonymními, přičemž letounů patřících do této kategorie je v současné revizi BADA 272 typů. Každý typ letounu je jednoznačně identifikován čtyřmístným kódem přiděleným úřadem pro civilní letectví – International Civil Aviation Organisation (ICAO). V souboru těchto kódů jsou stranou stojící tři kódy patřící skupinám vojenských bojových letounů, jedná se o kódy FGTH, FGTL a FGTN. (6)

Rodina BADA 3 se dle zdroje (6), manuálu BADA modelu revize 3.10, dělí na takzvaný Operations Performance Model (OPM) a Airline Procedure Model (ARPM). Přičemž OPM se dělí na deset dalších podsekcí reprezentujících již konkrétní fyzikální modely. ARPM zde opět definuje standardní letové procedury.

Operations Performance Model se dále dělí na následující podsekcce, které budou dále stručně popsány: *model atmosféry, Total-Energy Model, typ letounu, hmotnost, letová obálka, aerodynamika, tah motorů, redukovaný výkon, spotřeba paliva a pohyb na zemi.*

Model atmosféry, založen na modelu International Standard Atmosphere (ISA⁶), obsahuje definice, konstanty a výrazy popisující vlastnosti atmosféry jako jsou tlak, teplota, hustota vzduchu a rychlost zvuku. Tyto výrazy nutné pro správný výpočet pohybu letounu jsou vyjádřeny jako funkce výšky. Další výrazy, které jsou obsaženy v tomto modelu, jsou konverze mezi rychlostmi CAS⁷, TAS a Mach. Model atmosféry definuje standardní ISA podmínky (teplotu, tlak, hustotu vzduchu a rychlost zvuku) i atmosférické podmínky ISA (teplotní či tlakový diferenciál při střední hladině moře). Slovem standardní je zde míněn fakt, že model platí pro ISA atmosféru, zatímco slovem atmosférický jsou označeny non-ISA podmínky. Dále model definuje standardní střední a střední výšku moře a tropopauzu⁸, výrazy určující teplotu, tlak a hustotu vzduchu, a rychlost zvuku. Konečně jsou definovány konverze mezi CAS a TAS, TAS a Mach, a výška přechodu Mach/CAS⁹. (6)

Total-Energy Model pokládá rovnost mezi množstvím práce, způsobeným silami působícími na letoun a změnou kinetické a potenciální energie. Dále jsou popsány tři možné situace, vždy zahrnující dvě veličiny řízené a jednu zbývající dopočítanou. Jedná se o rychlost, výkon motorů a rychlost stoupání či klesání – Rate of Climb and Descent (ROCD). Model obsahuje potřebné výrazy pro výpočet v některých běžných letových podmínkách, konkrétně bývá často počítán ROCD. Dále jsou obsaženy výrazy pro některé letové podmínky nad a pod tropopauzou. (6)

⁶ Podmínky ISA jsou $t = 15^{\circ}\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPA}$, 0% vlhkost vzduchu.

⁷ CAS neboli Calibrated airspeed je rychlost indikovaná na instrumentech letounu. Tato se shoduje s TAS pouze při letu na hladině moře za ISA podmínek. Pokud je bezvětří, je také shodná s Ground Speed (GS) (40).

⁸ Tropopauza je hranice mezi troposférou (pod hranicí) a stratosférou (nad hranicí). Výška se pohybuje okolo 11000 metrů nad mořem.

⁹ Výška, ve které rychlosti CAS a Mach reprezentují stejnou hodnotu TAS. (6)

Následujících osm podsekcí se věnuje jednotlivě každému typu letounu. Typ letounu určují tři hodnoty – počet motorů, jejich typ (tryskový, vrtulový, turbovrtulový) a turbulentní kategorie (light, medium, heavy, jumbo). Hmotnost pak sestává ze čtyř různých hmotností udaných v tunách – maximální, minimální, referenční, a maximální hmotnost nákladu. Letová obálka obsahuje maximální a minimální rychlosti v závislosti na konfiguraci klapek letounu a maximální výšku. Aerodynamika obsahuje výrazy pro aerodynamický odpor pro různé konfigurace letounu a pro tryskové letouny i spodní limit pro nestability zvané buffeting. Tah motorů se v BADA rodině 3 dělí na tři různé úrovně – vzlet a maximální stoupání, klesání, a dále maximální tah za letu (v současnosti je to jen pro všechny letouny stejnou konstantou vynásobený tah pro vzlet a maximální stoupání). Tyto hodnoty jsou ještě vždy váženy koeficienty souvisejícími s danou konfigurací letounu. Redukovaný výkon souvisí se současným trendem nepoužívat maximální výkon při stoupání za účelem delší životnosti motorů. Jedná se o soubor korekčních členů, jejichž použitím se profil stoupání bude shodovat s daty realistickými, v realitě naměřenými, na rozdíl od dat v letovém manuálu. Podsekce spotřeby paliva obsahuje výrazy určující spotřebu v závislosti na typu motoru a na letové fázi – rozlišují se let, minimální a nominální tok paliva, kde nominální je použit pro všechny fáze kromě klesání a kromě letu. Konečně, pohyb na zemi je definován délkami vzletu a přistání i délkou a rozpětím křídel letounu. (6)

V modelu ARPM jsou obsaženy rozpisy rychlostí pro tři různé fáze letu – stoupání, let a klesání. V každé fázi letu se tato ještě dělí dle typu pohonu letounu, tedy na tryskové, turbovrtulové a vrtulové letouny. Uživatelé BADA modelů samozřejmě mohou tyto rozpisy upravovat dle dominantních aerolinek v jejich konkrétní oblasti. (6)

Dále se v BADA 3 nachází takzvané globální parametry letounů – Global Aircraft Parameters. Jsou to parametry z předchozích dvou modelů (OPM a ARPM), které jsou obecně platné pro všechny typy, případně větší skupinu typů letounů. Mezi tyto parametry patří: maximální zrychlení, úhly náklonu (v podélné ose), maximální klesání (expedited descent), faktory tahu motorů, výškové ohraničení povolených konfigurací fází letu, koeficienty minimálních rychlostí, rozpisy rychlostí, udržovací rychlosti, pozemní rychlosti a koeficient redukovaného výkonu. Podrobnější popis lze nalézt v (6).

2.4 APLIKACE BADA MODELŮ

V současné revizi zahrnuje BADA model rodiny 3 téměř 400 typů letounů, čímž pokrývá více než 99% evropské vzdušné flotily. Tento fakt je následkem prudkého nárůstu modelovacích a simulačních nástrojů podporujících validace a testy nových konceptů ATM, procedur ATC, podpůrných nástrojů pro pokročilé rozhodování dispečerů a nového vybavení. Tyto nástroje lze rozdělit na tři skupiny: matematické modely, platformy simulací v reálném čase a simulací ve zrychleném čase. (4)

Jedním příkladem, patřícím mezi platformy simulací v reálném čase, může být simulátor ESCAPE – Eurocontrol Simulation Capability and Platform for Experimentation. ESCAPE je velká simulace ATM, zahrnující 45 míst pro dispečery, 50 pozic pro piloty, která může navigovat až 250 letounů najednou. Její součástí jsou i komunikace mezi piloty a dispečery. Na tomto simulátoru bylo provedeno několik simulací ověřujících a doladujících BADA model, dohromady zpracovávajících data z více než 12000 letů z a do několika evropských letišť (Ženeva, Paříž a její okolí). (7)

Příkladem hovořícím za simulace ve zrychleném čase, používajícím BADA, může být simulátor AgentFly, pocházející ze skupiny ATG Fakulty elektrotechnické při ČVUT. Jedná se o distribuovanou, multiagentní, škálovatelnou simulaci podporující princip volného letu a fungující na platformě \mathcal{A} -globe. \mathcal{A} -globe je platforma, která je škálovatelná vzhledem k počtu simulovaných letounů – agentů, poskytuje maximální rychlost simulace a vysokou přesnost vzhledem k fyzikálním zákonům. (8)

2.5 SHRNUÍ

V této kapitole byl představen BADA model jakožto databáze parametrů popisující letouny a způsob jejich pohybu v prostředí, které je také předmětem popisu této databáze. Zkratka BADA znamená Base of Aircraft Data. Nejprve byl popsán Aircraft Performance Model jakožto kinetický model rozdělený do čtyř různých modelů, nazývajících se postupně: Akce, Pohyb, Operace a Limity. Byl představen model energií Total-Energy Model, který je klíčovým principem BADA modelu. Dále byly zmíněny limitace, v rámci kterých je BADA model používán, a model letových procedur Airline Procedure Model.

BADA se dělí na dvě rodiny, 3 a 4, jejichž rozdíly byly také popsány v této kapitole. Krátkým shrnutím těchto rozdílů je fakt, že BADA 3 je starší, méně výpočetně náročný, avšak méně přesný model, který poskytuje data v menším spektru parametrů označovaných jako letová obálka. Na druhou stranu je však již poměrně rozšířený a modeluje 399 letounů, které představují více než 99% veškerého letového provozu v Evropě. BADA 4 oproti tomu poskytuje přesnější data v celém spektru parametrů, je mladší, výpočetně náročnější a závislý na přesnějších datech. Prozatím byl testován na 25 letounech.

Dále je popsána rodina 3 BADA modelu a její aplikace. Nejprve je řečeno, kolik typů letounů je podporováno a jakým způsobem. Je stručně popsán Operations Performance Model a jednotlivé modely, ze kterých sestává, stejně jako ARPM a globální parametry letounů. Na závěr kapitoly je popsán způsob simulace BADA modelů v současnosti na simulátoru ESCAPE a na platformě \mathcal{A} -globe.

3 JINÉ MODELY

Kromě BADA modelů existují samozřejmě i jiné modely, jejichž stručným popisem se zabývá tato kapitola. Nejprve je představen GAME model, následován modelem z laboratoří MIT. Třetí je představen PIANO model a na čtvrtém místě je systém Look-up table. Kapitola je uzavřena systémem INFLT/Report.

3.1 GAME MODEL

Model GAME, vzniklý v roce 1998 jako vylepšení modelu EROCOA/PARZOC ze 70. let, je dalším z projektů organizace pro bezpečnou leteckou přepravu EUROCONTROL. Model začal jako pokus o tvorbu centralizované databáze výkonnostních modelů letounů používajících jak přístup Total-Energy modelu, tedy kinetický, tak i přístup kinematický, modelující trajektorii letounu parametricky bez vazby na fyzikální pozadí. Důvod pro vznik modelu GAME je prozaický – modely používající 6 stupňů volnosti jsou sice velmi přesné, ale v ten samý moment velmi drahé a výpočetně náročné. (9)

General Aircraft Modelling Environment neboli zkráceně GAME je jednak databáze obsahující parametry pro různé modely, ale i soubor nástrojů umožňujících tvorbu a optimalizaci modelů letounů, jakož i porovnávání jejich relativních výhod ve vztahu ke konkrétnímu účelu. Primární charakteristiky profilu letové trajektorie, jako jsou vertikální rychlost a tok paliva v různých fázích letu a pro různé konfigurace letounu, jsou modelovány a validovány přímo z referenčních dat poskytnutých výrobcem letounu. „Druhotné“ charakteristiky, jako jsou odhady zrychlení, jsou počítány z těchto primárních charakteristik. Tento přístup poskytuje dostatečně přesný model bez dalších ověřovacích kroků, zároveň dostatečně jednoduchý na to, aby byl do vysoké míry automatizovaný. Další výhodou GAME je, že poskytuje model v celé letové obálce, avšak pouze pro 28 typů letounů. Nové typy jsou však možné dodat pouhým připojením linku k nové knihovně beze ztráty přesnosti. (9) (10)

3.2 MIT MODEL

MIT model staví na jiném modelu, konkrétně na takzvaném Integrated Noise Modelu (INM), který byl využíván americkým úřadem pro bezpečné letectví Federal Aviation Administration od roku 1978. Tento model má za úkol předpovídat množství hluku poblíž letišť. Vznikl v době, kdy se doručování zásilek přes noc stalo velmi populárním ve Spojených Státech, a hluk letadel byl oproti prostředí v obydlených oblastech velmi výrazný. Na MIT byl v roce 1999 tento model revidován a byly upraveny výrazy pro výpočet veličin, které jsou podstatné i z hlediska modelování trajektorie.

Součástí tohoto modelu je zejména model atmosféry a určení TAS, dále model tahu při vzletu, stoupání a letu na hladině. Nakonec samozřejmě modely kontur zvuku. Co se vylepšených týče, konkrétně se jedná o výpočet rychlosti vzduchu (TAS), kde byla oproti předchozímu stavu vzata v potaz stlačitelnost vzduchu při rychlostech vyšších než 0,3 Mach a také při vyšších výškách (kde rozdíl byl patrný již při výšce 10 000 stop). Dále nabízí MIT kvadratický model tahu letounu, používaný při vzletu a stoupání, dva modely pro let (minimální tah/vztlak) beroucí ohled na standardní operační podmínky letounu při letu ve stejné výšce. Nakonec jsou uvedeny ještě korekční faktory úhlu stoupání vzhledem k rychlosti a vzhledem k letové výšce. Za zmínku stojí, že stlačitelnost vzduchu ve

vyšších rychlostech a vyšších výškách je postihnuta v BADA modelu rodiny 4, avšak v rodině 3 tento fakt postihnutý není. (11)

3.3 PIANO MODEL

PIANO model je komerčně vyráběným a distribuovaným projektem. Jedná se o velmi detailní model, co se do aerodynamických charakteristik letounu týče – tyto charakteristiky mohou být vzaty z databáze, jež čítá cca 280 různých typů letounů. Uživatel však není limitován pouze na databázi, ale může si letadlo namodelovat od začátku do konce. Dlužno však podotknout, že modely jsou velmi detailní a vyžadují více informací, než je standardně dostupných pro kohokoli kromě samotného výrobce letounu. Mimo jiné je součástí PIANO i model motorů. Ačkoli relativně rigidní, poskytuje informace o spotřebě paliva a lze počítat i charakteristiky jako je například cena provozu. Pro let PIANO používá model sil působících na letoun pro výpočet letových charakteristik během různých letových fází. Tento přístup je pružnější a přesnější než v případě BADA modelu, ačkoli je také podstatně výpočetně náročnější. (12) (13)

3.4 LOOK-UP TABLE

Look-up table je široce používaný kinematický model predikce letového profilu a zároveň nejstarší vyvinutý přístup popisu parametrů letadel. Funguje na principu výškových pásem, která obsahují data průměrných rychlostí horizontálních i vertikálních, a to pro stoupání, klesání i udržování výšky zvlášť. Jelikož se jedná o průměrná data, nesou s sebou tabulková data jistá omezení i výhody. Co se omezení týče, není dost dobře možné modelovat nestandardní letové podmínky, například povětrnostní. Dále je nutné podotknout, že přesnost těchto tabulek je velmi limitovaná. Na druhou stranu je však vyhledávání v tabulce extrémně triviální a výpočetně nenáročné. Nenáročnost se vztahuje i na potřebu dat – v podstatě stačí vyčtené hodnoty z radaru. (10)

3.5 BOEING INFLT A REPORT

Systémy INFLT a REPORT jsou programy vyvinuté společností Boeing. Ačkoli se jedná o dva programy, byly vyvinuté k společnému použití. Úkolem programu INFLT je generování výkonnostních letových dat na základě požadovaných parametrů letounu a parametrů letu. Specifické parametry letounu jsou vybrány referencí na databázi, která obsahuje různé konfigurace trupů a motorů, stejně jako dalších parametrů. Tato databáze je dodávána přímo se softwarem, a jelikož se jedná o software firmy Boeing, obsahuje pouze data související s letouny této společnosti. Parametry letu zadává do programu uživatel – má na výběr ze šesti možností, které lze libovolně kombinovat. Jedná se o tyto možnosti: stoupání, let/udržování výšky, driftdown¹⁰, optimální výšku, klesání a plánování letu. Druhý program zvaný REPORT slouží ke generování čitelných zpráv z výstupů programu INFLT. Jedná se o to, že výstupem INFLT jsou jen a pouze binární data – REPORT je zpracovává do čitelné podoby a generuje požadovaný výstup jednak v závislosti na konfiguraci INFLT (je možné zpracovávat jen data, která byla skutečně vygenerována) a na specifické konfiguraci pro generování tohoto výstupu. Jde například o konverze jednotek či zpracování chyb. (14)

3.6 SHRUTÍ

Kapitola „Jiné modely“ popisuje přístupy k modelování parametrů nebo trajektorií letadel využitelných pro řízení letového provozu. Jako první je představen model GAME, který kinematickým

¹⁰ Driftdown je kontrolované klesání na udržitelnou letovou hladinu – příčinou může být nefunkční motor.

způsobem modeluje trajektorii letu. Jedná se o čistě matematický model, obsahující zhruba 100 funkcí, pomocí kterých je schopen namodelovat dráhu pro 28 různých typů letadel. Jako druhý v pořadí byl představen model vzniklý na MIT, který slouží k modelování hluku letounů – zejména v okolí letišť. Tento sestává z několika různých modelů zejména pro rychlost TAS, tah, a fáze stoupání. Následuje model PIANO, který slouží pro velmi přesné modelování aerodynamických parametrů letounů a v současnosti podporuje 280 různých typů letounů. Look-up table je představen jako tabulka rozdělená na několik pásem dle letové hladiny, kde pro každé pásmo jsou z průměrných charakteristik určeny střední parametry. Na závěr byla popsána dvojice programů INFLT a REPORT, používaných a vyvinutých společností Boeing. Tyto programy generují výkonnostní charakteristiky letounů a tvoří zprávy dle zadaných parametrů.

4 MODELOVÁNÍ MALÝCH CIVILNÍCH LETOUNŮ

Tato kapitola je věnována malým civilním letounům a jejich modelování prostřednictvím výkonnostních charakteristik APM. Nejprve je definován pojem malých civilních letounů, vzápětí jsou probrány modely a jejich vhodnost použití pro tyto letouny. Na závěr je více do detailu rozebrán BADA model i s popisem nedostatků tohoto modelu.

4.1 ROZDÍLY MEZI MODELOVÁNÍM MALÝCH CIVILNÍCH LETOUNŮ A BĚŽNÝCH DOPRAVNÍCH LETOUNŮ

První otázka ohledně malých civilních letounů směřuje k jejich definici a k odlišnosti od ostatních kategorií letounů. V současnosti existuje několik kategorií letounů uznávaných v rámci 44 členských států konference pro civilní letectví The European Civil Aviation Conference (ECAC). Tato organizace byla založena organizací pro civilní letectví ICAO za účelem rozvoje udržitelné, bezpečné a efektivní letecké přepravy a přepravních nařízení v rámci členských států stejně jako jejich promoci ve zbytku světa. (15) Kategorie letounů dle ICAO se dělí dle hmotnosti do čtyř kategorií, jak je uvedeno v Tabulce 1. (16) Hmotnost je však až druhotná, jelikož „Wake Turbulence Category - WTC“ je odvislá od tvorby turbulencí, které však souvisí i s hmotností letounu.

WTC (Wake Turbulence Category)	Hmotnost (MTOW)
Light aircraft	Do 7 000 kg
Medium aircraft	7 001 kg – 136 000 kg
Heavy aircraft	136 001 kg a více
Super Heavy aircraft	Airbus A380 (560 000 kg)

Tabulka 1: Hmotnostní kategorie letounů

Lehké letouny jsou tedy ty s maximální vzletovou hmotností (MTOW) do a včetně 7 000 kg. Většinou se jedná o letouny vyhlídkové či o letouny pro přepravu malého zboží v nedostupných oblastech nebo na tahání transparentů. Také jsou používány jako osobní manažerské dopravní letouny a pro výuku v pilotní škole.

Lehké letouny jsou nepřímo omezena i spodní hranicí, avšak zde je situace komplikovanější, jelikož tato hranice je závislá na oblasti, respektive na organizaci, která v dané oblasti působí. Kromě ICAO a její již zmíněné odnože ECAC ještě v Evropě působí takzvaná Joint Aviation Authorities, což je těleso přidružené k ECAC a definující ultralighty jako letouny s ne více než dvěma místy, maximální vzdušnou (stall) rychlostí CAS do 35 uzlů a hmotností MTOW pohybující se od 300 kg do 495 kg v závislosti na počtu sedadel a tom, jestli je letoun uzpůsoben pro přistání na zemi či na vodě. Pro dvousedadlový pozemní letoun je hmotnost nastavena na 450 kg.

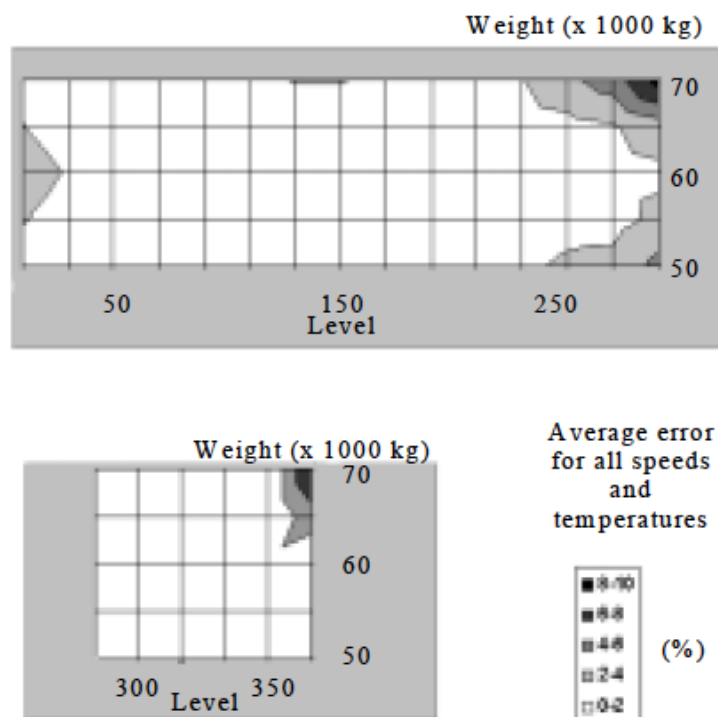
Běžné dopravní letouny, které jsou nejvíce frekventované a na kterých je také modelování nejlépe postaveno, mohou vážit kolem 65000 až 95000 kg MTOW. (MD82 s 67 800 kg, B737 s cca 62 000 až 85 000 kg dle verze, a A320 s 68 000 až 93 000 kg dle verze) Letouny těžké kategorie se pochopitelně pohybují ještě výš a na vrcholku pomyslného hmotnostního žebříčku stojí Airbus A380 vážící téměř 600 000 kg při vzletu. Jak napovídá intuice, nejvíce detailních dat je k dispozici pro nejvíce létající letouny, tedy pro ty patřící do střední a těžké kategorie.

4.2 VHDNÉ MODELY PRO MALÉ CIVILNÍ LETOUNY

Co se vhodnosti různých modelů pro malé civilní letouny týče, má smysl pro každý model položit a zodpovědět následující dotazy: Je model vhodný pro malé civilní letouny? Je vhodný i pro modelování jiných letounů? Je dostatečně přesný? Poskytuje informace v celé letové obálce? Je finančně dostupný? Obsahuje a zaručuje aktuální informace? Je výpočetně náročný? Z odpovědi na tyto dotazy by měl vyplynout nejhodnější model.

4.2.1 GAME MODEL

Model GAME, založený na kinematickém přístupu modelování trajektorií by byl vhodný pro malé civilní letouny za předpokladu, že by tyto letouny modeloval. V současnosti je dostupný pro 28 typů letounů, obsahující především často létající dopravní letouny Airbus a Boeing, jak je uvedeno v (10). Ten samý zdroj přesnost tohoto modelu ilustruje (Fig. 1) na příkladu průměrné chyby rychlosti stoupání v celém praktickém intervalu vzletových hmotností, rychlostí stoupání a teplotních profilech mezi ISA-15 a ISA+15. Data – v prvním případě udržování konstantní CAS a ve druhém konstantní Mach - byla porovnáována s údaji výrobce.



Obrázek 1: Chyba rychlosti stoupání v celé letové obálce (10)

Jelikož je model GAME projektem EUROCONTROL, finanční náklady na jeho pořízení by měly být stejné jako u BADA, tedy bezplatné. Co se týče přístupu k informacím, je zde situace podstatně odlišná, informace ke GAME nejsou dobře dostupné ani na stránce EUROCONTROL. Výpočetní náročnost tohoto modelu je však velmi nízká a díky struktuře je velmi jednoduché i přidávání nových letounů. (10) V této podobě však není GAME pro lehké civilní letouny použitelný.

4.2.2 MIT MODEL

Model MIT se nezdá být vhodný pro potřeby modelování výkonnostních parametrů letounů, ať již jakékoli kategorie. Důvodem je jednak absence modelu spotřeby paliva i většího důrazu na letovou

obálku. Dá se tedy říci, že z pohledu ATM je nekompletní, což ovšem není překvapující s ohledem na to, že tyto aplikace nejsou jeho účelem. Pro úplnost je vhodné doplnit, že tento model je bezplatný a ty parametry, které modeluje, jsou modelovány poměrně přesně. (11) Tento model tedy také není pro modelování lehkých civilních letounů vhodný.

4.2.3 PIANO MODEL

Co se týče PIANO modelu, zde se situace zdá být zajímavější. Model je velmi přesný, co se aerodynamiky týče, a zároveň vhodný pro více flexibilní aplikace, což se zdá být krokem vstříc lehkým letounům také (13). PIANO je aplikovatelný na malé civilní letouny stejně tak jako na letouny běžné v letecké dopravě – celkem má v databázi 280 typů letounů. Model je přesnější než BADA (12) (13), avšak jestli poskytuje data v celé obálce, není jisté. Informace jsou v tento moment aktuální, nicméně toto bude zcela jistě odvislé od komerčního úspěchu firmy Lissys, která jej vyvinula. Co se týče dat, tento model požaduje velmi kvalitní a přesná data, co se týče požadavků finančních na koupi tohoto produktu, jeho cena se pohybuje kolem 90 000 GBP pro licenci do 10ti uživatelů. Dále je tento model velmi výpočetně náročný. (13) Ačkoli by model PIANO mohl být pro lehké civilní letouny vhodný, jeho finanční nároky jsou daleko mimo rozsah této práce.

4.2.4 LOOK-UP TABLE

Model Look-up table se zdá být nevhodným pro lehké letouny. Důvodem pro tuto nevhodnost je proces generace dat pro tuto tabulku – parametry pro specifický rozsah letových hladin jsou vždy průměry ze všech letů, a tyto jsou opět hlavně lety dopravními. Je logické se domnívat, že lehké letouny se svými charakteristikami se těmito průměry budou přibližovat jen těžko. Meteorologická data nejsou brána v potaz a v nízkých výškách a nízkých rychlostech byla zaznamenána značná chybovost. Pro často létající dopravní letouny je tabulkový model více vhodný, opět však pouze pro prvotní přiblížení. Z principu tento model sice může poskytovat informace v celé letové obálce, avšak jen velmi nepřesné a se zvyšujícím se rozdílem mezi konkrétními parametry a těmi průměrnými roste i chyba. Tyto tabulky jsou výpočetně absolutně nenáročné a pravděpodobně i finančně. Aktualita informací je zde poměrně irelevantní vzhledem k jejich průměrování. (10) Tento model je tedy nevhodný pro aplikace související s lehkými civilními letouny.

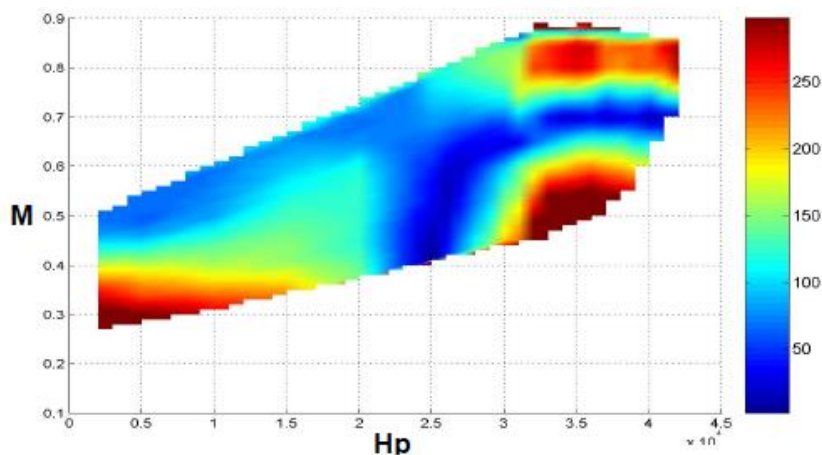
4.2.5 INFLTA REPORT

Dále, programy INFLTA a REPORT jsou pro malé civilní letouny v podstatě nepoužitelné už jen z toho důvodu, že souvisí pouze s letouny Boeing. Použitelnost pro ostatní typy letounů opět souvisí s tím, jestli je výrobcem Boeing či jiná firma. Co se týče odpovědi na další dotazy – tyto jsou irelevantní vzhledem k tomu, že lehké civilní letouny jsou jinou kategorií. Tento model tedy pro použití také není vhodný.

4.2.6 BADA MODEL

BADA modely nabízejí řešení spočívající v kinetickém modelování založeném na principu energetického modelu. V současné verzi BADA 3.10 je modelováno 399 typů letounů, z nichž 161 spadá do kategorie lehkých. Přesnost modelu je v operační letové obálce zaručena s jistou tolerancí chyb, ve které by se data měla pohybovat. Konkrétněji lze zmínit například střední RMS chybu ve vertikální rychlosti. Za normálních operačních podmínek je tato u BADA 3 rovna nebo menší než 100 fpm (stop/min), což odpovídá 5% chybě za předpokladu, že standardní hodnota vertikální rychlosti je 2 000 fpm. Za stejných podmínek je modelována spotřeba paliva také s menší než 5%-ní chybou. (4) Chyba v určení výšky je zobrazena na grafu 2 (5), kde M představuje rychlost Mach, Hp je

geopotenciální tlak a barva označuje chybu rozdílu rychlosti ve fpm. Data byla naměřena za podmínek ISA+15 s letounem typu Boeing 777-300. Dle (17) je model BADA 3 schopen poskytovat data o chybě vertikální rychlosti s menší než 100 fpm chybou a o toku paliva s menší než 5%ní chybou ve standardní letové obálce, ve které létají letečtí dopravci. Bere v úvahu rychlosti v celém spektru od nízkých až po vysoké (opět v rámci provozu přepravců) a hmotnosti od minimálních až po maximální. Toto za atmosférických podmínek mezi ISA+0 a ISA+20.



Obrázek 2: Absolutní chyba výšky h [fpm] pro BADA 3.x (5)

Jelikož je model dodáváný a spravovaný úřadem pro bezpečnou leteckou přepravu EUROCONTROL, lze předpokládat, že tento model bude i nadále poskytován na nekomerční bázi a také že bude úřadem pravidelně udržován. BADA 3 byl navržen s ohledem na nízkou výpočetní náročnost. Dále, ačkoli je BADA 3 omezen na jisté operační podmínky letové obálky, BADA 4, který by měl poskytovat kvalitní data v celé letové obálce je založen na stejném principu a má naprosto identickou strukturu. Dá se tedy předpokládat, že v momentě, kdy bude dostupný pro dostatečné množství letounů, bude jednoduché tyto modely zaměnit, padne-li takovéto rozhodnutí. Z výše uvedených skutečností lze říci, že BADA 3 se zdá býti nejvhodnějším modelem pro malé civilní letouny, ještě vhodnějším pak pro střední a těžké typy letounů.

Dotaz	GAME	MIT	PIANO	Look-up	INFLT a REPOR T	BADA
Je model vhodný pro malé civilní letouny?	ne	ne	ano	ne	ne	ano
Je vhodný i pro modelování jiných letounů?	ano	ne	ano	ne	ano	ano
Je dostatečně přesný?	ano	n/a	ano	ne	n/a	ano
Poskytuje informace v celé letové obálce?	ano	n/a	n/a	ano	n/a	ne
Je finančně dostupný?	ano	ano	ne	n/a	n/a	ano
Obsahuje a zaručuje aktuální informace?	ano	n/a	ano	ne	n/a	ano
Je výpočetně náročný?	ne	n/a	ano	ne	n/a	ne
Vhodný?	ne	ne	ne	ne	ne	ano

Tabulka 2: Porovnání vhodnosti modelů pro malé civilní letouny

V Tabulce 2 jsou shrnuty odpovědi na pokládané dotazy i s výsledkem, který z toho vyplývá. Pro účel malých civilních letounů se kromě BADA modelu nehodí žádný jiný, proto bude dále přistoupeno k podrobnějšímu rozboru tohoto modelu pro účel modelování těchto letounů. Konkrétně se autor zaměří na nedostatky BADA modelu.

4.3 NEDOSTATKY BADA MODELU PŘI MODELOVÁNÍ MALÝCH CIVILNÍCH LETOUNŮ

Pro důkladné ověření BADA modelu 3.10 na malých civilních letounech je důležité nejprve ověřit platnost a přesnost BADA modelu pro letouny různých váhových kategorií. Po konzultaci se soupisem modelovaných letadel je patrné, že nejmenší typ přímo podporovaného letounu je Piper Cherokee P28A, jehož MTOW je 975 kg. Největší podporovaný typ je pak Airbus A380 a všech dalších 397 typů letounů spadá mezi ně.

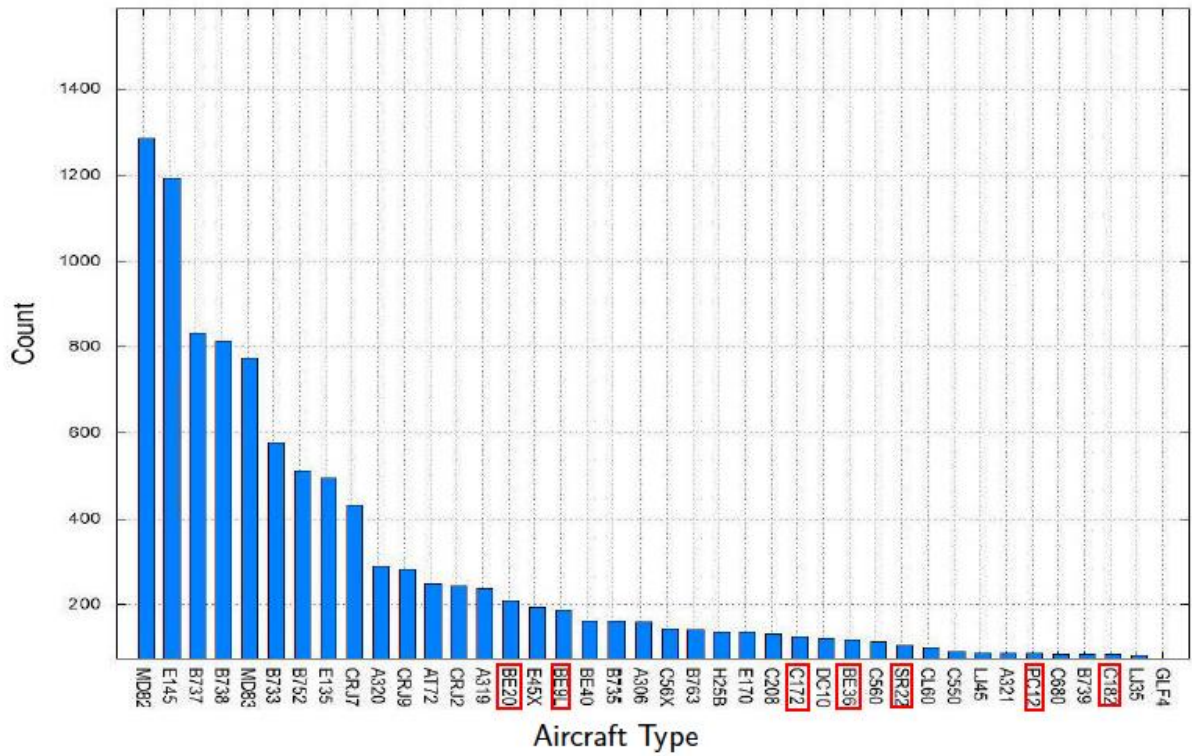
Pro určení aplikovatelnosti BADA modelu je nutné zjistit, pro jakou nejmenší vzletovou hmotnost model platí. Jak je uvedeno v (18), EUROCONTROL považuje skupinu lehkých letounů v intervalu od nulové hmotnosti až do 7 tun, jak určuje ICAO. Separátní existence ultralightů jako samostatné kategorie letounů není brána v potaz. Vzhledem k nepřímo úměrnému vlivu větru na hmotnost letounu však autor, až do ověření výsledků na odpovídajících letounech, považuje jako spodní hranici BADA modelu 495 kg, tedy horní mez hmotnosti pro letouny typu ultralight. Pro platnost dat pro ty nejmenší letouny z kategorie lehkých, konkrétně Piper P28A, lze nahlédnout do manuálu pro identifikaci parametrů přímo podporovaných letounů. (18)

Nedostatkem BADA modelu spojeným s modelováním malých civilních letounů specificky, je neúplnost dat jednotlivých modelů. Konkrétně se jedná o maximální standardní výšku, tedy výšku v jaké je letadlo standardně provozované. Po nalezení zmínky na toto téma v (19) byla provedena kontrola s výsledkem, že pro téměř 90% (144 ze 161) všech typů lehkých letounů je k dispozici pouze maximální operační výška, která v praxi není dosahována.

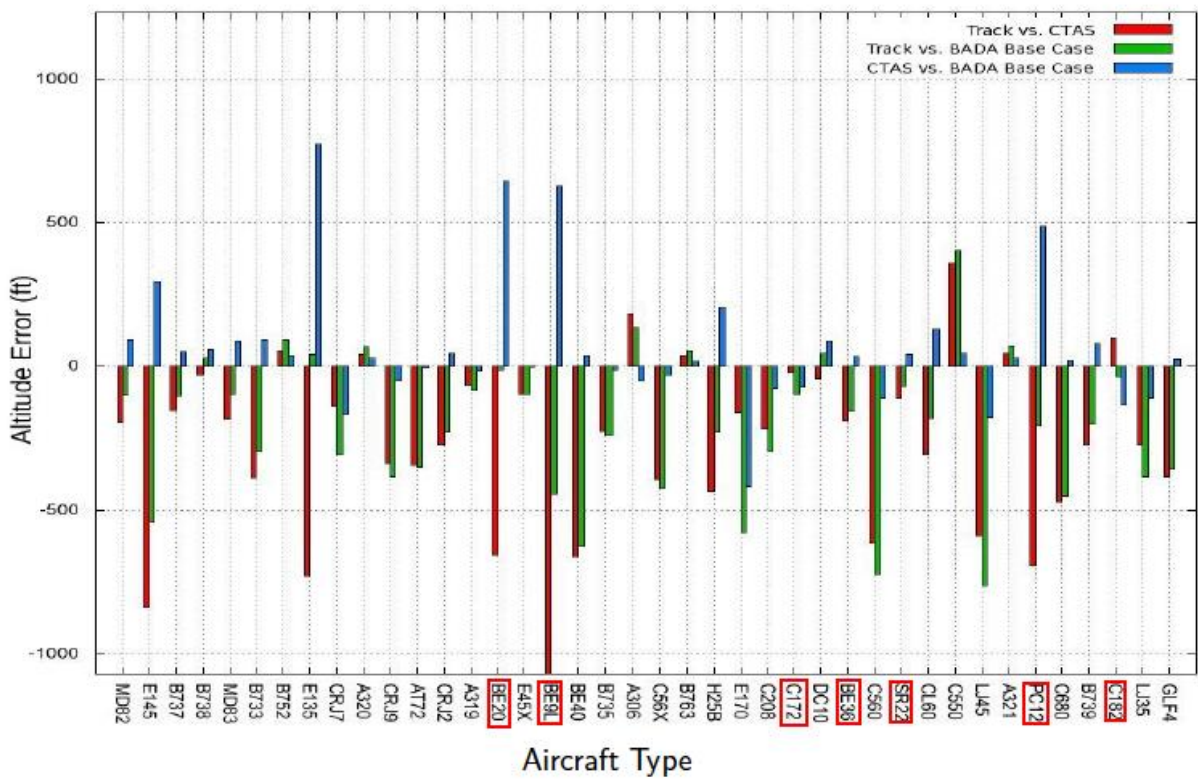
Stlačitelnost vzduchu ve vyšších výškách a při vyšších rychlostech jsou také parametry, které BADA rodiny 3 nezná. Jedná se zhruba o 10 000 stop a 0,3 Mach jako hranice, nad nimiž již zmíněné efekty nejsou zanedbatelné. Zde je ovšem třeba podotknout, že tato omezení se týkají jen letounů, které jsou běžně provozovány nad alespoň jednou z těchto hranic. V BADA 4, který by měl být vypuštěn do letecké obce v momentě, kdy se vyjednájí podmínky tohoto vypuštění, model již počítá s kompletní letovou obálkou, která rozšiřuje působnost modelu na rozdíl od té nominální v případě BADA 3. Poslední výtka k modelu BADA 3 směřuje na absenci modelování vlivu větru, který je právě pro malé civilní letouny podstatným vlivem.

V nezávislém výzkumu přesnosti modelování letadel, proběhlém pod záštitou NASA (19), vyplynulo, že BADA má přesnější modely převážně malých a regionálních letounů. Toto tvrzení je ve zdroji podloženo mimo jiné i daty na Obr. 3, kde je zobrazen počet různých typů letounů, které byly pozorovány na letišti ve Fort Worth ve Spojených státech. V červených rámečcích jsou zvýrazněny letouny lehké.

Obrázek č.4 (19) pak zobrazuje opět letouny podle typu a opět v červených rámečcích jsou vyznačeny lehké letouny. Na vertikální ose je v tomto případě zobrazena chyba výšky ve stopách. Zelený sloupec zobrazuje porovnání základního nastavení BADA (operační podmínky, za nichž jsou platné parametry uvedené v PTD – Performance Table Data souborech) oproti skutečné trajektorii. V tomto porovnání lze nahlédnout, že chyba BADA modelu oproti trajektorii je nejmenší právě v případě malých civilních letounů.



Obrázek 3: Letouny ve Fort Worth (19)



Obrázek 4: Porovnání chyby výšky pro různé letouny (19)

4.4 SHRNUÍ

V této kapitole bylo přistoupeno k problematice modelování malých civilních letounů. První část se věnovala definici malého civilního letounu a vyplynulo z ní, že existuje jedna standardní definice dle organizace pro civilní letectví ICAO, která říká, že malé letouny patřící do „wake category - light“ jsou všechny do maximální vzletové hmotnosti MTOW 7 000 kg včetně. Podle organizace Joint Aviation Authorities, které má na ICAO silné vazby však existuje ještě jiné dělení letounů. Tam existuje i kategorie ultralight s horní hranicí MTOW 495 kg.

Dále byly postupně probrány již dříve zmíněné modely a pro každý model bylo odpovězeno na předem položené otázky, pokud měly otázky smysl. Z těchto odpovědí byl určen BADA model jako jediný vhodný pro modelování malých civilních letounů, vzhledem k jeho lepším parametrům ve všech případech kromě kompletní letové obálky. Vzhledem k vyvíjenému modelu BADA 4 lze předpovědět, že modelování pomocí BADA je výhodnější i s výhledem do budoucnosti.

Dále byly rozebrány nedostatky BADA modelu z pohledu modelování malých civilních letounů. Zjištěné nedostatky jsou tyto:

- Spodní omezení platnosti BADA: absence modelovaných letounů s MTOW menší než 975 kg, absence modelování větrných podmínek
- Neúplnost dat jednotlivých modelů: pro 90% typů lehkých letounů není doplněna h_{max}
- Absence stlačitelnosti vzduchu: pro výšky nad 10 000 stop a rychlosti nad 0,3 Mach již tento vliv není zanedbatelný
- Neúplná letová obálka: BADA model je platný pouze v rámci omezených parametrů

5 TESTY MODELŮ

Tato kapitola je věnována testům pro identifikaci letounu pro použití BADA modelu pro malé civilní letouny. V minulé kapitole byly pojmenovány čtyři nedostatky modelu BADA 3 vzhledem k modelování malých civilních letounů. Absenci stlačitelnosti vzduchu stejně jako neúplnou letovou obálku řeší BADA 4, a společně s neúplností dat u jednotlivých modelů přesahují rámec této práce. V této kapitole bude představen proces identifikace letounu pro použití v simulacích. Dále bude tento proces proveden na konkrétním letounu, aby bylo možné ověřit spodní limit platnosti BADA modelu.

5.1 POSTUP IDENTIFIKACE

Aby bylo možné použít letoun pro simulace, je třeba nejprve nalézt jeho model. V rámci BADA existují dva typy modelů – přímo podporované a podporované ekvivalencí. Vzhledem k náročnosti a množství parametrů potřebných pro přímo podporované letouny a zároveň vzhledem k podobnosti letových vlastností nemá smysl snažit se primárně tvořit model tak, aby byl přímo podporovaný, ale najít jiné modely, kterým tento může být ekvivalentní.

Při hledání ekvivalentního modelu je krokem, který určuje vhodně zvolený model chybová analýza. (20) V uvedeném zdroji však není uvedena mez, pod kterou se průměrná chyba musí dostat, aby bylo letoun možné považovat za synonym. Z přehledu chybových analýz modelovaných synonym tamtéž však vyplývá, že chyba 26% je ještě akceptovatelná. Je však dlužno podotknout, že v tomto případě závisí na účelu modelování a požadované přesnosti. Pokud z analýzy chybovosti vyplývá, že model je svými parametry příliš vzdálený, je třeba vytvořit model přímo podporovaný. Identifikaci lze provést dle Base of Aircraft Data (BADA) Aircraft Performance Modelling Report (18), který se touto identifikací přímo zabývá. Postup identifikace modelu letounu je tedy následující:

1. Ověření podmínek BADA: je třeba ověřit, zdali náš letoun je schopen fungovat v rámci omezení BADA 3 modelu
2. Nalezení potenciálních synonym: například postupnou filtrací (vybrat přímo podporované letouny ve stejné WTC, h_{\max} se pohybuje v intervalu od 0,5 do 1,5 násobku našeho letounu, ...)
3. Ověření rozmezí parametrů jiných synonym (volitelné): pokud náš model je používán pro více synonym, lze ověřit rozmezí parametrů, které tyto letouny mají pro lepší ověření správnosti modelu
4. Chybová analýza: porovnáme MTOW, V_{MO} , M_{MO} , Normální cestovní rychlost IAS, Normální cestovní rychlost a H_{MO} ; dosáhneme-li chybovosti pod 26%, můžeme považovat model za synonym
5. Přímé modelování: pokud chybovost překročí 26%, identifikujeme model dle (18)
6. Zápis dat: do souborů SYNONYM.LST, SYNONYM.NEW a SYNONYM_ALL.LST. Pro přímé modely i do souborů typu OPF, APF, PTF a PTD

Testování platnosti BADA parametrů bude provedeno pomocí letounu Tecnam P92 ECHO Classic – pod ICAO označením ECHO, který je vybaven zařízením Integra pro zaznamenávání letových údajů. Tento letoun byl vybrán vzhledem k jeho dostupnosti v rámci projektu TAČR. Pro otestování platnosti BADA modelu pro tento typ letounu je třeba nejprve sestavit model tohoto letounu, a posléze i vygenerovat trajektorii dle BADA parametrů a nechat jí nakonec stroj proletět.

5.2 URČENÍ MODELU

5.2.1 OVĚŘENÍ PODMÍNEK BADA

Prvním krokem, který je nutno zabezpečit pro simulaci v modelu BADA, je zdali je letoun P92 ECHO schopen operace v podmínkách omezené letové obálky, či jestli nějaké parametry bude nutné omezit. To lze zjistit porovnáním s limitními podmínkami. (6) Tyto jsou popsány v manuálu k modelu BADA 3.10 a vyčteny v Tabulce 3, kde a je zrychlení, ϕ je úhel bočního náklonu, H je výška a V je rychlost. Písmenem C jsou pak označeny různé koeficienty.

Limit	Hodnota	Limit	Hodnota
$a_{l,max}(clv)$	2,0 ft/s ²	$V_{d_{CL,6}}$	20 KCAS
$a_{n,max}(clv)$	5,0 ft/s ²	$V_{d_{CL,7}}$	30 KCAS
$\Phi_{nom,clv}(TO,LD)$	15°	$V_{d_{CL,8}}$	35 KCAS
$\Phi_{nom,clv}(OTHERS)$	35°	$V_{d_{DES,5}}$	5 KCAS
$\Phi_{max,clv}(TO,LD)$	25°	$V_{d_{DES,6}}$	10 KCAS
$\Phi_{max,clv}(HOLD)$	35°	$V_{d_{DES,7}}$	20 KCAS
$\Phi_{max,clv}(OTHERS)$	45°	$V_{HOLD,1}$	230 KCAS
$C_{des,exp}$	1,6	$V_{HOLD,2}$	240 KCAS
C_{Tcr}	0,95	$V_{HOLD,3}$	265 KCAS
$H_{max,TO}$	400 ft	$V_{HOLD,4}$	0,83 Mach
$H_{max,IC}$	2 000 ft	$V_{backtrack}$	35 KCAS
$H_{max,AP}$	8 000 ft	V_{taxi}	15 KCAS
$H_{max,LD}$	3 000 ft	V_{apron}	10 KCAS
$C_{vmin,TO}$	1,2	V_{gate}	5 KCAS
C_{vmin}	1,3	$C_{red,piston}$	0,0

Tabulka 3: Seznam limitací Global Aircraft Parameters (6)

Hodnoty zrychlení jsou hodnotami maximálními, tedy jsou z principu splnitelné. TO samé platí u úhlů natočení ϕ . Výšky H určují výškové hranice pro různé fáze letu a rychlosti V jsou opět maximálními – ať již inkrementy, či rychlostními limity. Tedy z principu jsou také splnitelné. Koeficient $C_{des,exp}$ slouží pro simulaci klapek při poklesu na udržitelnou hladinu (expedited descent) a C_{Tcr} je koeficient momentálně nezávislý na letounu. Koeficienty označené C_{vmin} určují minimální rychlosti pro vzlet a pro všechny ostatní fáze letu. V případě P92Echo vycházejí tyto minimální rychlosti postupně 39,6 kt a 42,9 kt pro vzlet a pro všechny ostatní fáze letu, což rozhodně spadá do intervalu dosažitelných rychlostí. Poslední hodnotou je koeficient redukováného výkonu, který se používá výhradně pro turbovrtulové či tryskově poháněné letouny kvůli zvýšení životnosti motorů.

5.2.2 NALEZENÍ POTENCIÁLNÍCH SYNONYM

Druhým krokem je nalézt vhodný model letounu. Autor nejprve tabulky podporovaných modelů (6) odfiltroval letouny rozdílných turbulentních kategorií a vzápětí všechny letouny podporované ekvivalentně. Dále vybral ty, které měly h_{max} větší, než 1,5 násobek h_{max} letounu ECHO. Ze zbylých asi 10ti letounů již ručním porovnáním a vyhledáváním na internetu vybral model P28A jako nejslibnější.

5.2.3 OVĚŘENÍ ROZMEZÍ JINÝCH SYNONYM

Parametry letounu P92 ECHO Classic jsou v Tabulce 4 srovnány s parametry P28A, který byl vybrán filtrací parametrů jako vhodný model. (21) (22) (23) Třetí sloupec tabulky obsahuje rozsah dat z 18i typů letounů ekvivalentních P28A. Data o některých těchto letounech lze nalézt v referovaných odkazech: (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37)

Parametr	ECHO	P28A	Rozpětí parametrů
MTOW [kg]	600	975	450 – 1100
Rozpětí křídél [m]	9,6	9,2	7,5 – 15,5
Plocha křídél [m ²]	13,2	15,14	8,7 – 16,2
Pohon [hp]	100	150	80 – 180
V _{max} [kt]	113	123	97 – 184
V _{stall} [kt]	35	47	35 – 40
ROC [ft/min]	1 200	660	660 – 1400
h _{max} [ft]	14 800	14 300	12 000 – 15 500

Tabulka 4: Poorvnání modelů pro použití v BADA

Type Designator = P28A
Total Count: 70

[Back](#)

Manufacturer	Model	Type Designator	Description	Engine Type	Engine Count	WTC	Photo
AICSA	PA-28-161 Warrior 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	Archer 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	Warrior 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	PA-28-181 Cherokee Archer 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	PA-28-181 Archer 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	PA-28-180 Cherokee	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	PA-28-161 Cherokee Warrior 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	PA-28-140 Cherokee Cruiser	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	PA-28-140 Cherokee	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	Cherokee Warrior 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	Cherokee Cruiser	P28A	Landplane	Piston	1	L	-
AICSA	Cherokee Archer 2	P28A	Landplane	Piston	1	L	-

Obrázek 5: Seznam letounů spadajících pod označení ICAO P28A (38) (částečný výpis)

Ve všech případech se parametry P92 ECHO Classic nacházejí v intervalu dat tvořeným parametry synonymních letounů. Dále je pod ICAO označením P28A modelováno dalších 70 typů letounů, které se liší minimálně pohonnou jednotkou či trupem. Seznam těchto letounů (Obrázek 5) je na stránkách ICAO a poslední aktualizace proběhla 28. 3. 2013. (38) Z tohoto důvodu je provedeno srovnání dle manuálu pro tvorbu synonymních letounů. (20)

	Ekvivalentní model	Podporovaný model	Δ	Chyba v %
ICAO	ECHO	P28A		
Typ pohonu	Vrtule	Vrtule		
WTC	L	L		
MTOW [kg]	600	975	375	62,5%
VMO [kt]	120	123	3	2,5%
MMO [Mach]	0	0		
Normální cestovní rychlost IAS [kt]	110	108	-2	1,8%
Normální cestovní rychlost [Mach]	0	0		
HMO [ft]	14 800	14 300	-500	3,4%
Průměrná chyba				17,6%

Tabulka 5: Chybová analýza P28A a ECHO

5.2.4 CHYBOVÁ ANALÝZA

Pro synonymní modely jsou brány v potaz následující parametry: *typ motoru, turbulentní kategorie WTC, maximální vzletová hmotnost MTOW, maximální provozní rychlost VMO v uzlech a MMO v Mach, maximální dosažitelná výška HMO, normální cestovní rychlost CAS nad hladinou 10 000 stop a normální rychlost Mach.* (20) Tyto parametry jsou v Tabulce 5 srovnány a je provedena chybová analýza. Jelikož je výsledných 17,6% méně než 26%, lze říci, že letoun typu ECHO je synonymním s letounem P28A.

5.2.5 ZÁPIS DO SOUBORŮ

Dále jsou uvedeny navržené změny pro následující soubory, vždy vztažené k řádku.

SYNONYM.LST – kód:

279	- P28A__	PIPER PA-28-140	P28A__	P28A	HELI	C77R
289				AA5	AFOX	ALSL
290				APM4	BMAN	CA41
291				EV97	FA04	HRNT
292				M2	NNJA	SD4
293				SNTA	SORA	SW18
294				T10	WSP	ECHO

SYNONYM.NEW - kód:

222	CD * ECHO	TECNAM	P92ECHO Classic	P28A__	ECHO /
-----	-----------	--------	-----------------	--------	--------

SYNONYM_ALL.LST - kód:

225	CD * ECHO	P92ECHO Classic	TECNAM	P28A__	ECHO ...
...	ECHO ECHO	ECHO ECHO	ECHO ECHO	ECHO ECHO	ECHO ECHO

5.3 SHRNUÍ

V této kapitole byl vyložen postup, jakým lze modelovat letoun tak, aby byl použitelný pro simulace s modelem BADA. Při identifikaci má nejprve smysl hledat synonymní letoun a až jestli takový nebude nalezen, má smysl pokusit se o přímou identifikaci dle (18).

Dále byl proces identifikace aplikován na letoun Tecnam P92ECHO Classic, který skončil úspěšnou identifikací synonymního letounu s průměrnou chybou 17,6%. Byly navržené změny příslušných souborů zaznamenávající tato data.

6 INTEGRACE DO AGENTFLY

V této kapitole bude velmi stručně uvedena simulace AgentFly, následována letovým plánem mezi 4mi body. Tyto body budou proletěny pomocí autopilota na identifikovaném letounu Tecnam P92ECHO Classic.

6.1 AGENTFLY

AgentFly je distribuovaná simulace letounů, fungující na multi-agentním přístupu. Každý letoun je reprezentován softwarovým agentem. AgentFly slouží k plánování trajektorií a jejich simulace, jakožto i ověření proti-kolizních algoritmů. AgentFly je škálovatelná simulace zaručující přesné výsledky bez ohledu na počet simulovaných letounů.

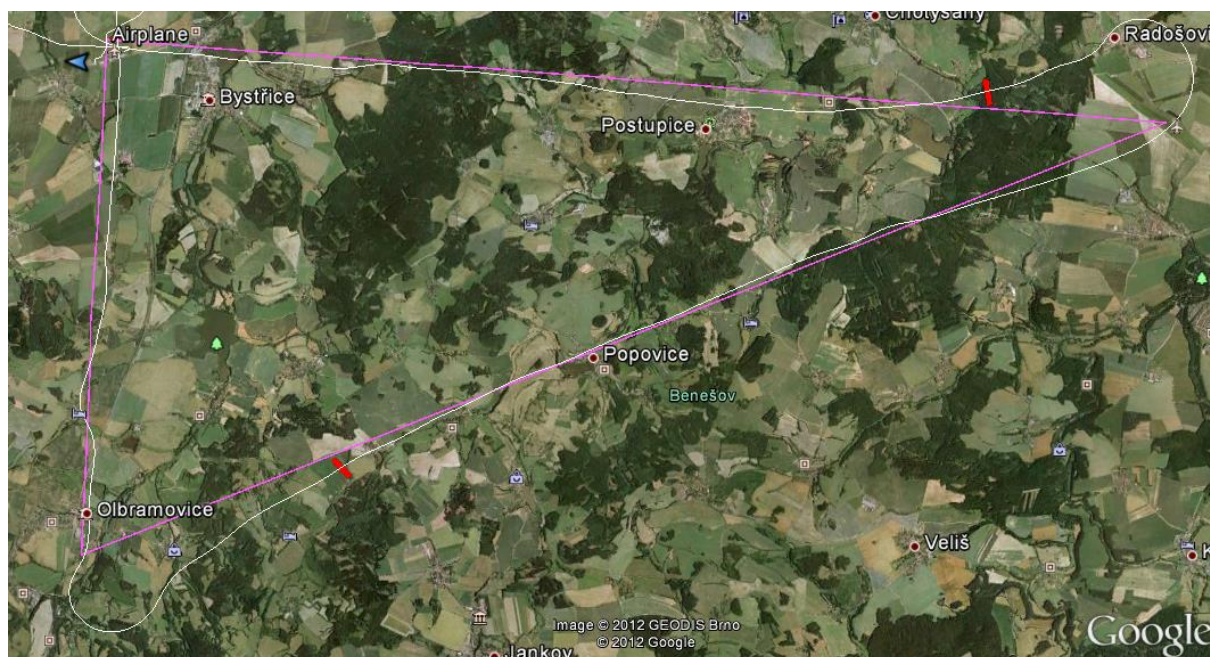
V současnosti je plánovač trajektorií v AgentFly postaven na BADA modelu. Při tvorbě letových plánů jsou naplánovány tzv. *waypointy*, tedy body průletu. Každý takový bod má přesně definovanou geografickou pozici, výšku, a rychlost, kterou má být proletěn. Letový plán je soubor elementů sestavených tak, aby byly tyto body proletěny. Současný soubor elementů je: *stoupání, klesání, přímý let a zatáčka*.

6.2 PRŮLET PLÁNU

V simulaci AgentFly byl naplánován let mezi třemi waypointy s geografickými pozicemi uvedenými v Tabulce 6.

Waypoint	Popis	Geografická pozice
1	Letiště Benešov (LKBE)	N 49°44.450 E 014°38.683
2	Olbramovice	N 49°44.033 E 014°38.367
3	Letiště Vlašim	N 49°43.733 E 014°52.733
4	Letiště Benešov (LKBE)	N 49°44.450 E 014°38.683

Tabulka 6: Letový plán



Obrázek 6: Průlet waypointů autopilotem

Tento letový plán byl vložen do autopilota v letounu Tecnam P92ECHO Classic a proletěn. Na palubě tohoto letounu byl instalován přístroj Integra, zaznamenávající průběh letu pomocí GPS. Na Obrázku 6 je vidět průlet plánu, znázorněný bílou stopou. Purpurově je pak znázorněn trojúhelník, kde vrcholy tvoří naplánované waypointy. Na průletu je dobře viditelné, že autopilot mění trajektorii až v momentě průletu waypointu, a postupně se vrací k plánované letové dráze.

6.3 SHRNUÍ

V této kapitole byl nejprve stručně popsán simulační systém AgentFly, který umožňuje validaci bezkolizních algoritmů a plánování a simulaci trajektorií. Dále byl v simulačním prostředí naplánován a simulován let mezi 4mi waypointy v oblasti Benešova. Tyto waypointy byly naprogramovány do autopilota letounu Tecnam P92ECHO Classic, který se je pokusil proletět. Na záznamu dat z průletu je jasně patrné, že autopilot není schopen počítat nadběh zatáčky a postupně se vrací zpět k plánované trajektorii.

7 ZÁVĚR

První kapitola této práce byla věnována stručnému úvodu do pozadí modelování parametrů letounů, s uvedením některých základních historických faktů a trendů, které určovaly vývoj tohoto odvětví v posledním půlstoletí. Dále byly uvedeny cíle, které byly pro moderní modelování vytyčeny.

Ve druhé kapitole byl uveden BADA model a byla popsána jeho struktura, dělí jej na modely věnované parametrům letounu APM a věnující se letovým procedurám ARPM. Dále byly popsány rodiny BADA 3 a 4, jakožto i rozdíly mezi nimi. Následuje popis aplikací BADA modelu se stručným popisem revize BADA 3.10 a simulace BADA modelů na simulátorech ESCAPE a \mathcal{A} -globe.

Kapitola „Jiné modely“ se věnuje stručnému popisu dalších způsobů modelování trajektorií letounů a stručně popisuje modely GAME, MIT, PIANO, metodu Look-up table a programy INFLT a REPORT. U každého z těchto modelů je stručně popsán princip, na kterém funguje a tam, kde jsou informace k dispozici i počty letounů, které jsou jimi modelovány.

Ve čtvrté kapitole jsou všechny popsané modely srovnány z hlediska parametrů, které jsou podstatné pro modelování letounů vůbec, a se zvláštním důrazem na modelování malých civilních letounů. Pro tento účel bylo odpovězeno na podstatné dotazy pro každý model a ze srovnání odpovědí vyplynulo, že BADA model je nejvhodnější pro tento účel. Dále byly pojmenovány nedostatky BADA modelu vzhledem k modelování. Tyto jsou: spodní omezení platnosti BADA, neúplnost dat jednotlivých modelů, absence stlačitelnosti vzduchu a neúplná letová obálka.

Kapitola „Testy modelů“ popisuje univerzální postup, při jehož následování bude letadlo postupně identifikováno a použitelné v rámci BADA modelu. Tento postup testů sestává z: ověření podmínek BADA, nalezení potenciálních synonym, ověření rozmezí parametrů jiných synonym, chybové analýzy, přímého modelování a nakonec zápisu dat. Tento postup byl aplikován v praktickém případě na letounu Tecnam P92ECHO Classic, pro který byl nalezen synonym Piper P28A Cherokee s průměrnou chybou 17,6%. Byly uvedeny zápisy do souborů potřebné pro zaznamenání tohoto výsledku.

Poslední kapitola se věnuje stručnému popisu simulace AgentFly. V této simulaci byl naplánován let mezi 4mi waypointy tvořícími trojúhelník v oblasti letiště Benešov. Tyto waypointy byly vloženy do autopilota letounu P92ECHO a proletěny. Letová data zaznamenaná pomocí přístroje Integra byla vizualizována a porovnána s naplánovanou trajektorií. Z porovnání je patrné, že autopilot není schopen vytvořit nadběh pro zatáčku a vrazí se postupně zpět k plánované trajektorii.

Zhodnocení cílů práce:

1. Seznámit se se systémem pro modelování výkonnostních vlastností letadel BADA.

Seznámení a popis systému BADA bylo provedeno v kapitole BADA model.

2. Popsat základní vlastnosti BADA modelu a porovnat jej s jinými přístupy k popisu charakteristik letadel.

Jiné přístupy k modelování letadel byly popsány v kapitole Jiné modely. Tyto přístupy (BADA včetně) byly porovnány v kapitole Modelování malých civilních letounů.

3. Analyzovat případné nedostatky BADA modelů pro jejich využití pro malé civilní letouny.

Nedostatky BADA modelů byly popsány v kapitole Modelování malých civilních letounů.

4. Navrhnout sadu testů pro experimentální ověření modelů na těchto letounech.

Sada testů pro ověření modelů na letounech byla popsána v kapitole Testy modelů.

5. Integrovat tento model do systému pro simulaci a plánování letového provozu AgentFly.

Model byl integrován za vytvoření trajektorie v simulaci AgentFly. Tato trajektorie byla proletěna pomocí autopilota.

CITOVANÁ LITERATURA

1. World's busiest airports by passenger traffic. *Wikipedia.org*. [Online] 04. 05 2013.
http://en.wikipedia.org/wiki/World's_busiest_airports_by_passenger_traffic.
2. **Greene, Terrell E. a Spicer, Robert L.** *Fighter Aircraft Performance Modeling, Simulation, and Flight Testing For Research and Development*. Santa Monica : The RAND Corporation, 1968.
3. **Marshall, Robert T. a Schweikhard, William G.** *Modeling of Airplane Performance From Flight-test Results and Validation With an F-104G Airplane*. Edwards : Edwards Flight Research Center, NASA, 1973.
4. **Nuic, Angela, Mouillet, Vincent a Poles, Damir.** BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. Int. J. Adapt. Control Signal Process. 2010, 28. June 2010, Sv. 24, stránky 850–866.
5. *Advanced Aircraft Performance Modeling for ATM: Enhancements to the BADA Model*. **Nuic, Angela, a další, a další.** Brétigny sur Orge, France; Madrid, Spain : Eurocontrol Experimental Centre; Boeing Research & Technology Europe, 2005. 24th Digital Avionics System Conference, Washington D.C.
6. **Nuic, Angela.** *User Manual of the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.10*. Brétigny-sur-Orge, France : Eurocontrol Experimental Centre, 2012.
7. *Enhancement in Realism of ATC Simulations by Improving Aircraft Behaviour Models*. **Gillet, Sophie, Nuic, Angela a Mouillet, Vincent.** Brétigny-sur-Orge, France : Eurocontrol, 2010. 29th Digital Avionics Systems Conference.
8. **Doubek, Jan.** *Optimization of Vertical In-flight Parameters of an Aircraft According to BADA Model*. místo neznámé : ČVUT FJFI, 2011.
9. **Calders, Patrick.** *G.A.M.E. Aircraft Performance Model Description*. Brussel : Eurocontrol, 2002. DOC. CoE-TP-02002.
10. **Suchkov, Alexander, Swierstra, Sip a Nuic, Angela.** *Aircraft Performance Modeling for Air Traffic Management Applications*. McLean, VA; Brussels, Belgium; Brétigny-sur-Orge, France : Boeing Air Traffic Management; Eurocontrol HQ; Eurocontrol Experimental Center, 2003.
11. **Su, Wei-Nian.** *Evaluation of Aircraft Performance Algorithms in Federal Aviation Administration's Integrated Noise Model*. místo neznámé : Massachusetts Institute of Technology, 1999.
12. **Simos, Dimitri.** Piano User's Guide. [Online] Lissys Limited, 2008.
<http://www.lissys.demon.co.uk/pug/index.html>.
13. **Vera-Morales, María a Hall, Cesare A.** Modeling Performance and Emissions from Aircraft for the Aviation Integrated Modelling Project. *Journal of Aircraft*. Vol. 47, May–June 2010, Sv. No. 3, stránky 812-819.

14. **The Boeing Company.** *INFLT and REPORT Software Documentation, version 3.2.* Seattle : Flight Operations Engineering, 2010.
15. European Civil Aviation Conference. *Wikipedia.org.* [Online]
http://en.wikipedia.org/wiki/European_Civil_Aviation_Conference.
16. ICAO Wake Turbulence Category. *Skybrary.* [Online]
http://www.skybrary.aero/index.php/ICAO_Wake_Turbulence_Category.
17. **Poles, Damir, Nuic, Angela a Mouillet, Vincent.** *Advanced Aircraft Performance Modeling for ATM: Analysis of BADA Model Capabilities.* Brétigny-sur-Orge, France : Eurocontrol, 2010.
18. **Poles, Damir.** *Base of Aircraft Data (BADA) Aircraft Performance Modeling Report.* Brétigny-sur-Orge : Eurocontrol Experimental Centre, 2009.
19. **Abramson, Michael a Ali, Kareem.** *Integrating the Base of Aircraft Data (BADA) in CTAS Trajectory Synthesizer.* Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration. Hanover : NASA Center for Aerospace Information, 2012. NASA/TM-2012-216051.
20. **Sheehan, C.** *Synonym Aircraft Report for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9.* Centre de Bois des Bordes, Brétigny-sur-Orge, France : Eurocontrol Experimental Centre, 2011. 11/03/08-12.
21. Apollo Fox. *Wikipedia.org.* [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_Fox.
22. Piper PA-28 Cherokee. *Wikipedia.org.* [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Piper_PA-28_Cherokee.
23. P92ECHO Brochure. *Tecnam.net.* [Online]
http://tecnam.net/images/stories/P92Echo/pdf/p92_echoclassic_2013.pdf.
24. Teddy SW-18 MKII. *Alpiaviation.* [Online]
http://www.alpiaviation.co.za/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=75.
25. ACS-100 Sora. *Wikipedia.org.* [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/ACS-100_Sora.
26. Sonata - Tech. data. *Airsport.cz.* [Online]
http://www.airsport.cz/AIRSPORT/Tech._data_sonata.html.
27. Technical Specification of Viper SD-4. *Tomark Aero.* [Online]
<http://www.tomarkaero.com/en/aircraft-viper-sd-4/technical-specification.html>.
28. Bestoff aircrafts models / Nynja. *Bestoff.* [Online]
<http://www.bestoffaircraft.com/index.php/en/range-bestoff/nynja>.
29. Kubicek M-2 Scout. *Wikipedia.org.* [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Kubicek_M-2_Scout.
30. Australian Aircraft Kits Hornet STOL. *Wikipedia.org.* [Online]
http://en.wikipedia.org/wiki/Australian_Aircraft_Kits_Hornet_STOL.
31. Skylane - Technical Data - Rotax 912 (80HP) engine. *AirLony.* [Online]
<http://www.airlony.cz/description>.

32. Evektor SportStar. *Wikipedia.org*. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Evektor_SportStar.
33. Corvus Racer 540. *Wikipedia.org*. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Corvus_Racer_540.
34. Cessna 177 Cardinal. *Wikipedia.org*. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Cessna_177_Cardinal.
35. Australian Aircraft Kits. *Bushman Performance Data*. [Online] http://www.aircraftkits.com.au/documents/Bushman_750_Performance_Data_March%202012.pdf.
36. Issoire APM 40 Simba. *Wikipedia.org*. [Online] https://en.wikipedia.org/wiki/Issoire_APM_40_Simba.
37. Grumman American AA-5. *Wikipedia.org*. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Grumman_American_AA-5.
38. *International Civil Aviation Organization*. [Online] <http://www.icao.int/Pages/default.aspx>.
39. Aeroelasticity. *Wikipedia.org*. [Online] <http://en.wikipedia.org/wiki/Buffering#Buffering>.
40. Calibrated airspeed. *Wikipedia.org*. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Calibrated_airspeed.
41. **Šišlák, David**. *Autonomous Collision Avoidance in Air-Traffic Domain*. Prague : ČVUT FEL, 2010.
42. **Gallo, Eduardo, a další, a další**. *Advanced Aircraft Performance Modeling for ATM: BADA 4.0 Results*. Madrid, Spain; Brétigny sur Orge, France : Boeing Research & Technology Europe; Eurocontrol Experimental Centre, 2006.
43. **Poles, Damir**. Revision of Atmosphere Model in BADA Aircraft Performance Model. Brétigny-sur-Orge, France : Eurocontrol Experimental Centre, February 2010.
44. Light aircraft. *Wikipedia.org*. [Online] 17. 4 2013. http://en.wikipedia.org/wiki/Light_aircraft.