



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Technická analýza použití deceleračních systémů na B-737 MAX
Technical analysis of B-737 MAX deceleration systems

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Technologie údržby letadel

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Sekal

Ing. Ondřej Vítovec

Pavel Píchal

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Pavel Píchal

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Technická analýza použití deceleračních systémů na B-737 MAX**

Název tématu (anglicky): Technical Analysis of B-737 MAX Deceleration Systems

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je vytvořit doporučení pro leteckou společnost provozující B 737MAX pro využívání systémů decelerace letounu na základě ekonomické výhodnosti.
- Popis systémů brzd a reverzů a analýza současného stavu orientovaná na využívání těchto systémů na letounech Boeing 737MAX.
- Definovat provozní a enviromentální prostředí letiště, na kterých bude prováděna ekonomická analýza řešení kombinací deceleračních systémů.
- Provést výpočty nákladů na údržbu a palivo pro jednotlivé, předem definované modelové podmínky na letišti.
- Vytvořit doporučení pro letecké společnosti na základě dosažených výsledků z analýz a výpočtů.
- Zhodnocení vytvořeného obecného řešení modelu.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího závěrečné práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: PALMER, Richard D. Maintenance Planning and Scheduling Handbook. Second Edition. McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-145766-6. BOEING, SDS System Description Section, B737-7/8/8200/9/10. 2022

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Vítovec

Ing. Ondřej Sekal

Datum zadání bakalářské práce:

7. října 2022

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

7. srpna 2023

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Pavel Píchal
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 7. října 2022



Abstrakt

Pro současný provoz letecké dopravy je trendem úspora paliva a snížení hlukových limitů pomocí minimalizace využívání obracečů tahu při přistání vyjma situací, kdy je nutné využít plný reverzní tah zejména z důvodu bezpečnosti. Práce se podrobně zabývá konstrukcí obou systémů, jejich funkcí a potřebnou pravidelnou údržbou. Dále je část věnována metodice výpočtu a určení proměnných, které hrají důležitou roli při stanovení celkové brzdné dráhy. Teoretickou část práce ukončuje analýza nákladů na provoz jednotlivých systémů. Práce se v praktické části zabývá nejhoršími možnými situacemi při přistání a následně scénáři, které aplikují některé příznivější korekce. Na závěr praktické části práce doporučuje leteckým provozovatelům kombinace využívání deceleračních systémů při přistání na určeném letišti.

Klíčová slova: boeing 737 max, brzdy, ekonomický dopad, náklady, obraceče tahu, provoz, údržba



Abstract

The trend for current Air Transport Operators is to save fuel and reduce noise limits by minimising the use of Thrust Reversers upon landing, except in situations where Full Reverse Thrust is necessary, particularly for Safety reasons. The thesis reviews in detail the design of both systems, their function and the Required Periodic Maintenance. Furthermore, a section is devoted to the calculation methodology and determination of variables that play an important role in the calculation of the Total Braking Distance. The theoretical part of the thesis closes with an analysis of the Operating Costs of the individual systems. The practical part of the thesis deals with worst-case situations during landing and then scenarios that apply some of the more favourable corrections. Towards the end of the practical part of the thesis there are recommendations about the combination of the use of deceleration systems for landing at the designated airport to Air Operators.

Keywords: boeing 737 max, brakes, economic impact, expences, maintenance, operation, thrust reversers



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mě skrze studium a psaní této práce podporovali. Velký dík patří zejména panu Ing. Ondřeji Sekalovi a panu Ing. Ondřeji Vítovcovi za vedení mé práce a za poskytnuté konzultace, které měly pokaždé velký přínos při tvorbě této práce. V neposlední řadě také děkuji celé své rodině za veškerou podporu, které se mi v průběhu dosavadního studia dostalo. Obzvláště pak děkuji svému tátovi za vzbuzení zájmu o letectví a speciální podporu při psaní bakalářské práce.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Technická analýza použití deceleračních systémů na B-737 MAX vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

Praze dne 4. srpna 2023

Příklu /

.....
Podpis



Obsah

Úvod	12
1 Analýza současného stavu	13
1.1 Brzdový systém	13
1.1.1 Stavba brzdíče	14
1.1.2 Hydraulický systém	16
1.1.3 Systém Antiskid	19
1.1.4 Systém Autobrake	20
1.2 Systém obracečů tahu	22
1.3 Limitace současného stavu	24
1.4 Aktuální způsoby využívání deceleračních systémů a provozní zvyky	25
1.4.1 Aplikace OPT	25
1.4.2 Podmínky na letišti přistání	27
1.4.3 Přehřívání brzd	27
2 Metodika výpočtu a určení proměnných	28
2.1 Vlastnosti letiště	28
2.1.1 Délka přistávací dráhy	28
2.1.2 Stav dráhy	29
2.1.3 Rychlosti větru	30
2.1.4 Teplota vzduchu	30
2.2 Vlastnosti letounu	31
2.2.1 Hmotnost při přistání	31
2.2.2 Konfigurace letounu	31
2.2.3 Rychlost při přistání	31
2.3 Náklady na údržbu a provoz	32
2.3.1 Brzdňý systém	32
2.3.2 Obraceč tahu	32
2.4 Nastavení systému AUTOBRAKE a T/R	35
3 Výsledky	39
3.1 Nejhorší možné situace při přistání	39
3.2 Nejhorší možná situace s bezvětřím, nebo LAW = 65 tun při přistání	43



4	Diskuse výsledků	51
5	Závěr	53
	Reference	55
	Přílohy	56



Seznam obrázků

Obrázek 1 – Detail připojení brzdíče k hydraulickému okruhu, Zdroj: Autor	13
Obrázek 2 – Brzdíč B-737 MAX, Zdroj: SDS (1).....	14
Obrázek 3 – Detail spojení kola se satorovými lamelami brzdíče, Zdroj: Autor	15
Obrázek 4 – Indicator pin značící zbývající obložení lamel brzdíče	15
Obrázek 5 – Elektrická čerpadla „1“ a Pressure Transfer Unit „2“, Zdroj: Autor	16
Obrázek 6 – Pressure Module, Zdroj: Autor.....	17
Obrázek 7 – Levá strana motoru 1, Zdroj: Autor	18
Obrázek 8 – Brake metering valve (BMV) okruhu A „1“ a BMV okruhu B „2“, Zdroj: Autor	20
Obrázek 9 – Ovládání systému Autobrake v kokpitu, Zdroj: Autor	20
Obrázek 10 – Senzor indikující letadlo ve vzduchu/na zemi, Zdroj: Autor	21
Obrázek 11 – Panel počítače systému Autobrake v elektronické šachtě/šachtě avioniky používaný pro diagnostiku systému a jeho nastavení, Zdroj: Autor	21
Obrázek 12 – Páky ovládání tahu motorů a konfigurace letounu, Zdroj: Autor.....	22
Obrázek 13 – Ventil ovládání T/R na motoru 2 znázorněný v Příloze 1, Zdroj: Autor.....	23
Obrázek 14 – Pohled zezadu do studeného proudu motoru CFM LEAP-1B, Zdroj: Autor.....	24
Obrázek 15 – Rozhraní aplikace OPT, Zdroj: Ing. Filip Červený	26



Seznam tabulek

Tabulka 1 – Délky drah letišť v metrech a jejich orientace, procentuální poměr vůči celkovému počtu přistání a maximální vítr na jednotlivých letištích. Zdroj: Autor, (7).....	29
Tabulka 2 – Výčet možných podmínek na přistávací dráze. Zdroj: FCOM (9).....	30
Tabulka 3 – Spotřeba paliva jednotlivými motory při nastavení obracečů tahu v polohách IDLE/FULL. Zdroj: (6), Autor.....	33
Tabulka 4 – Tabulka ukazující upravené spotřeby a náklady na provoz. Zdroj: Autor.....	34
Tabulka 5 – Brzdná dráha za běžných podmínek s použitím klapek 30, Zdroj: (9).....	36
Tabulka 6 - Brzdná dráha za běžných podmínek s použitím klapek 40, Zdroj: (9)	37
Tabulka 7 – Opravené referenční vzdálenosti vzhledem ke stavu RWY s použitím klapek 30, Zdroj: Autor	38
Tabulka 8 – Opravené referenční vzdálenosti vzhledem ke stavu RWY s použitím klapek 40, Zdroj: Autor	38
Tabulka 9 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 30 při nejhorší možné situaci, vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR, Zdroj: Autor	39
Tabulka 10 - Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 40 při nejhorší možné situaci, vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR, Zdroj: Autor	41
Tabulka 11 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 30 při nejhorší možné situaci a bezvětří, Zdroj: Autor	43
Tabulka 12 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 40 při nejhorší možné situaci a bezvětří, Zdroj: Autor	45
Tabulka 13 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 30 při nejhorší možné situaci a LAW 65 tun, vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR, Zdroj: Autor	46
Tabulka 14 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 40 při nejhorší možné situaci a LAW 65 tun, Zdroj: Autor	48



Seznam symbolů a zkratk

ABS	Anti-Lock Brake System	
BMV	Brake Metering Valve	
ENG	Engine	Motor
FCOM	Flight Crew Operations Manual	
FMS	Flight Management System	System řízení letu
GS	Ground Speed	Rychlost vůči zemi
HDG	Heading	Kurs
HEMA	Marsa Alam International Airport	Mezinárodní letiště Marsa Alam
IAS	Indicated Air Speed	Indikovaná vzdušná rychlost
IDG	Integrated Drive Generator	Integrovaný generátor
KTS	Knots	Uzly
LAW	Landing Weight	Přistávací hmotnost
LKPR	Václav Havel Airport Prague	Letiště Václava Havla Praha
METAR	Meteorological Terminal Air Report	
MLAW	Maximum Landing Weight	Maximální přistávací hmotnost
PPH	Pounds Per Hour	Libry za hodinu
OPT	Onboard Performance Tool	Palubní nástroj určování výkonů
PTU	Pressure Transfer Unit	Jednotka předání tlaku
RTO	Rejected Take-Off	Přerušný vzlet
RWY	Runway	Vzletová/přistávací dráha
T/R	Thrust Reverser	Obraceč tahu



Úvod

V dnešní době se provozovatelé letecké dopravy soustředí hlavně na ekonomičnost provozu své letky a hledají každou možnost ušetřit, jelikož se po roznásobení počtem letadel dokáže téměř jakákoliv cifra zvětšit na takovou úroveň, že se již vyplatí danou problematikou zabývat. V této práci se snažím ekonomicky zanalyzovat otázku využívání systémů pro zpomalení po dotyku s dráhou při přistání. Přesněji se zabývám pouze brzdícím systémem a systémem obracečů tahu, jelikož spoilers se při každém přistání využívají stejně a vysunují se všechny. Navíc při celkové deceleraci jsou právě tyto dva systémy zodpovědné za drtivou většinu zpomalovacích sil. Jejich provoz je podstatnou položkou při určení celkové ekonomičnosti provozu letky leteckých dopravců.

Dalšími faktory, kterými se práce zabývá je délka a stav přistávací dráhy, jelikož ne vždy panují příznivé podmínky pro přistání a může se stát, že právě dráha kontaminovaná deštěm znamená využití všech dostupných systémů decelerace. Aktuální teplota vzduchu na letišti taktéž hraje svojí roli z pohledu odporu vzduchu a množství vzduchu procházejícího motory letounu. Rychlost a směr větru také výrazně ovlivňuje podmínky při přistání. Práce se také věnuje hmotnosti letounu, konfiguraci při přistání, nastavení systémů určující intenzitu brzdění a míře využití obracečů tahu.

Brzdový systém je třeba udržovat, obraceče tahu nikoliv. Na druhou stranu obraceče tahu spotřebovávají palivo, kdežto brzdový systém negeneruje kontinuální finanční nároky, ale pouze jednorázově s určitou časovou periodou, nebo za určitý počet přistání. Analýza je vztažena k letounu B-737 MAX a určuje celkové náklady vyplývající z používání těchto systémů a doporučuje používání určitých kombinací nastavení těchto systémů. Dodržování nastavení doporučených v této práci by mělo mít pozitivní dopad na ekonomickou stránku provozu letounu při přistání, hlavně pak brzdné soustavy díky snížení frekvence oprav.

Cílem práce je tedy vytvořit doporučení pro leteckou společnost provozující B-737 MAX pro využívání systémů decelerace letounu na základě ekonomické výhodnosti.

1 Analýza současného stavu

Pro pochopení výstupu této práce je třeba seznámení čtenáře se systémy, které ve výpočtu hrají hlavní roli. Snižování rychlosti letounu při přistání lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní decelerace je zapříčiněna primárně aerodynamickým odporem aktuální konfigurace a tvaru letounu. Sekundárně pak valivým odporem kol vůči přistávací dráze (RWY). Pasivní je proto, že je inherentní a daná, v běžných případech neměnná. Aktivní snižování rychlosti je pomocí brzdného systému a systému obracečů tahu. Aktivní je z důvodu nutnosti iniciace systému – a tudíž decelerace – posádkou letounu.

1.1 Brzdový systém

Na letounu Boeing 737 MAX je brzdový systém ovládán hydraulicky a je napojen na oba hlavní hydraulické okruhy (A, B). Letadlo disponuje systémy Antiskid a Autobrake, aby se maximalizovala účinnost brzd (1).

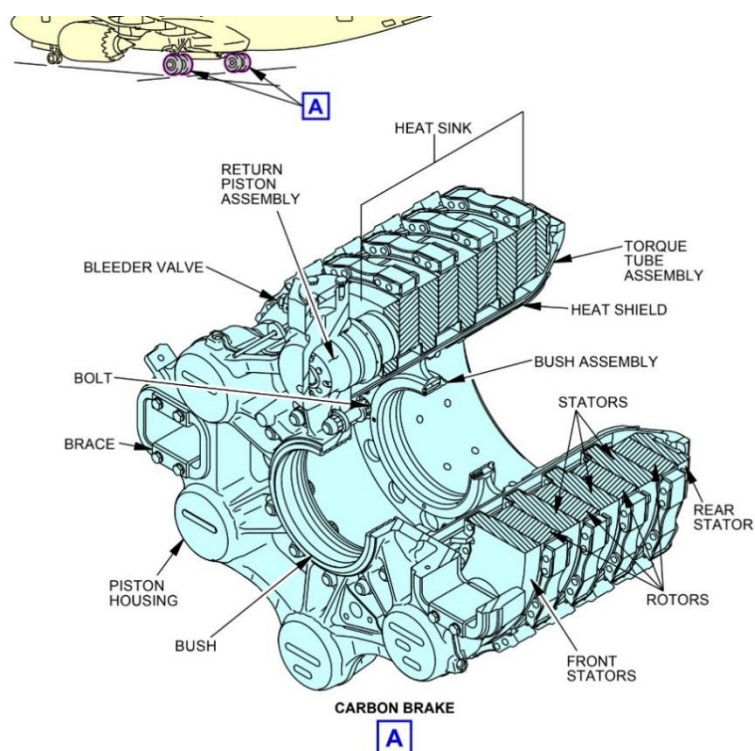


Obrázek 1 – Detail připojení brzděče k hydraulickému okruhu, Zdroj: Autor

V popisu systémů se vyskytují slovní spojení „normální brzdny systém“ a „alternativní brzdny systém“, což může zprvu být poněkud matoucí. Samotné kolo nemá dva brzdíče pro normální brzdu a alternativní brzdu, ale disponuje právě jednou brzdou, která je poháněna tlakem buďto z normální větve, či z alternativní větve skrze tlakovou hadičku připojenou rychlospojkou na vrchu brzdíče (Obrázek 1). Jedná se o místo spojení dvou hydraulických okruhů, které ovládají ten samý systém. V celém letectví se tak činí pro zajištění definované úrovně bezpečnosti pro případy poruch, které by způsobily nefunkčnost jednoho z okruhů (1).

1.1.1 Stavba brzdíče

Brzda hlavního podvozku je axiální – lamelová. Brzdíč přenáší brzdné síly na stacionární podvozkovou nohu pomocí dvou pinů na boku podvozkové nohy, na které se brzdíč nasune a tím se statory oproti podvozkové noze nepohybují. Rotory brzdíče se nasouvají do drážkování uvnitř disku kola (Obrázek 3) a otáčejí se společně s kolem, takže se vůči němu nepohybují (1).



Obrázek 2 – Brzdíč B-737 MAX, Zdroj: SDS (1)

Stlačení statorových lamel na rotorové pomocí tlaku hydraulické kapaliny zajišťuje 6 pístků (Obrázek 3 uprostřed), které jsou umístěny na straně přivrácené k podvozkové noze a jsou rozmístěny rovnoměrně po obvodu první lamely statoru (1).



Obrázek 3 – Detail spojení kola se statorovými lamelami brzděče, Zdroj: Autor

Brzdíč je dále vybaven odvzdušňovacím ventilem, tepelnou izolací, která chrání náboj kola před přehřátím a dvěma uloženími, aby měl brzdíč na náboji podvozkové nohy dva opěrné body (1). Při zatížení brzdy dochází k jejímu zahřívání. Teplo prostupuje skrze materiál a zahřívá mimo jiné i pneumatiku, náboj a podvozkovou nohu. U karbon-keramických brzd dochází při opakovaném brždění po zahřátí (například při pojíždění) ke vzniku trhlin na brzdovém obložení. Všechny tyto důsledky zahřívání snižují životnost brzdy.



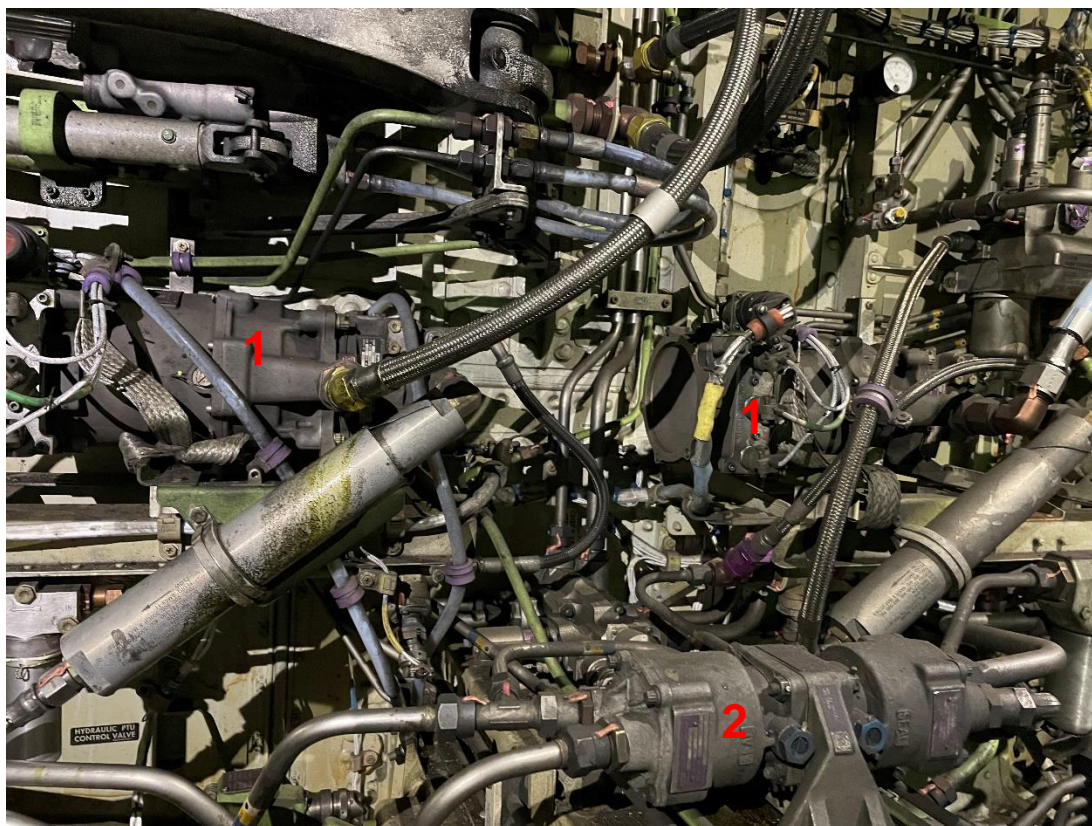
Obrázek 4 – Indicator pin značící zbývající obložení lamel brzděče

Výměna brzd probíhá tak, že se zdvihne celá podvozková noha, což umožní sejmutí kola. Dále se sejme celý brzdíč, očistí se styčné plochy podvozkové nohy, namažou se vazelínou a nasune se nový brzdíč. Namontuje se kolo a po spuštění letounu na zem lze letoun dále provozovat do té doby, než dojde k nadlimitnímu opotřebení brzdového obložení, nebo

dokud se neobjeví jiná závada. Ke kontrole, zdali je výměna nutná, slouží indikační pin (Obrázek 4), který prochází otvorem v materiálu na brzdě. V případě nízkého množství brzdového obložení na lamelách bude tato malá hřídelka mít svůj konec zarovnaný ve výše zmíněném otvoru (2).

1.1.2 Hydraulický systém

Hydraulický systém se na tomto letadle dělí na tři základní okruhy, které jsou mezi sebou vzájemně nepřímě propojené. Jedná se o okruh A, okruh B a záložní okruh. V hydraulické části brzdového systému, kam záložní okruh připojený není, tvoří poslední zálohu brzdový akumulátor. Motorem poháněná čerpadla (Obrázek 7, popis 2) a elektrická čerpadla (Obrázek 5) dodávají energii hlavním okruhům (1).



Obrázek 5 – Elektrická čerpadla „1“ a Pressure Transfer Unit „2“, Zdroj: Autor

Diagram hydraulického systému lze nalézt v Příloze 1. Schéma je velice zjednodušené z důvodu snazší čitelnosti. Chybí zde velké množství filtrů, ventilů a čidel, které jsou skoro na každé větvi okruhu a které monitorují tlak ve vedení (jejich znázornění by opticky přehltilo diagram). Nejsou to jenom čidla a ventily, ale i celé moduly s podobnou funkcí. Kupříkladu

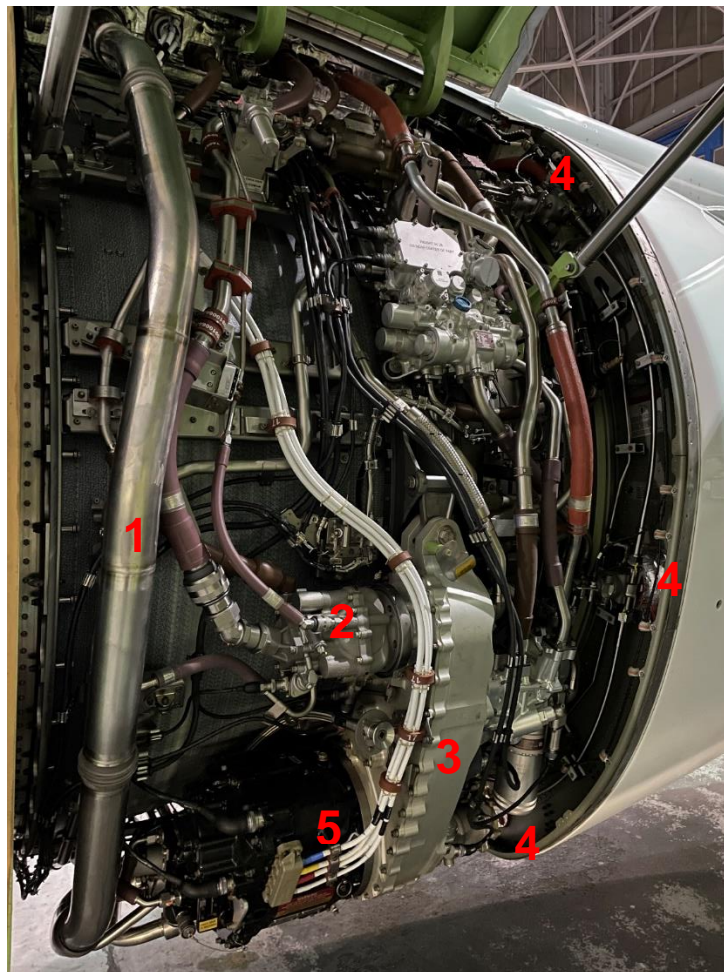
součástí Pressure Module umístěného v podvozkové šachtě (Obrázek 6) je filtr, sada ventilů a čidlo tlaku v systému, čidlo tlaku přicházejícího z motorem poháněného hydraulického čerpadla a obdobné čidlo tlaku pro elektricky poháněné čerpadlo.



Obrázek 6 – Pressure Module, Zdroj: Autor

Okruh A získává tlak pomocí EDP¹ z levého motoru a z elektrického čerpadla. Jeho pomocí ovládáme kormidla řízení letu, spoilery používané pro brždění na zemi a alternativní brzdný systém (1). Okruh B je také poháněn elektrickým čerpadlem a motorem poháněným čerpadlem (Obrázek 7, bod 2) z pravého motoru, a kromě kormidel řízení letu se s ním ovládá normální brzdný systém, vztlková mechanizace na odtokové hraně a na náběžné hraně klapky a sloty (1).

¹ Engine Driven Pump – Motorem poháněné čerpadlo



Obrázek 7 – Levá strana motoru 1, Zdroj: Autor

Popis Obrázek 7: 1. vzduchové potrubí ke vzduchovému startéru; 2. motorem poháněné hydraulické čerpadlo; 3. skříň pohonů; 4. deploy/stow aktuátory T/R²; 5. IDG – integrovaný generátor

Jedno z míst nepřímého propojení okruhů je PTU³ (Obrázek 5). Jde o výměník energie mezi okruhy, který v případě potřeby a za otevření požadovaných ventilů může pomocí tlaku v okruhu A přenést tlakovou energii do části okruhu B. Jmenovitě pro část určenou k ovládní mechanizace křídla na náběžné hraně. Další důležitý bod hydraulického systému je přepouštěcí ventil (Příloha 1 dole), jehož funkcí je určení vhodného okruhu využitého k pohybu pracovních válců pro vytažení a zatažení podvozku a pro ovládní řízení předového podvozku (1).

² Thrust Reverser – obraceč tahu

³ Pressure Transfer Unit – jednotka předání tlaku



1.1.3 Systém Antiskid

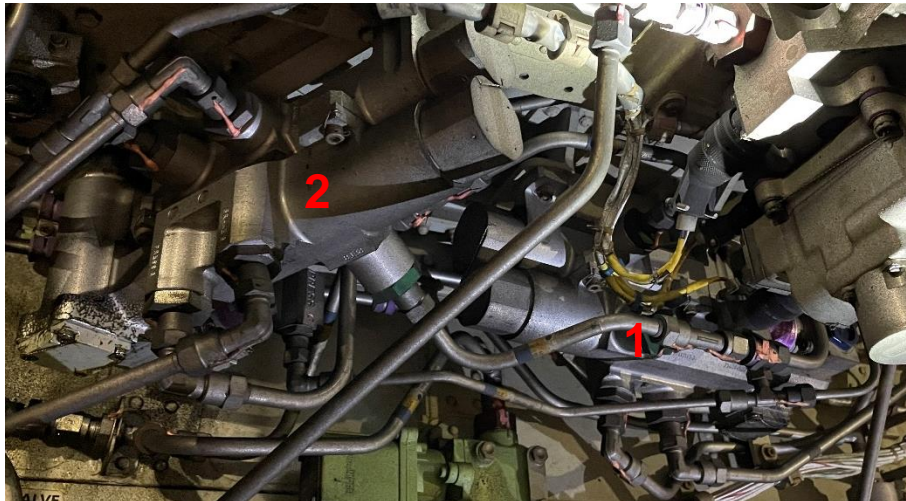
Systém Antiskid zabraňuje prokluzu kol při brždění. Podobně jako ABS⁴ u silničních vozidel se tak děje pomocí monitorování decelerace kola a malého zmenšení brzdné síly na brzdič. Kolo se tedy zase může roztočit a dodávat nejvyšší možný odpor bržděním (1). Důsledky nefunkčního systému Antiskid jsou na škále od vydřených plošek na pneumatice (které zapříčiňují vibrace a vyšší šanci opětovného zablokování kola) až po destrukci kola jakožto následek prodření skrz pneumatiku.

Systém je funkční od rychlosti 8 uzlů. Pracuje na každém kole zvlášť při využití normálního systému Antiskid a při užití alternativního systému Antiskid pak na obou kolech jedné podvozkové nohy. Existuje zde protekce dotyku, která zamezí brždění, pokud je letoun stále ve vzduchu. Hydroplane protekce porovnává rychlost vůči zemi a obvodovou rychlost otáčení kol a při převyšující ground speed sníží tlak v brzděném okruhu. Dále je zde pojistka pro zatažení podvozku, kdy se modul alternativního Antiskidu nesepe při retrakci podvozku pro zabrzdění kol před kompletním zatažením. Diagram (Příloha 2) znázorňuje vedení hydraulické kapaliny a napojení na systém Antiskid a systém Autobrake (1). Pro správnou funkci systému je potřebný BMV⁵ (Obrázek 8), který po sešlápnutí pedálu brzdy v kokpitu vpustí měřený tlak do brzděného systému. Součástí BMV jsou také čidla brzděného tlaku, které následně systém Autobrake využívá. V kokpitu slouží k signalizaci stavu systému Antiskid pouze kontrolka „Antiskid INOP⁶“ (Obrázek 9).

⁴ Anti-Lock Brake System

⁵ Brake Metering Valve

⁶ Inoperative – nefunkční



Obrázek 8 – Brake metering valve (BMV) okruhu A „1“ a BMV okruhu B „2“, Zdroj: Autor

1.1.4 Systém Autobrake

Systém Autobrake je využíván při přistání nebo při přerušeném vzletu. Pilot v kokpitu nastaví pomocí přepínače (Obrázek 9, bod 1) jeden z módů: RTO⁷, OFF, 1, 2, 3 nebo MAX, dále se musí obě páky obracečů tahu (Obrázek 12) nacházet v poloze IDLE⁸, musí být detekované roztočení kol a musí být indikováno, že letoun je na zemi (Obrázek 10). Při módu OFF tomu tak není, jelikož nastavení OFF logicky vyřazuje systém Autobrake z provozu (1).



Obrázek 9 – Ovládání systému Autobrake v kokpitu, Zdroj: Autor

Popis Obrázek 9: 1. přepínač systému Autobrake; 2. kontrolka odpojeného systému Autobrake; 3. kontrolka nefunkčního systému Antiskid; 4. ukazatel brzdného tlaku na brzdě

⁷ Rejected Take-Off – Přerušený vzlet

⁸ Volnoběh



Obrázek 10 – Senzor indikující letadlo ve vzduchu/na zemi, Zdroj: Autor

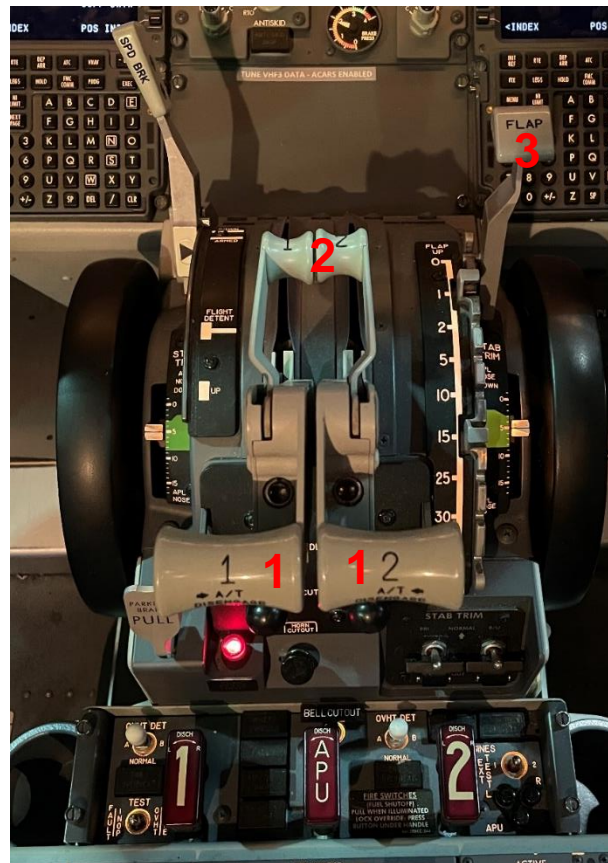
Módy 1, 2, 3 a MAX slouží k nastavení požadované celkové decelerace letounu. Pokud je kýžného zpomalování dosahováno hlavně kombinací obracečů tahu a aerodynamických brzd, tak se odlehčí zatížení brzd. Jakmile začne celková decelerace klesat, tak se brzdy sepnou více a tuto deceleraci udržují. Mód RTO je pro přerušný vzlet. Nastavuje se před samotným vzletem a po pilotem přerušeném vzletu (pohybem pák ovládající dopředný tah letounu do polohy IDLE) při GS vyšší, než 90 uzlů aplikuje maximální brzdou sílu (1).



Obrázek 11 – Panel počítače systému Autobrake v elektronické šachtě/šachtě avioniky používaný pro diagnostiku systému a jeho nastavení, Zdroj: Autor

1.2 Systém obracečů tahu

Obraceče tahu se ovládají z okruhu A, okruhu B, nebo s elektrickou energií poháněným čerpadlem skrze přepouštěcí ventil záložního hydraulického systému. Okruh A ovládá levý Thrust Reverser. Okruh B pak ovládá pravý. V případě výpadku jednoho ze systémů se spíná elektrické čerpadlo, které skrze ventil záložního hydraulického systému může kromě primárních kormidel ovládat i oba obraceče tahu (1).



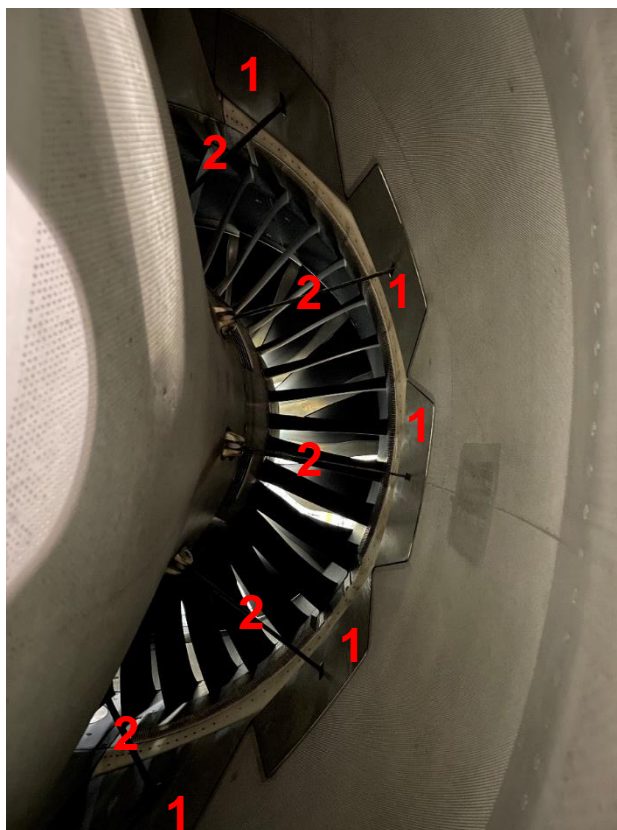
Obrázek 12 – Páky ovládání tahu motorů a konfigurace letounu, Zdroj: Autor

Popis Obrázek 12: 1. Páky ovládání dopředného tahu motorů (levého, pravého);
2. páky ovládání Thrust Reverserů; 3. páka ovládání vztlakových klapek



Obrázek 13 – Ventil ovládání T/R na motoru 2 znázorněný v Příloze 1, Zdroj: Autor

Po potřebném vstupu od pilota v podobě překlopení pák ovládání tahu motoru (Obrázek 12) do polohy pro volnoběžný zpětný tah se pomocí ovládacího ventilu T/R (Obrázek 13) na bocích motorů odsunou široké překryty motoru a odhalí tak dva svislé pásy, ve kterých najdeme speciální vložky. Tyto speciální vložky směřují vzduch ze studeného proudu turbínového motoru CFM LEAP-1B dopředu a zvyšují tak odpor vůči nabíhajícímu vzduchu a dále brzdí letoun svým celkovým tahem proti směru jeho pohybu. Vzduch od dmychadla procházející studenou cestou je zároveň přesměrováván celkem 10 deskami (5 na každé straně) zvané Blocking Door (Obrázek 14), které uzavřou další průchod vzduchu do výstupního ústrojí (1).



Obrázek 14 – Pohled zezadu do studeného proudu motoru CFM LEAP-1B, Zdroj: Autor

Popis Obrázek 14: 1. Blocking Door; 2. vodící tyčky

Tyto desky přeměrovávají proud vzduchu do výše zmíněných vložek, které fungují podobně jako žaluzie a vyfukují vzduch potřebným směrem. Obě vložky jsou rozděleny do 8 segmentů, kdy každý segment má svoje vlastní boční a dopředné natočení vzduchu. Toto usměrňování vzduchu jenom v určitých místech je dáno konstrukcí motoru a jeho umístěním na letounu pro nejvyšší efektivitu a spolehlivost systému. Vložky jsou na druhém motoru orientovány zrcadlově, aby se dosáhlo stejného efektu na obou stranách symetricky podél osy letadla (1).

1.3 Limitace současného stavu

Optimalizace využívání deceleračních systémů na letounech provádějící přerušení vzletu nebo přistání již bylo v minulosti tématem několika vědeckých prací. Žádná z nich se nezaměřovala na ekonomickou výhodnost této problematiky. Hlavním tématem těchto studií byla optimalizace využití brzdných systémů a systémů obracečů tahu pro dosažení co nejkratší brzdné dráhy bez ohledu na dopad na využívanou techniku, nebo ekonomickou stránku věci.



Alternativně se tyto vědecké práce věnovaly ekologickému dopadu využívání obracečů tahu při RTO, či při přistání.

Na základě Fleet Team Digest (3) a úkonu v AMM⁹ (4) pojednávajících o problémech s karbon-keramickými brzdami (oba dokumenty vydané firmou Boeing) vznikla otázka: „Jaké prostředky by měly být využívány k tomu, aby se tyto problémy neobjevovaly?“ Důvodem vytvoření výše zmíněných zpráv bylo zjištění, že brzdové lamely na 737 MAX se při vyšším zatěžování začínají opotřebovávat kvůli tepelným účinkům brždění. Zvýšená teplota je podle firmy Boeing důvod, proč se na lamelách objevují praskliny, které mají za následek zničení brzdového obložení (popraskáním jednotlivých vrstev). Potenciální odpovědí na otázku výše bylo začít více využívat systém obracečů tahu pro zmenšení náporu na brzdou soustavu. Po této myšlence ale vznikla další otázka, která se ptala na ekonomickou výhodnost provozování obou těchto systémů a položila základ této práci.

1.4 Aktuální způsoby využívání deceleračních systémů a provozní zvyky

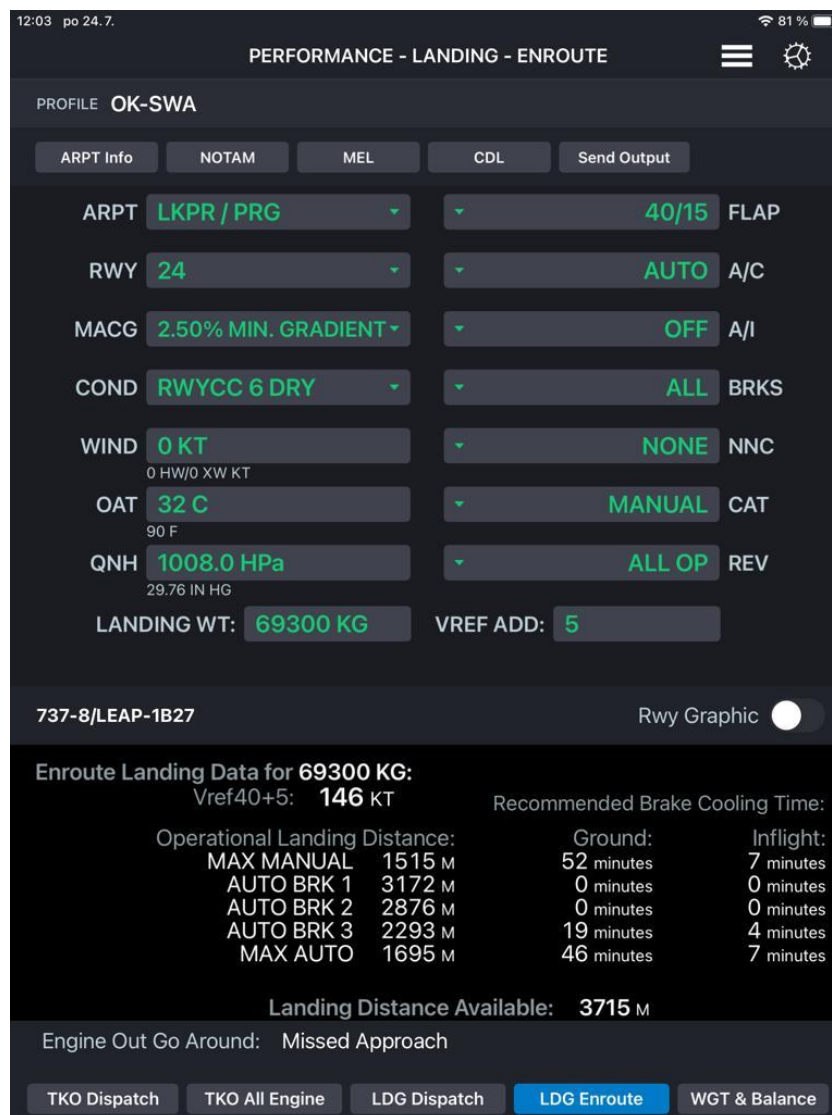
Veškeré následující informace jsou založené na konzultaci s panem Ing. Filipem Červeným, pilotem firmy Smartwings, který souhlasil s uvedením v práci a poskytl mi data důležitá k řešení této práce.

1.4.1 Aplikace OPT¹⁰

V kokpitu se pro určení brzdné dráhy a potřebného nastavení systému autobrake používá primárně aplikace od firmy Boeing pro tablety s názvem Onboard Performance Tool. Tato aplikace nabízí okamžitý přehled o potřebných délkách pro zastavení na daném letišti za daných podmínek a byla upravená přímo k požadavkům firmy Smartwings (kupříkladu prodloužení brzdnych drah o 15 % oproti tabulkovým hodnotám).

⁹ Aircraft Maintenance Manual – Manuál k údržbě letadla

¹⁰ Onboard Performance Tool – Palubní nástroj určování výkonů



Obrázek 15 – Rozhraní aplikace OPT, Zdroj: Ing. Filip Červený

V Obrázek 15 lze vidět ve dvou sloupcích pole pro úpravu proměnných, které při přistání mají svůj vliv na délku brzděné dráhy. Levý sloupec umožňuje nastavit podmínky na letišti přistání, pravý sloupec umožňuje nastavit aktuální informace o letišti. Poslední dvě pole pod těmito sloupci se věnují hmotnosti při přistání a přídatku k rychlosti přiblížení. Ve spodní třetině obrázku lze vidět vypočítané brzděné dráhy vztahované k nastavení systému Autobrake a následně časy potřebné k přirozenému ochlazení brzd buď na zemi nebo ve vzduchu. Zálohou k tomuto systému stále zůstává využití tabulek, pomocí kterých je tato práce řešena. Vůči těmto pomůckám jsou také všechny hodnoty získané z OPT zaokrouhlovány směrem nahoru, takže je použití OPT spojeno s vyššími brzděnými drahami.



Přídavek k rychlosti přiblížení se počítá jako polovina rychlosti čelního větru a celý přídavek k poryvům větru. Celková velikost tohoto přídavku nesmí překročit 15 uzlů a musí být alespoň 5 uzlů pod nejvyšší rychlostí při dané konfiguraci. Zároveň je počítáno s tím, že při podrovnání velká většina tohoto přídavku zmizí kvůli konstrukčnímu řešení letounu. Výrobce počítal s tím, že se zároveň s dotykem hlavního podvozku s dráhou stáhnou plynové páky na volnoběžný tah a výsledná ztráta rychlosti letu bude mít právě velikost výše zmíněného přídavku (5).

1.4.2 Podmínky na letišti přistání

Při přistání mohou panovat na letišti různé povětrnostní podmínky. Vítr vanoucí při vyšších rychlostech nutí piloty, aby se uchýlili k používání klapek v poloze 30, jelikož se poté letoun stává ovladatelnějším. Snižující se rychlost větru zvyšuje tendenci pilotů přistávat na klapky v nastavení 40, které je z pohledu brzdné dráhy příznivější. Běžné rychlosti větru do zad, při kterých se přistává, se pohybují do 10 uzlů. Při vyšších rychlostech větru do zad se, pokud je to možné, koná změna dráhy pro přistání na dráhu opačnou k té původní.

Stav dráhy při přistání je odstupňován číslicemi 6-0 od nejlepších možných adhezních podmínek až po ty nejhorší. Při létání na dráhy, které jsou kratší, se již využívá všech dostupných prostředků pro deceleraci při stavu s kódy 3 a 2. Kódy 1 a 0 znamenají přelet na záložní letiště. U delších drah (jako je například dráha na Letišti Václava Havla Praha) se mění jenom přístup ke dráze ve stavu s označením 3, kdy se automaticky nevyužívá plného možného brždění, ale uvažuje se o jednotlivých kombinacích použití deceleračních systémů.

1.4.3 Přehřívání brzd

Jak již bylo zmíněno výše, tak teplota brzd po přistání hraje velkou roli při rozhodování, jaké nastavení systému Autobrake použít. Z Obrázek 15 dole je zřejmé, že výběr vyšší intenzity brždění je spjata s delším časem čekání kvůli značnému zahřátí brzdné soustavy. V případě, že by vyšší nastavení systému Autobrake znamenalo příliš dlouhou čekací dobu pro bezpečné opětovné použití, tak se místo volnoběžného zpětného tahu použije ten plný, což způsobí nižší zatížení brzd a zkrátí se tím čas potřebný pro opakované použití brzd. Navíc se tím tolik nepoškozuje brzdové obložení při opakovaném brždění před vypršením této doby (například při pojíždění na stojánku). Podobného efektu lze dosáhnout použitím konfigurace klapek v poloze 40 místo 30, jelikož při přistání nižší rychlost znamená nižší kinetickou energii, kterou je potřeba ztratit.



2 Metodika výpočtu a určení proměnných

2.1 Vlastnosti letiště

Při výpočtu je potřeba pokrýt většinu ze všech scénářů, které mohou při přistání nastat. Všechny scénáře není možné popsat kvůli tomu, že může vzniknout závada na letounu. Příklad takové závady může být závada na podvozku, která zamezí jeho použití při přistání. Modelové letiště (letiště, které bude vybráno jako zastupující letiště pro výpočet) tedy musí mít vhodné parametry, abychom na něm bylo možno předvést scénáře ze všech dostupných dat, která jsou k dispozici. Data o hmotnostech letounů při přistání máme pouze z LKPR¹¹.

Nyní vyvstává otázka, zdali má cenu toto modelové letiště vytvářet uměle, nebo použít již existující. Nabízí se možnost využít LKPR jako modelové letiště vzhledem k faktu, že z přibližně 25 letišť zabírá právě LKPR největší procento přistání (kolem 25 %) (6). Více, než čtvrtinové zastoupení ve vzorku by mělo být dostačující kvůli tomu, že letouny tohoto typu budou na LKPR přistávat pravidelně. Mají na tomto letišti svoji základnu, kde probíhá jejich údržba.

2.1.1 Délka přistávací dráhy

Z dat nasbíraných během měsíce února vyjadřujících počet přistání na určitém letišti vyplývá, že nejvyšší procentuální zastoupení má LKPR s více, než 25 %. Druhé je HEMA¹² s necelými 10 % (6).

¹¹ ICAO kód pro letiště Václava Havla Praha

¹² ICAO kód pro letiště Marsa Alam v Egyptě



Tabulka 1 – Délky drah letišť v metrech a jejich orientace, procentuální poměr vůči celkovému počtu přistání a maximální vítr na jednotlivých letištích. Zdroj: Autor, (7)

IATA	ICAO	Délka dráhy [m]/HDG ¹³	% poměr	Max. vítr [kts] (8)
PRG	LKPR	3715/06	26,54	27
RMF	HEMA	3000/15	9,65	26
WAW	EPWA	3690/15	8,85	25
HRG	HEGN	4000/16	8,58	27
KTW	EPKT	3200/08	8,58	24
DXB	OMDB	4447/12	6,97	20
SLL	OOSA	3997/07	6,17	24
BTS	LZIB	3190/13	5,63	27
SID	GVAC	3272/01	5,09	23
FUE	GCFV	3406/01	3,22	25
TFS	GCTS	3200/08	2,68	31

Při průměrné délce dráhy 3556 m, maximu 4447 m a minimu 3000 m se jeví LKPR jako vhodný kandidát pro modelové letiště. Tato teorie je podporována faktem, že vážený průměr těchto délek je 3608 m. Na základě těchto poznatků budu v modelu počítat s délkou RWY na LKPR – **3715 m**.

2.1.2 Stav dráhy

Letoun ne vždy musí přistávat na suchou dráhu. Může ještě dojít k dešti, nebo ke sněžení, což značně ovlivňuje adhezi kola k povrchu dráhy. Na LKPR se běžně setkáváme se 4 brzdnými podmínkami. Dle tabulky níže (9) se jedná o kódy 3-6. Kódy 0-2 jsem se rozhodl nezahrnovat, jelikož pravděpodobnost, že tyto podmínky nastanou je malá (<1 % situací). Poté se většinou počítá s přeletem na záložní letiště, či plným možným využitím všech dostupných systémů decelerace, takže ve výpočtu nezahrnuji.

¹³ Heading



Tabulka 2 – Výčet možných podmínek na přistávací dráze. Zdroj: FCOM¹⁴ (9)

ADVISORY INFORMATION
Runway Surface Condition Correlation

RUNWAY CONDITION CODE	RUNWAY SURFACE CONDITION DESCRIPTION	REPORTED BRAKING ACTION
6	Dry	Dry
5	Wet (Smooth, Grooved or PFC) or Frost 3 mm (0.12 inches) or less of: Water, Slush, Dry Snow or Wet Snow	Good
4	Compacted Snow at or below -15°C OAT	Good to Medium
3	Wet (Slippery), Dry Snow or Wet Snow (any depth) over Compacted Snow Greater than 3 mm (0.12 inches) of: Dry Snow or Wet Snow Compacted Snow at OAT warmer than -15°C	Medium
2	Greater than 3 mm (0.12 inches) of: Water or Slush	Medium to Poor
1	Ice	Poor
0	Wet Ice, Water on top of Compacted Snow, Dry Snow or Wet Snow over Ice	Nil

Ve výpočtu tedy budou aplikovány možné aktuální podmínky s označením **3, 4, 5 a 6**.

2.1.3 Rychlosti větru

Boeing 737 MAX se svými konstrukčními limity dokáže vyrovnat s bočním větrem při přistání o velikosti 32 kts, na RWY stavu 3 - Medium pouze 25 kts (10). Do modelu vzhledem k maximální hodnotě větru bude vhodné počítat s 0-32 kts protivětru, větru do zad v hodnotách 0-10 kts. Piloti si při možném přistání s větrem v zádech spíše vyberou přistání na opačnou dráhu, protože pak lze počítat s výhodami přistání proti větru. Pokud masa vzduchu naráží kolmo na podélnou osu letounu, tak nijak nealteruje rychlost dopřednou. Na základě hodnot z Tabulka 1 ohledně maximální rychlosti větru budu počítat s nejvyšší hodnotou 30 kts.

Pokud boční vítr nefouká kolmo k podélné ose letounu, tak se dá rychlost rozdělit na složku kolmou a rovnoběžnou s touto osou. V tom případě můžeme opět ignorovat boční složku (pokud je menší, než 32 uzlů) a soustředit se pouze na rovnoběžnou, která v tu chvíli nese identické vlastnosti protivětru, či větru do zad. I tady tedy zahrnuji možný vítr do zad o velikosti 10 kts. Výsledné dosazované hodnoty budou: **-10, 0, 10, 20, 30 uzlů**.

2.1.4 Teplota vzduchu

Podobně jako v předchozím bodě je třeba počítat s aktuální teplotou vzduchu. Teplejší vzduch má menší hustotu, což snižuje celkový odpor letounu vůči nabíhajícímu vzduchu. Dále se snižuje vztlak, takže bude potřeba vyšší rychlosti pro udržení letounu v letu, a kvůli snížení

¹⁴ Flight Crew Operations Manual



účinnosti motoru je nutnost vyšších otáček pro zaručení stejného tahu. Účinnost obracečů tahu se snižuje. Pro výpočet tabulka korekcí udává opravu o 10 stupňů nad a pod hodnotu MSA¹⁵ (9). Dle vzorce pro výpočet podmínek MSA pro výšku 1234 stop nad mořem je hodnota teploty pro tuto výšku 12.5 °C

Na základě analýzy teplot v průběhu posledního roku z METARů (8) na LKPR se teploty přibližně pohybují od -12 °C do 35 °C. Pro výpočet budu vzhledem k rozsahu teplot a hodnotě teploty MSA v dané výšce používat hodnoty **-8 °C, 2 °C, 12 °C, 22 °C, 32 °C**. Takto odstupňované teploty si volím z toho důvodu, že v tabulkách pro výpočet brzdné dráhy jsou korekce odstupňované po MSA ± 10°.

2.2 Vlastnosti letounu

2.2.1 Hmotnost při přistání

Maximální hmotnost letounu při přistání je 69 309 kg (10). Reálné hodnoty se pohybují od přibližně 46 do 68 tun. Výběr několika typických rozsahů přistávacích hmotností získávám z tabulky LAW letounů přistávajících na letišti LKPR v daný den a čas (6). Pro výpočet bude použita výchozí hodnota 65 tun, jelikož je to výchozí hodnota v tabulkách pro zjištění délky dráhy potřebné pro přistání. Dále pak **70, 65, 60, 55, 50 a 45 tun**, jelikož ve zmíněných tabulkách lze provádět korekci změny hmotnosti s krokem 5 tun (10).

2.2.2 Konfigurace letounu

Dle letové příručky Boeingu 737 MAX a dodávaných grafů může letoun přistávat za standardních podmínek s klapkami **v polohách 30 a 40**, proto budu uvažovat pouze tyto dvě možné situace. Nestandardní situace se opět dějí ve velice malém procentu přistání (9).

2.2.3 Rychlost při přistání

Z dostupných dat se rychlosti letounů při přistání pohybují mezi 110-150 uzly (6). Letová příručka uvádí rozsah 122-159 uzlů pro FLAPS¹⁶ 30 a 116-151 uzlů pro FLAPS 40 (9). Rychlost na přiblížení je zobrazovaná FMS¹⁷ po načtení aktuální hmotnosti a konfigurace letounu. Kontrolu ke správnosti této rychlosti může poskytnout zmiňovaná aplikace OPT na tabletech posádky letounu.

¹⁵ Mezinárodní Standardní Atmosféra

¹⁶ Klapky

¹⁷ Flight Management System – Systém řízení letu



2.3 Náklady na údržbu a provoz

2.3.1 Brzdový systém

Údržba brzdového systému je svým způsobem jednoduchá. Není potřeba rozebírat jednotlivé komponenty samotného brzdíče a měnit jednu lamelu po druhé, ale dojde k tomu, že se sejme celý brzdíč a vymění se za nový. Tato „rychlá“ výměna trvá 3-4 hodiny a probíhá pokud tzv. Indicator Pin upozorňuje na nízké množství brzdového obložení, nebo po zjištěné závadě. Mezi tyto závady patří mimo jiné příliš nízká rezerva obložení na lamelách (Obrázek 4), nebo popraskané části lamel způsobené opakovaným bržděním (například při pojíždění ke stojánce kvůli čekání na křižovatkách pojezdových drah). Z poskytnutých dat lze určit, že brzdový systém je udržován průměrně po 1295,72 cyklech. Cyklem se rozumí přistání od přeletu nad prahem dráhy po zastavení nebo opuštění dráhy na jednom z exitů. Maximálně 2141 a minimálně 107 cyklech (6).

Vyšší stupeň nastavení systému Autobrake má za následek i vyšší opotřebení celých kol kvůli prostupu tepla jakožto následek brždění. Z tohoto důvodu se musí brát v potaz i výměna celého kola způsobená vyšším využíváním brzd. Vyšší zatěžování brzd se taktéž projevuje častějším popraskáním karbonových obložení a kovových částí, které je drží pohromadě (klipů). Z tohoto důvodu bylo doporučováno využívat při přistání nastavení klapek v poloze 40, což společně s nižší rychlostí na přiblížení zmenšuje brzdnou dráhu, díky čemuž je možnost využít nižšího nastavení intenzity brždění. Takto namáhané brzdy mají o třetinu menší životnost oproti nepřetěžovaným protějškům (6).

Běžně se celá brzda musí měnit po průměrně 1712 cyklech. Cyklem se rozumí přistání od přeletu nad prahem dráhy po zastavení nebo opuštění dráhy na jednom z výjezdů. K opravě kovových částí, které drží lamelu pohromadě, dochází průměrně po 1296 cyklech. Cena výměny celé brzdy je 41 135 EUR¹⁸, cena opravy klipů je 5 650 EUR. Jeden cyklus na jednom kole (při rozpočítání nákladů na opravu/výměnu brzdíče na průměrný počet cyklů před závadou) stojí přibližně 681,29 Kč. Na celý letoun tedy jeden cyklus stojí **přibližně 2725 Kč** (6).

2.3.2 Obraceč tahu

Údržba obracečů tahu je nutná pouze v případě závady systému. Z dostupných dat je frekvence závad několikanásobně menší nežli na brzdovém systému, proto může být

¹⁸ Euro – k datu 16.7. kurz přibližně 24 Kč

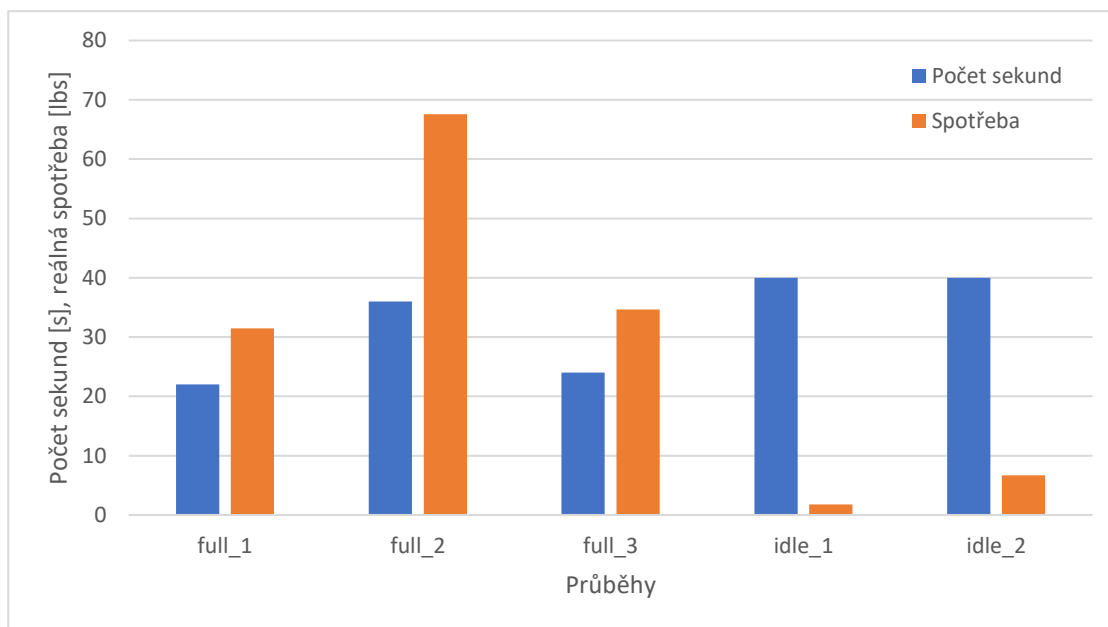


zanedbána (6). Ohledně provozních nákladů musíme počítat s přírůstkem spotřeby paliva z důvodu využití vyšších otáček motoru pro zvýšení zpětného tahu.

Tabulka 3 – Spotřeba paliva jednotlivými motory při nastavení obracečů tahu v polohách IDLE/FULL. Zdroj: (6), Autor

Průběh (6)	Počet sekund	Průměr spotřeby ENG1 [PPH ¹⁹]	Průměr spotřeby ENG2 [PPH]	Spotřeba ENG1 [lbs]	Spotřeba ENG2 [lbs]	Celková spotřeba [lbs]
full_1	22	3308,4	3319,3	20,22	20,28	40,50
full_2	36	4112	4124,9	41,12	41,25	82,37
full_3	24	3352,7	3326,7	22,35	22,18	44,53
idle_1	40	826,8	812,8	9,19	9,03	18,22
idle_2	40	1040,4	1038,8	11,56	11,54	23,10

Graf 1 – Průběhy využití zpětného tahu, Zdroj: (6), Autor



V tabulce a grafu výše lze vyčíst vždy vybraný průběh spotřeby paliva při volnoběžném, nebo plném tahu produkovaném T/R. Sekundy se začínají počítat od doby, kdy alespoň dva ze čtyř indikátorů (Obrázek 10) vykazují letoun na zemi a pomyslné stopky zastavují tehdy, když se letoun pohybuje rychlostí nižší, než 20 uzlů GS²⁰. Následně jsou přepočítány ze spotřeby v librách za hodinu a tohoto počtu sekund celkovou spotřebu jednotlivých motorů a celého letounu.

¹⁹ Pounds Per Hour – libry za hodinu

²⁰ Ground Speed



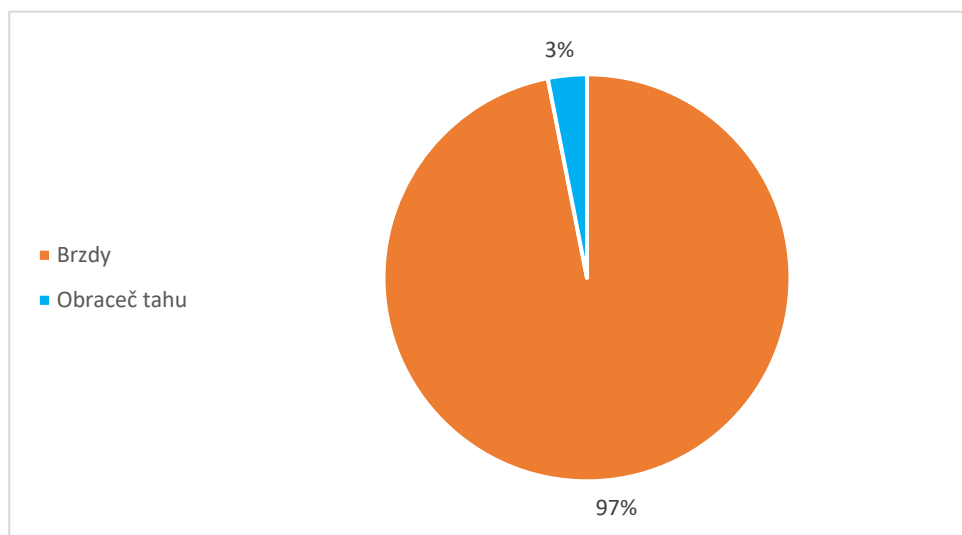
Cena paliva ke konci měsíce června se rovná 23,16 CZK/dm³ (11). S hustotou paliva 0,8 kg/dm³, přepočtem 1 lb = 0,4536 kg a za předpokladu, že dle dostupných dat motor CFM LEAP-1B na volnoběh spotřebuje přibližně 740 PPH (6), můžeme určit množství paliva, které je spotřebováno navíc čistě kvůli funkci obraceče tahu. Následující tabulka navazuje na Tabulka 3 a lze v ní nalézt finální cenu provozu jednotlivých nastavení obraceče tahu na základě průběhů výše.

Tabulka 4 – Tabulka ukazující upravené spotřeby a náklady na provoz. Zdroj: Autor

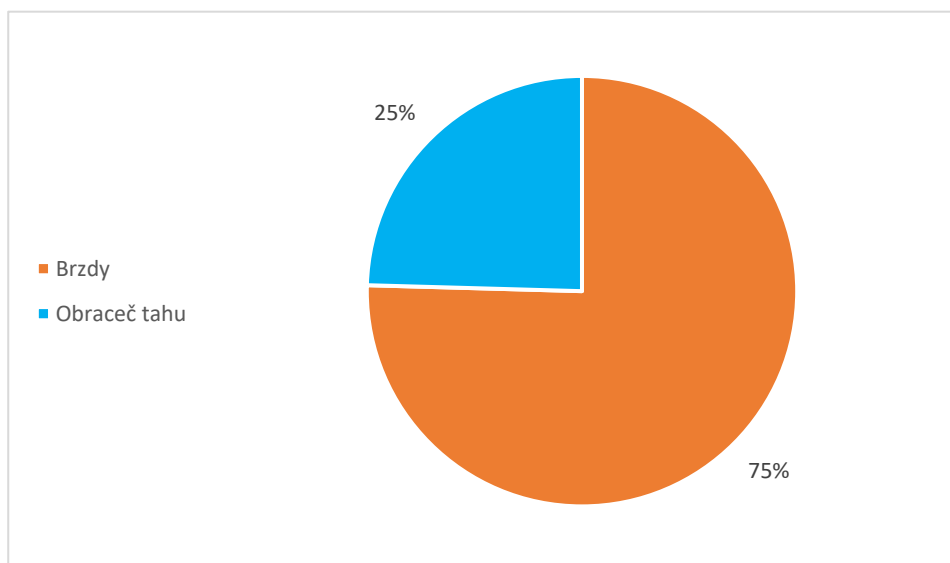
Průběh	Spotřeba navíc levý [pph]	Spotřeba navíc pravý [pph]	Spotřeba levý [lbs]	Spotřeba pravý [lbs]	Celková spotřeba [lbs]	Celková spotřeba [kg]	Celkový objem [litr]	Cena [Kč]
full_1	2568,40	2579,30	15,70	15,76	31,46	14,27	17,84	413,10
full_2	3372,00	3384,90	33,72	33,85	67,57	30,65	38,31	887,30
full_3	2612,70	2586,70	17,42	17,24	34,66	15,72	19,65	455,18
idle_1	86,80	72,80	0,96	0,81	1,77	0,80	1,01	23,29
idle_2	300,40	298,80	3,34	3,32	6,66	3,02	3,77	87,43

Na základě Tabulka 4 lze říct, že použití zpětného tahu na volnoběh je za **87 Kč** a použití plného zpětného tahu za **887 Kč**. Obě tyto cenovky platí na jeden cyklus.

Graf 2 – Poměr cen použití brzd vs Idle Reverse Thrust na jeden cyklus, Zdroj: Autor



Graf 3 – Poměr cen použití brzd vs Full Reverse Thrust na jeden cyklus, Zdroj: Autor



2.4 Nastavení systému AUTOBRAKE a T/R

Předchozí kapitoly se věnovaly určení proměnných, které mají vliv na celkovou brzdnou dráhu. Nyní ji za pomoci hodnot od výrobce uvedených v FCOM mohou být postupným aplikováním jednotlivých proměnných spočítané. Výpočet je prováděn vzhledem k používání systému Autobrake pouze v nastavení 1, 2 a 3 a T/R v polohách idle/full. Výrobce v tabulkách pro zjištění brzdé dráhy uvádí hodnoty za využití plného zpětného tahu motorů. Korekci s názvem „Reverse Thrust ADJ – NO REV“ bude ve výpočtu brána jako T/R v poloze idle.

Následující tabulky délek brzdných drah jsou spočteny výrobcem pro nulovou výšku nad mořem, VREF30/VREF40²¹, s funkčními oběma motory, s plným zpětným tahem a s využitím všech dostupných prostředků pro zvýšení aerodynamického odporu. Zahrnují v sobě také vzdušnou vzdálenost od prahu dráhy k Touchdown zóně spojenou s časem podrovnání o délce 7 sekund. Veškeré referenční vzdálenosti a korekce byly zvýšeny o 15 % z důvodu zachování úrovně bezpečnosti (9).

²¹ Referenční rychlost přiblížení při klapkách v polohách 30/40



Tabulka 5 – Brzdná dráha za běžných podmínek s použitím klapek 30, Zdroj: (9)

Normal Configuration Landing Distance Flaps 30

	LANDING DISTANCE AND ADJUSTMENTS (M)									
	REF DIST	WT ADJ	ALT ADJ	WIND ADJ	SLOPE ADJ	TEMP ADJ	APP SPD ADJ	REVERSE THRUST ADJ		
BRAKING CONFIGURATION	65000 KG LANDING WEIGHT	PER 5000 KG ABV/BLW 65000 KG	PER 1000 FT STD/HIGH*	PER 10 KTS HEAD/ TAIL WIND	PER 1% DOWN/ UP HILL	PER 10°C ABV/ BLW ISA	PER 5 KTS ABOVE VREF30	ONE REV	NO REV	

Dry Runway

MAX MANUAL	1365	80/-85	35/45	-65/210	15/-15	35/-35	65	20	35
AUTOBRAKE MAX	1535	85/-95	40/50	-70/225	5/0	40/-40	80	5	10
AUTOBRAKE 3	2050	120/-140	60/75	-100/335	0/0	60/-60	125	0	0
AUTOBRAKE 2	2570	165/-185	80/105	-135/445	15/-35	80/-80	130	35	35
AUTOBRAKE 1	2830	195/-210	95/125	-155/515	60/-75	90/-90	125	200	255

Good Reported Braking Action

MAX MANUAL	1680	115/-120	60/80	-95/335	30/-30	55/-55	90	70	135
AUTOBRAKE MAX	1715	120/-120	60/80	-95/335	30/-30	55/-55	95	75	145
AUTOBRAKE 3	2080	125/-140	60/80	-105/340	10/-10	60/-65	125	0	0
AUTOBRAKE 2	2570	170/-185	80/105	-135/450	25/-35	80/-80	130	35	35
AUTOBRAKE 1	2830	195/-210	95/125	-155/515	65/-75	90/-90	125	200	255

Good To Medium Reported Braking Action

MAX MANUAL	1860	120/-125	60/80	-100/360	50/-40	55/-55	90	100	210
AUTOBRAKE MAX	1895	120/-125	60/80	-100/355	45/-40	55/-55	95	105	215
AUTOBRAKE 3	2100	125/-140	60/80	-110/360	20/-15	65/-65	125	20	70
AUTOBRAKE 2	2570	170/-185	80/105	-135/450	25/-35	80/-80	130	35	35
AUTOBRAKE 1	2830	195/-210	95/125	-155/515	65/-75	90/-90	125	200	255

Medium Reported Braking Action

MAX MANUAL	1990	125/-130	60/85	-105/380	60/-50	60/-60	90	135	290
AUTOBRAKE MAX	2025	125/-135	65/85	-110/380	60/-50	60/-60	95	140	300
AUTOBRAKE 3	2155	130/-145	65/85	-115/390	40/-25	65/-65	125	65	190
AUTOBRAKE 2	2570	170/-185	80/105	-135/455	40/-40	80/-80	130	45	65
AUTOBRAKE 1	2830	195/-210	95/125	-155/515	65/-75	90/-90	125	200	255



Tabulka 6 - Brzdná dráha za běžných podmínek s použitím klapek 40, Zdroj: (9)

Normal Configuration Landing Distance Flaps 40

	LANDING DISTANCE AND ADJUSTMENTS (M)								
	REF DIST	WT ADJ	ALT ADJ	WIND ADJ	SLOPE ADJ	TEMP ADJ	APP SPD ADJ	REVERSE THRUST ADJ	
BRAKING CONFIGURATION	65000 KG LANDING WEIGHT	PER 5000 KG ABV/BLW 65000 KG	PER 1000 FT STD/HIGH*	PER 10 KTS HEAD/ TAIL WIND	PER 1% DOWN/ UP HILL	PER 10°C ABV/ BLW ISA	PER 5 KTS ABOVE VREF40	ONE REV	NO REV

Dry Runway

MAX MANUAL	1285	90/-75	35/45	-60/205	15/-10	30/-35	65	20	30
AUTOBRAKE MAX	1425	95/-85	40/50	-70/220	5/0	40/-40	80	5	10
AUTOBRAKE 3	1890	140/-125	60/75	-100/325	0/0	55/-55	120	0	0
AUTOBRAKE 2	2370	185/-170	80/100	-130/430	5/-30	75/-75	130	15	15
AUTOBRAKE 1	2630	210/-195	95/120	-150/500	50/-65	80/-85	125	155	190

Good Reported Braking Action

MAX MANUAL	1560	125/-110	55/75	-90/325	30/-25	50/-50	90	60	110
AUTOBRAKE MAX	1595	130/-110	55/80	-90/320	30/-25	50/-50	95	60	120
AUTOBRAKE 3	1915	140/-130	60/75	-100/330	10/-5	55/-60	120	0	0
AUTOBRAKE 2	2375	185/-170	80/105	-130/435	20/-30	75/-75	135	15	15
AUTOBRAKE 1	2630	210/-195	95/120	-150/500	55/-65	80/-85	125	155	190

Good To Medium Reported Braking Action

MAX MANUAL	1740	130/-115	60/80	-95/345	45/-40	50/-50	90	85	180
AUTOBRAKE MAX	1775	135/-115	60/80	-95/345	45/-40	55/-55	95	90	185
AUTOBRAKE 3	1940	140/-130	60/80	-105/350	20/-15	60/-60	120	20	70
AUTOBRAKE 2	2375	185/-170	80/105	-130/435	20/-30	75/-75	135	15	15
AUTOBRAKE 1	2630	210/-195	95/120	-150/500	55/-65	80/-85	125	155	190

Medium Reported Braking Action

MAX MANUAL	1870	135/-120	60/80	-105/365	60/-50	55/-55	90	120	255
AUTOBRAKE MAX	1905	140/-125	60/80	-105/370	60/-50	55/-55	95	125	260
AUTOBRAKE 3	1995	145/-130	65/85	-110/380	40/-25	60/-60	120	65	185
AUTOBRAKE 2	2375	185/-170	80/105	-130/440	30/-30	75/-75	135	25	45
AUTOBRAKE 1	2630	210/-195	95/120	-150/500	55/-65	80/-85	125	155	190

Vzdálenosti v Tabulka 5 a Tabulka 6 je nutné opravit o korekce výšky letiště nad mořem. Korekce sklonu dráhy se neaplikuje, jelikož LKPR žádný výrazný nemá. Ke korekcím ohledně obracečů tahu jsem se již vyjadřoval výše. Z tabulek bylo vyřazeno brždění za využití maximálního nastavení systému Autobrake i maximálního manuálního brždění, jelikož se využívají pouze v nouzových situacích. Některé referenční vzdálenosti tedy ve výpočtu nehrají roli a zbylé, opravené jsou k nalezení v Tabulka 7 a Tabulka 8.



Tabulka 7 – Opravené referenční vzdálenosti vzhledem ke stavu RWY s použitím klappek 30,

Zdroj: Autor

Dry - 6	Referenční vzdálenost	Good - 5	Referenční vzdálenost	G-M-4	Referenční vzdálenost	Medium - 3	Referenční vzdálenost
A-3	2110	A-3	2140	A-3	2160	A-3	2220
A-2	2650	A-2	2650	A-2	2650	A-2	2650
A-1	2925	A-1	2925	A-1	2925	A-1	2925

Tabulka 8 – Opravené referenční vzdálenosti vzhledem ke stavu RWY s použitím klappek 40,

Zdroj: Autor

Dry - 6	Referenční vzdálenost	Good - 5	Referenční vzdálenost	G-M-4	Referenční vzdálenost	Medium - 3	Referenční vzdálenost
A-3	2110	A-3	2140	A-3	2160	A-3	2220
A-2	2650	A-2	2650	A-2	2650	A-2	2650
A-1	2925	A-1	2925	A-1	2925	A-1	2925



3 Výsledky

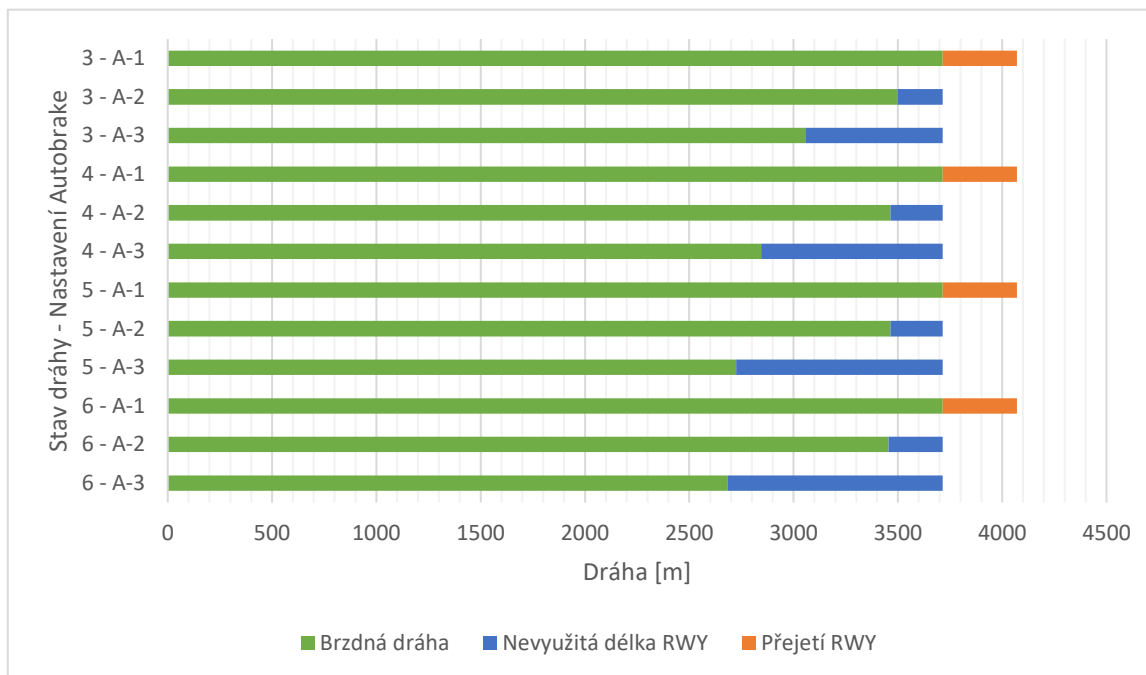
3.1 Nejhorší možné situace při přistání

Při vyhodnocování výsledků vyšlo najevo, že nejlepší způsob jejich interpretace bude od těch nejméně příznivých. Důvodem zůstává jednoduchost omezení intervalu posuzovaných výsledků. Na konci kapitoly 2.3.2 je z Graf 2 a Graf 3 zřejmé, že v celkové ceně na jeden cyklus je použití obracečů tahu oproti brzdám výrazně menší položkou. Využívání vyššího nastavení systému Autobrake a tím zapříčiněné vyšší zatěžování brzd má za následek vyšší šanci k poškození brzdového obložení. Kvůli snížení nákladů na údržbu brzdného systému se jeví jako výhodné používat nižší nastavení systému Autobrake. Následující výpočty vycházejí z nejhorší možné situace při přistání. Takové podmínky jsou nejvyšší možná teplota na letišti (32 °C), nejvyšší možná přistávací hmotnost (MLAW = 69 309 kg) a nejvyšší možný vítr do zad (10 uzlů). Zbylé proměnné (stav dráhy, nastavení systému Autobrake, poloha klapek a využití volnoběžného, nebo plného zpětného tahu) jsou předmětem výpočtů v následujících tabulkách a grafech. Vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR.

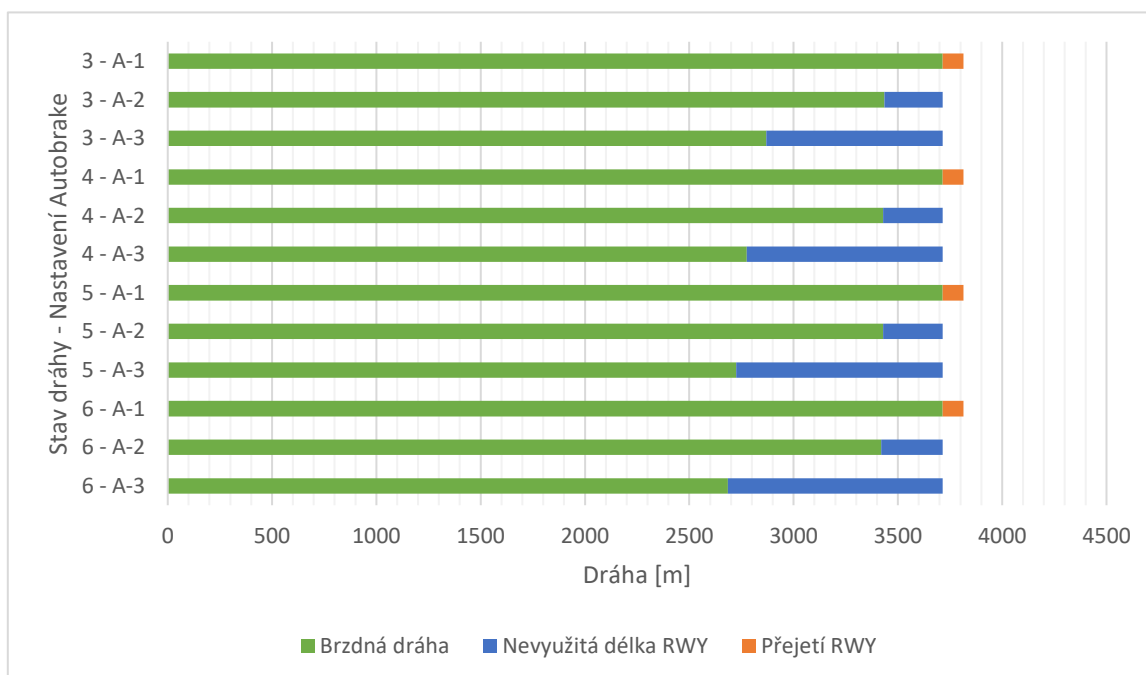
Tabulka 9 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 30 při nejhorší možné situaci, vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR, Zdroj: Autor

Stav dráhy	Nastavení Autobrake	Idle T/R	Full T/R
Dry - 6	A-3	2685	2685
	A-2	3455	3420
	A-1	4070	3815
Good - 5	A-3	2725	2725
	A-2	3465	3430
	A-1	4070	3815
G-M-4	A-3	2845	2775
	A-2	3465	3430
	A-1	4070	3815
Medium - 3	A-3	3060	2870
	A-2	3500	3435
	A-1	4070	3815

Graf 4 – Vyobrazení brzdných drah, Idle T/R, Flaps 30, nejnepříznivější korekce, Zdroj: Autor



Graf 5 – Vyobrazení brzdných drah, Full T/R, Flaps 30, nejnepříznivější korekce, Zdroj: Autor

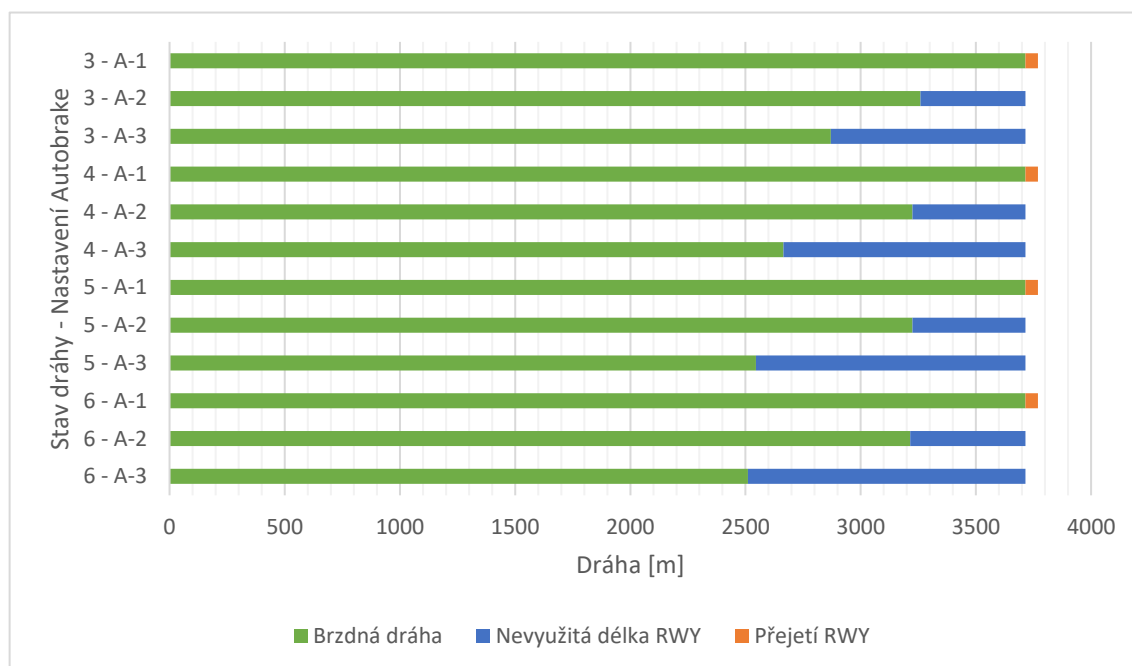




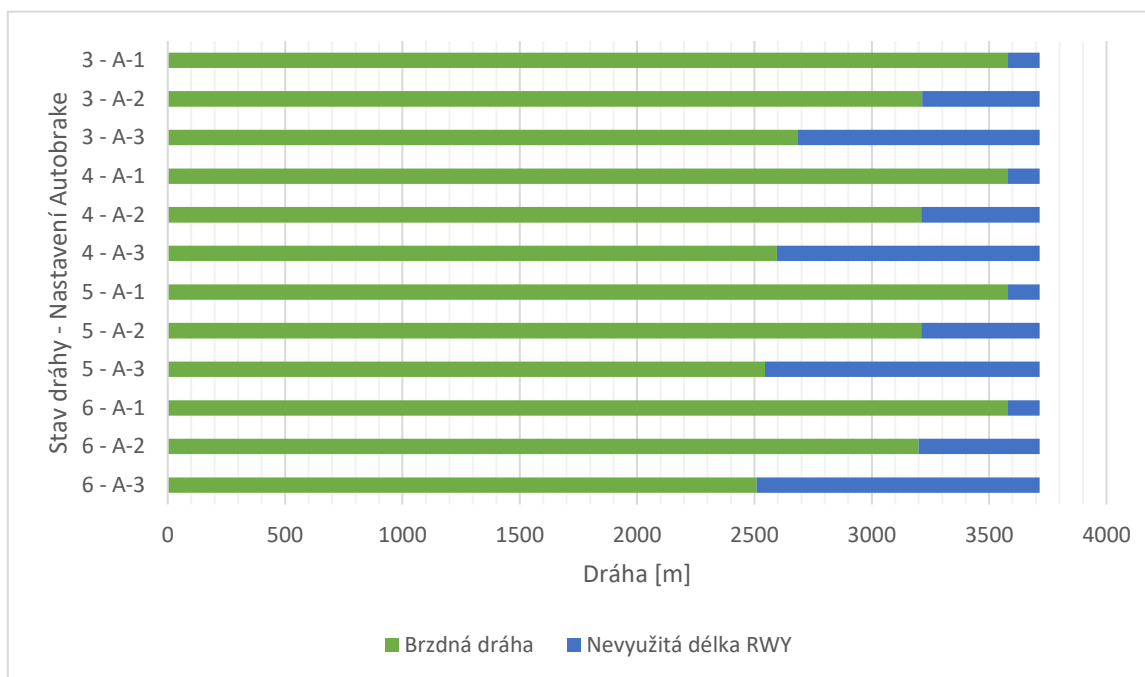
Tabulka 10 - Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 40 při nejhorší možné situaci, vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR, Zdroj: Autor

Stav dráhy	Nastavení Autobrake	Idle T/R	Full T/R
Dry - 6	A-3	2510	2510
	A-2	3215	3200
	A-1	3770	3580
Good - 5	A-3	2545	2545
	A-2	3225	3210
	A-1	3770	3580
G-M-4	A-3	2665	2595
	A-2	3225	3210
	A-1	3770	3580
Medium - 3	A-3	2870	2685
	A-2	3260	3215
	A-1	3770	3580

Graf 6 – Vyobrazení brzdných drah, Idle T/R, Flaps 40, nejnepříznivější korekce, Zdroj: Autor



Graf 7 – Vyobrazení brzdných drah, Full T/R, Flaps 40, nejnepříznivější korekce, Zdroj: Autor



Po aplikaci korekcí do opravených referenčních vzdáleností vyjdou hodnoty v Tabulka 9 a Tabulka 10. Na první pohled je zřejmé, že použití klapek 40 je z pohledu brzdné dráhy výhodnější. Důvodem je nižší rychlost přiblížení, tudíž i nižší kinetická energie. Z Graf 4, Graf 5, Graf 6 a Graf 7 lze vyčíst, jaká délka RWY je využita k brždění, jaká je zbývající délka dráhy po zastavení a popřípadě jakou brzdnou dráhu by letoun potřeboval k tomu, aby zastavil po dosažení konce RWY. Je zřejmé, že pouze využití plného zpětného tahu v kombinaci s klapkami v poloze 40 umožňuje výběr jakéhokoliv nastavení systému Autobrake. Letoun je při těchto podmínkách schopen zastavit v limitech RWY na dráze v jakémkoliv definovaném stavu.

Na základě těchto poznatků vzniká první doporučení leteckým společnostem provozující B-737 MAX. Toto doporučení bere v potaz nejhorší možné podmínky při přistání. Pokud je to možné, tak používat co nejnižší nastavení systému Autobrake, kdy nastavení 2 je pro výše zmíněné scénáře dostačující. Obdobně používat vyšší nastavení zpětného tahu, ideálně Full Reverse Thrust. Nakonec přistávat v konfiguraci klapek v poloze 40.



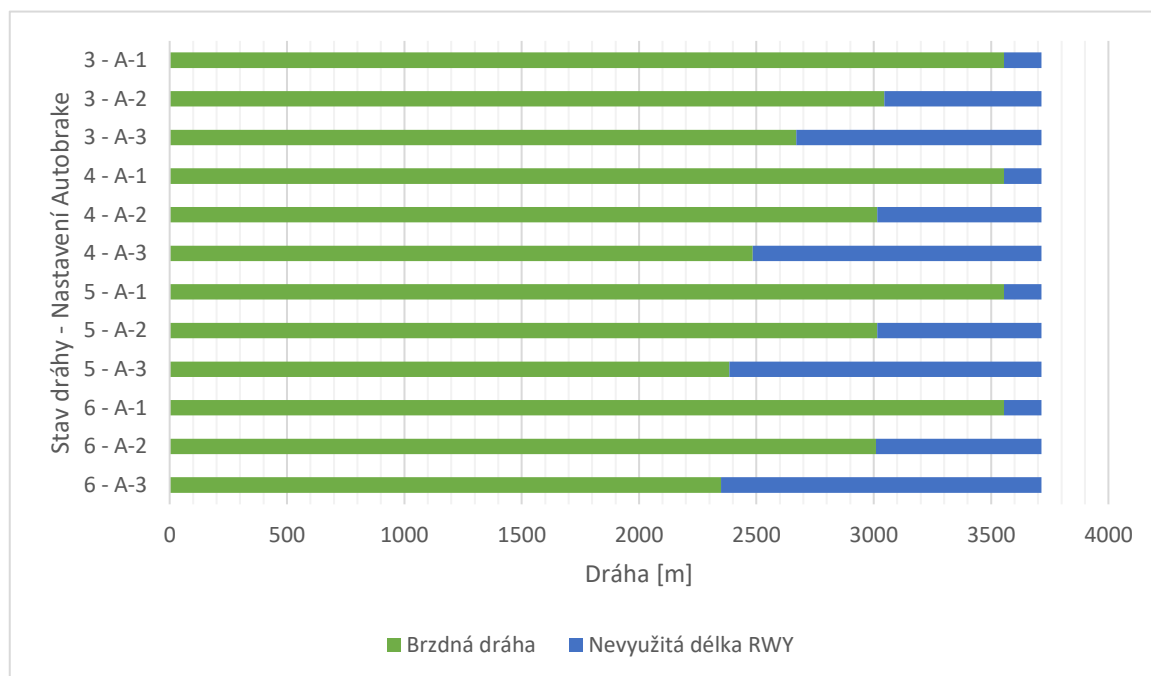
3.2 Nejhorší možná situace s bezvětrím, nebo LAW = 65 tun při přistání

Následující výpočty se věnují jiným než nejnepříznivějším možným situacím při přistání. Oproti výše zmíněným jsou aplikované korekce buď pro bezvětrí, nebo pro základní hmotnost při přistání (65 tun). Ostatní proměnné (v prvním případě hmotnost a teplota vzduchu, v druhém případě rychlost a směr větru a teplota vzduchu) zůstávají na stejně nepříznivých hodnotách.

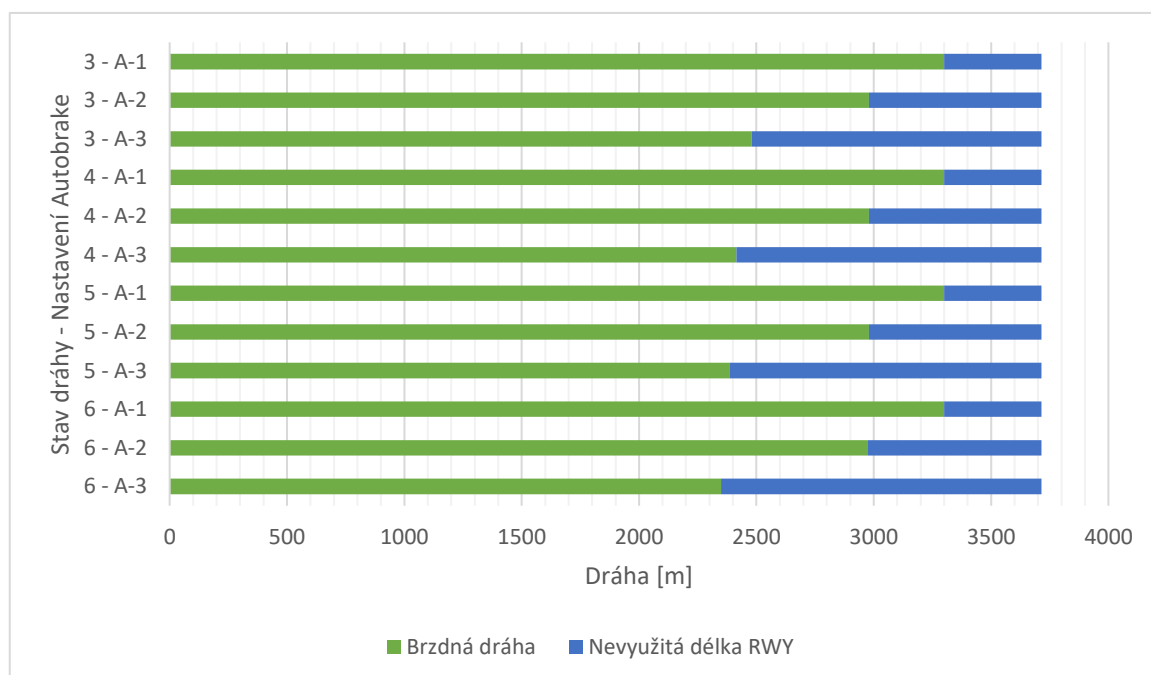
Tabulka 11 – Výsledné dráhy při použití klapky v poloze 30 při nejhorší možné situaci a bezvětrí, Zdroj: Autor

Stav dráhy	Nastavení Autobrake	Idle T/R	Full T/R
Dry - 6	A-3	2350	2350
	A-2	3010	2975
	A-1	3555	3300
Good - 5	A-3	2385	2385
	A-2	3015	2980
	A-1	3555	3300
G-M-4	A-3	2485	2415
	A-2	3015	2980
	A-1	3555	3300
Medium - 3	A-3	2670	2480
	A-2	3045	2980
	A-1	3555	3300

Graf 8 – Vyobrazení brzdých drah, Idle T/R, Flaps 30, nejnepříznivější korekce a bezvětří
Zdroj: Autor



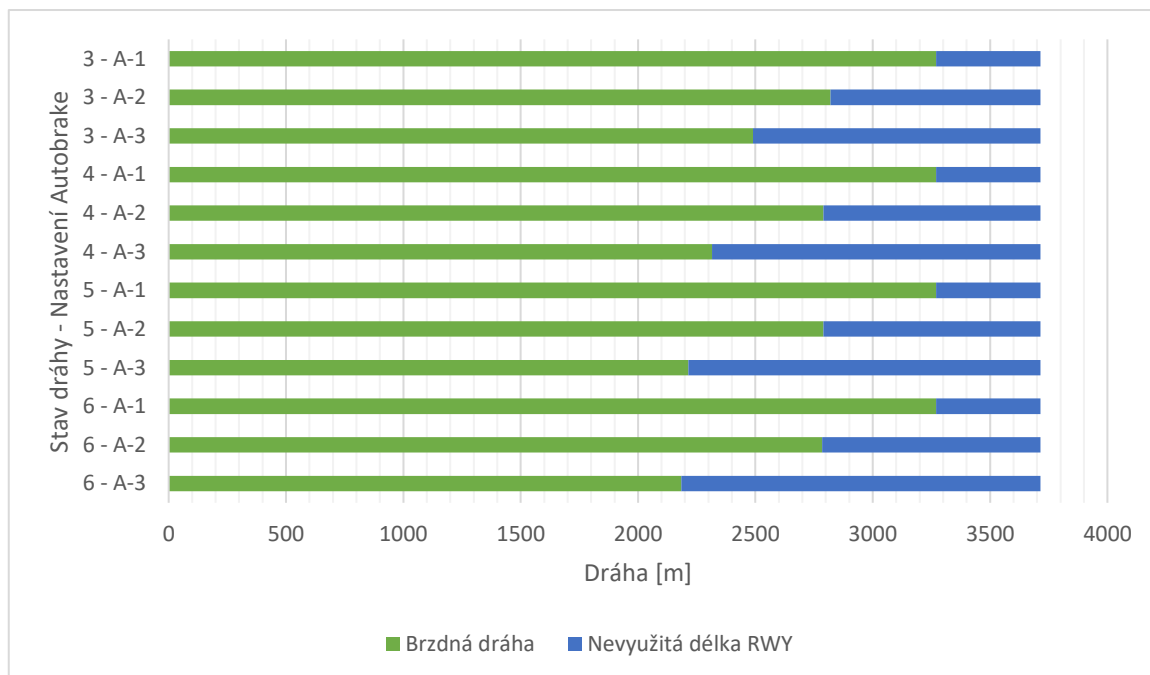
Graf 9 – Vyobrazení brzdých drah, Full T/R, Flaps 30, nejnepříznivější korekce a bezvětří
Zdroj: Autor



Tabulka 12 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 40 při nejhorší možné situaci a bezvětří, Zdroj: Autor

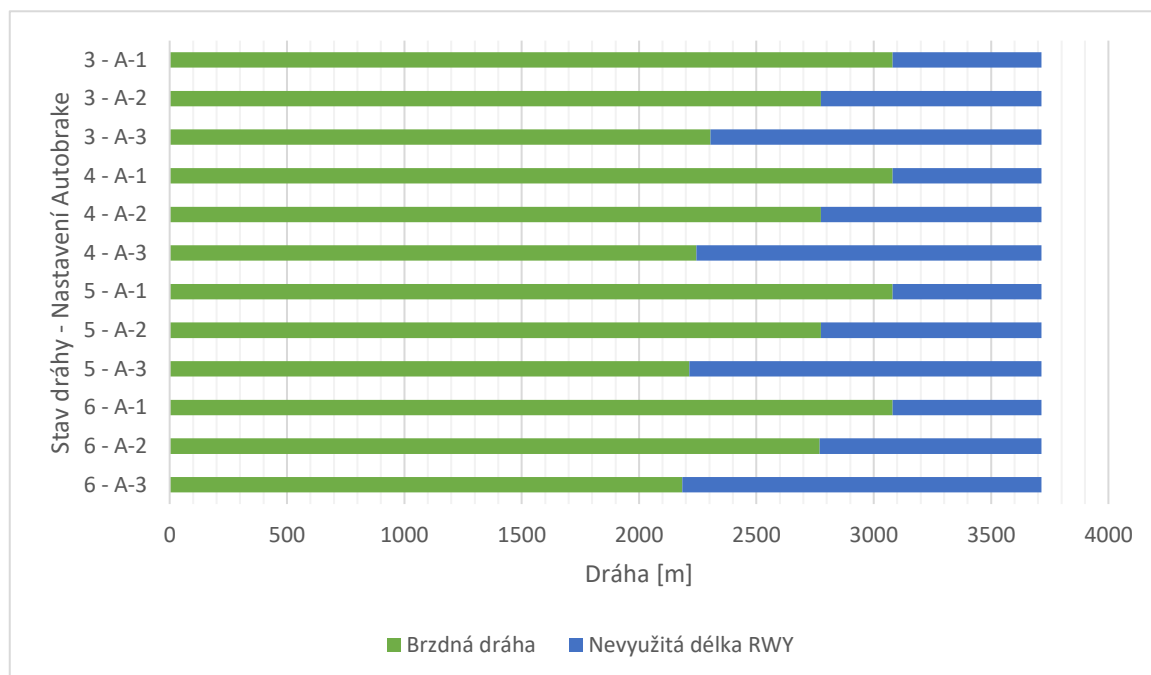
Stav dráhy	Nastavení Autobrake	Idle T/R	Full T/R
Dry - 6	A-3	2185	2185
	A-2	2785	2770
	A-1	3270	3080
Good - 5	A-3	2215	2215
	A-2	2790	2775
	A-1	3270	3080
G-M-4	A-3	2315	2245
	A-2	2790	2775
	A-1	3270	3080
Medium - 3	A-3	2490	2305
	A-2	2820	2775
	A-1	3270	3080

Graf 10 – Vyobrazení brzdných drah, Idle T/R, Flaps 40, nejnepříznivější korekce a bezvětří
Zdroj: Autor



Graf 11 – Vyobrazení brzdných drah, Full T/R, Flaps 40, nejnepříznivější korekce a bezvětří

Zdroj: Autor

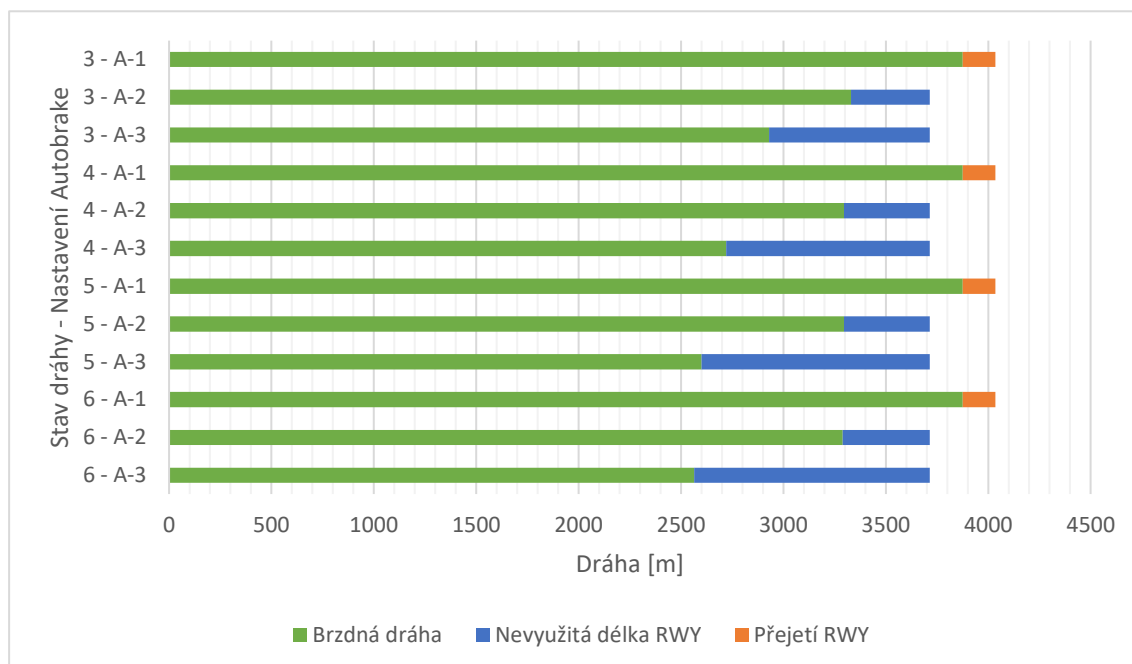


Tabulka 13 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 30 při nejhorší možné situaci a LAW 65 tun, vzdálenosti s červenou barvou písma jsou větší než délka dráhy na LKPR,

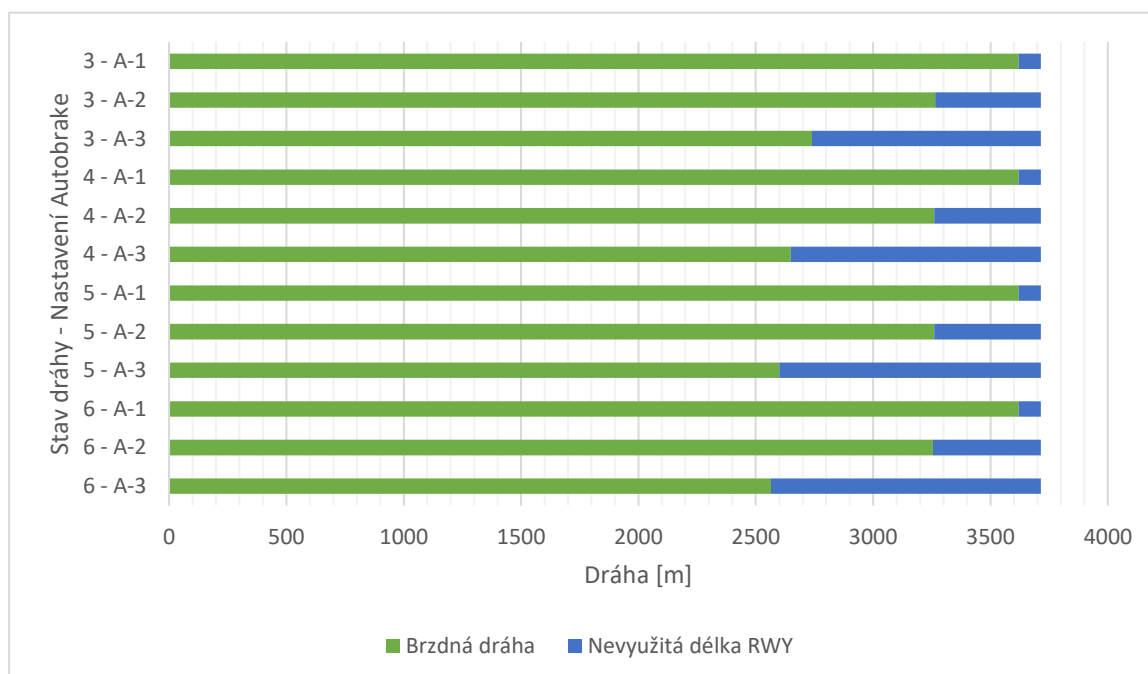
Zdroj: Autor

Stav dráhy	Nastavení Autobrake	Idle T/R	Full T/R
Dry - 6	A-3	2565	2565
	A-2	3290	3255
	A-1	3875	3620
Good - 5	A-3	2600	2600
	A-2	3295	3260
	A-1	3875	3620
G-M-4	A-3	2720	2650
	A-2	3295	3260
	A-1	3875	3620
Medium - 3	A-3	2930	2740
	A-2	3330	3265
	A-1	3875	3620

Graf 12 – Vyobrazení brzdných drah, Idle T/R, Flaps 30, nejnepříznivější korekce a LAW 65 tun, Zdroj: Autor



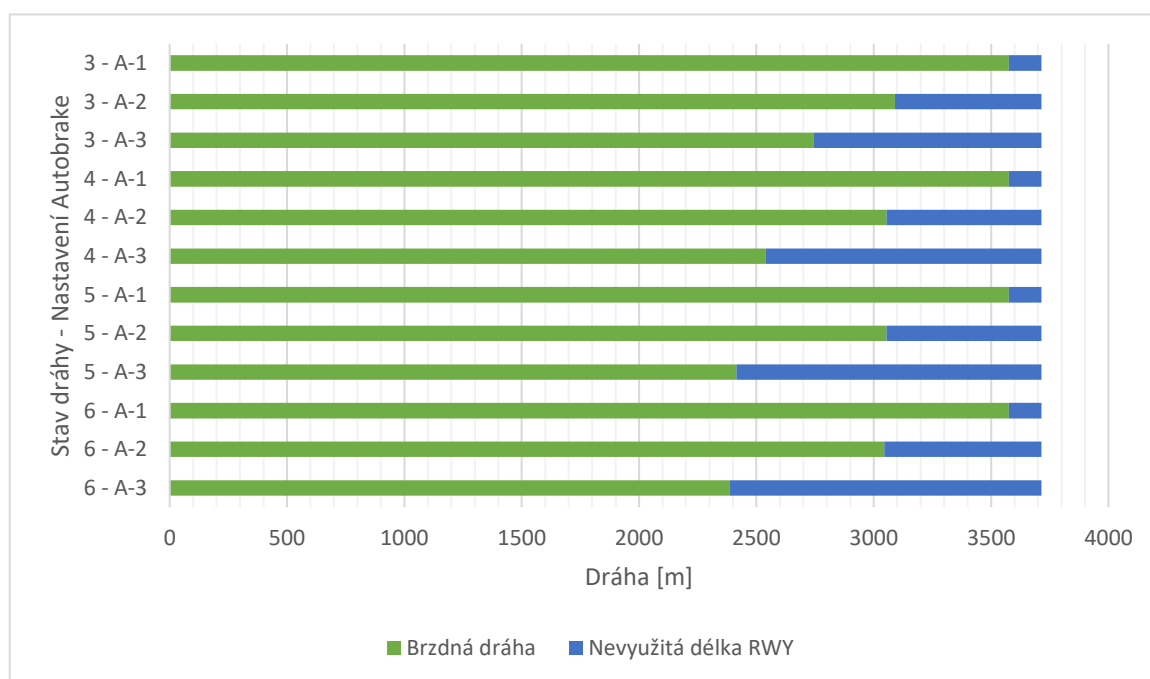
Graf 13 – Vyobrazení brzdných drah, Full T/R, Flaps 30, nejnepříznivější korekce a LAW 65 tun, Zdroj: Autor



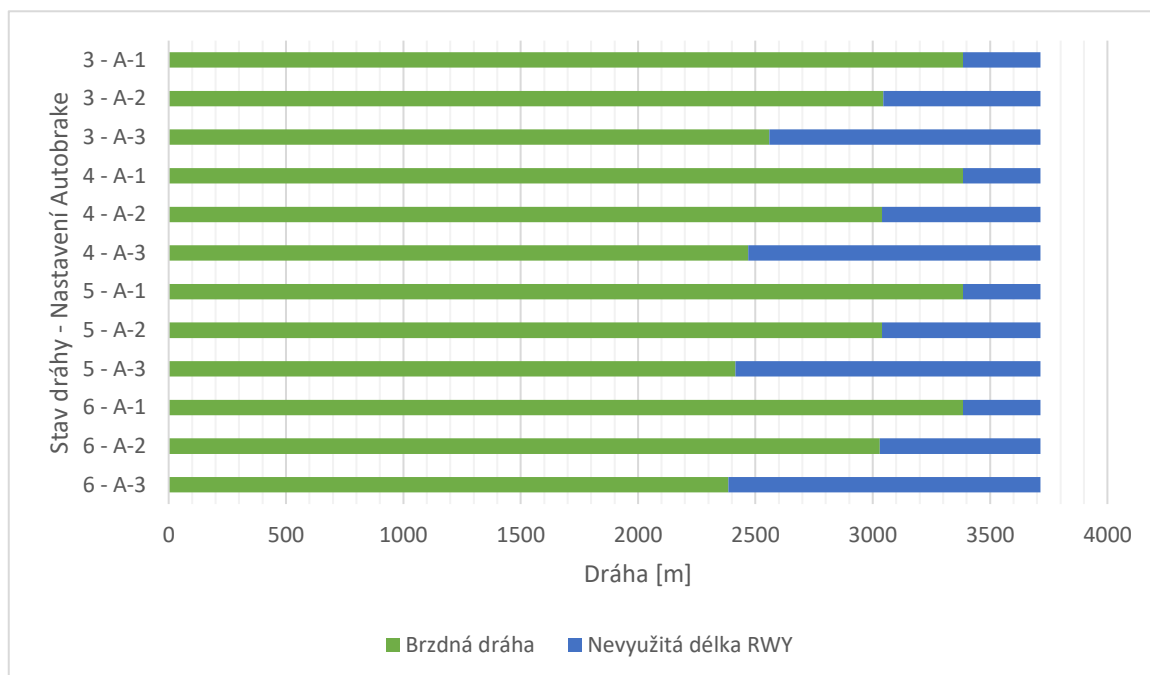
Tabulka 14 – Výsledné dráhy při použití klapek v poloze 40 při nejhorší možné situaci a
LAW 65 tun, Zdroj: Autor

Stav dráhy	Nastavení Autobrake	Idle T/R	Full T/R
Dry - 6	A-3	2385	2385
	A-2	3045	3030
	A-1	3575	3385
Good - 5	A-3	2415	2415
	A-2	3055	3040
	A-1	3575	3385
G-M-4	A-3	2540	2470
	A-2	3055	3040
	A-1	3575	3385
Medium - 3	A-3	2745	2560
	A-2	3090	3045
	A-1	3575	3385

Graf 14 – Vyobrazení brzdných drah, Idle T/R, Flaps 40, nejnepříznivější korekce a
LAW 65 tun, Zdroj: Autor



Graf 15 – Vyobrazení brzdných drah, Full T/R, Flaps 40, nejnepříznivější korekce a LAW 65 tun, Zdroj: Autor



Z dat v Tabulka 11, Tabulka 12, Tabulka 13 a Tabulka 14 vyobrazených v Graf 8, Graf 9, Graf 10, Graf 11, Graf 12, Graf 13, Graf 14 a Graf 15 je zřejmé, že první doporučení leteckým společností stále platí. Navíc lze při každé ze zmíněných situací, **vyjma nastavení klapek v poloze 30, při LAW 65 tun a použití T/R na Idle, kde stále platí předchozí doporučení**, při přistání na dráze v jakémkoliv definovaném stavu použít nastavení Autobrake 1.

Na základě těchto poznatků vzniká druhé doporučení leteckým společností provozující B-737 MAX. Toto doporučení bere v potaz nejhorší možné podmínky při přistání a buď bezvětří, nebo LAW 65 tun. Pokud je to možné, tak používat co nejnižší nastavení systému Autobrake, kdy nastavení 1 je vyjma zdůrazňované situace dostačující. Obdobně používat vyšší nastavení zpětného tahu, ideálně Full Reverse Thrust. Nakonec přistávat v konfiguraci klapek v poloze 40.

Pokud při přistání nenastane ani jeden ze scénářů, které výše zmíněná doporučení pokrývají, tak lze předpokládat, že se jedná o situaci příznivější. Veškeré korekce mohou být provedeny pouze směrem ke kratším brzdným drahám, a tudíž lze uvažovat i možnost přistávat s nastavením Autobrake 1 a s využitím Idle T/R. Tato kombinace oproti její alternativě však má jednu nežádoucí vlastnost a tou zůstává zahřátí brzd. Při využití plného zpětného tahu bude tato okolnost minimalizována, a tudíž se jeví jako ideální kombinace deceleračních



systémů. Obdobně pak působí konfigurace letounu na přistání, kdy klapky v poloze 40 jsou oproti poloze 30 pro teplotu brzdné soustavy výhodnější.

Na základě této úvahy vzniká třetí doporučení leteckým společnostem provozující B-737 MAX. Toto doporučení bere v potaz příznivější podmínky při přistání než ve výše zmíněných doporučeních. Pokud je to možné, tak používat nastavení 1 systému Autobrake. Použití Full Reverse Thrust je oproti Idle T/R, podobně jako klapky v poloze 40 oproti poloze 30, příznivější z pohledu tepelné energie dodané do brzdné soustavy.



4 Diskuse výsledků

V kapitole 2.3 byly rozebrány náklady na údržbu a provoz systémů využívaných k deceleraci letounu. Brzdňý systém svojí charakteristikou nemá provozní náklady, náklady na údržbu jsou ovšem podstatnou položkou. Data, na základě kterých byla průměrná částka za údržbu jedné brzdy na jedno přistání stanovena, byla získána od jednoho koncového odběratele brzdových lamel a jedné údržbové organizace. Je potřeba brát v potaz, že B-737 MAX je relativně nový letoun, který byl v nedávné době přechodně uzemněný. Tím zapříčiněné malé množství dat lze interpretovat jako zkreslující okolnost. Existuje zde pravděpodobnost, že data o počtu cyklů mezi výměnou/opravou brzdňého systému bude u různých provozovatelů rozdílná, což by mělo za následek různorodost periody potřebné údržby a tím i jinou průměrnou cenovku za jedno přistání. Dále je možné, že se smlouvy koncových odběratelů brzdových obložení a smlouvy údržbových organizací svým obsahem a konečnými částkami liší, tudíž by i celkové náklady na údržbu byly rozdílné od těch, které byly vypočítány ve výše zmíněné kapitole. Náklady na údržbu obracečů tahu byly zanedbány vzhledem k nízkému výskytu poruch na tomto systému. Provozní cena T/R byla stanovena na cenu paliva, které bylo spotřebované k vyvinutí celkového tahu nad rámec volnoběžných spotřeb jednotlivých motorů. Za předpokladu, že by bylo dostupných více průběhů spotřeby motorů při využívání zpětného tahu při přistání, by se dala lépe určit průměrná spotřeba. Obdobně jako u dodavatele brzdového obložení se cena za palivo od různých dodavatelů může projevit do celkové ceny využití systému obracečů tahu na jeden cyklus.

Výsledné délky brzdňých drah, které působily jako názorné ukázky důsledků jednotlivých podmínek při přistání, byly vypočítány na základě tabulek dodávaných výrobcem. Alternativa k těmto tabulkám je aplikace na tablet posádky, která je vytvořená výrobcem. Její funkce je stejná, jenom s tím rozdílem, že lze zadat více proměnných, které mají na výslednou brzdňou dráhu vliv. Znamenalo by to ale i větší množství proměnných, kterými by se tato práce musela zabývat. To není nezbytně špatně, ale tento způsob výpočtu dokazuje, že je dostačující pro řešení této problematiky.

Vznikla tři doporučení leteckým společnostem provozující B-737 MAX. První bere v potaz nejhorší možné scénáře při přistání. Jmenovitě nejvyšší teplotu, nejvyšší možný vítr do zad, který je ještě v běžných limitech a nejvyšší hmotnost při přistání. Práce doporučuje využívat Autobrake v nastavení 2, klapky 40 a Full T/R. Další doporučení pojednává o situacích jako je buď bezvětří, nebo přistávací hmotnost 65 tun. Korekce na tyto situace umožňují využití Autobrake 1 v některých případech a opět se doporučuje použití plného



zpětného tahu a nastavení klapky v poloze 40. Poslední doporučení již bere v potaz veškeré scénáře, které jsou příznivější než v tom předchozím. Zde je možné využít Autobrake v poloze 1 v každém případě, doporučuje se použít Full T/R a klapky v poloze 40.

Všechna výše zmíněná doporučení se odvolávají na co nejmenší nastavení systému Autobrake, co nejvyšší zapojení obracečů tahu a klapky v poloze 40. Tyto podmínky umožňují nejvyšší ekonomickou výhodnost pro letecké provozovatele B-737 MAX. Odůvodnění nižší preferované intenzity brždění se vztahuje k zahřívání brzd vlivem jejich zatížení. Nižší zatížení znamená nižší teplotu brzd, tím i nižší opotřebení a nižší šanci k poškození karbon-keramického obložení popraskáním, či k poškození ocelových klipů, které tyto lamely drží v jednom kuse. Dosažení vyšších teplot brzdového obložení je mimo jiné riskantní i z pohledu opakovaného brždění, především při pojíždění. Na rozpálených lamelách se při opakovaném brždění objevují praskliny, které výrazně přibližují datum nutné výměny obložení. Použití obracečů tahu i klapky v poloze 40 brzdám odlehčí, takže se nemusí zahřát na takovou teplotu. Thrust Reverser, leč při plném zapojení tvoří kolem jedné čtvrtiny celkových nákladů na jedno přistání, umožňuje kromě výše zmíněného odlehčení brzdovému systému při nějakém nastavení i použít nižší intenzitu brždění, což má příznivý vliv na životnost brzdového obložení. Klapky v poloze 40 odlehčují brzdovému systému díky snížení rychlosti na přiblížení, což má za následek nižší brzdovou dráhu za použití stejných ostatních parametrů.



5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit doporučení pro leteckou společnost provozující B-737 MAX pro využívání systémů decelerace letounu na základě ekonomické výhodnosti. Účelem bylo provést technickou analýzu používání deceleračních systémů, seznámit se s jejich aktuálním využíváním a provést výpočty vedoucí ke stanovení potřebných nastavení letounu při přistání.

Úvodní kapitola se věnuje analýze současného stavu. Podrobně popisuje brzdový systém, jeho stavbu, podsystemy zajišťující správnou funkci brzdové soustavy a hydraulický systém, který je s ním spojený. Dále se věnuje systému obracečů tahu, kdy se analogicky kromě stavby systému věnuje hydraulickému zapojení do okruhů letounu. Limitace současného stavu a aktuální způsoby využívání deceleračních systémů ukončují tuto kapitolu.

V další části se práce věnuje metodice výpočtu a určení proměnných, které jsou pro výpočet potřeba. Jsou zde rozebrány vlastnosti letiště, které se mohou při přistání měnit (ať už stav dráhy, rychlost nebo směr větru, či teplota vzduchu) a ty, které se nemění (délka přistávací dráhy a její orientace). Bohužel se analýza z důvodu dostupnosti dat omezuje pouze na LKPR a veškeré výpočty jsou prováděny pouze vzhledem k tomuto letišti. K vlastnostem letounu přistupuje práce podobným způsobem. Podrobně se zabývá proměnnými jako je hmotnost při přistání, konfigurace letounu a rychlost letounu při přistání.

Podstatná část se věnuje nákladům na údržbu a provoz obou systémů. U brzd se práce zabývá problematikou údržby v rozsahu výměny celého obložení a oprav jednotlivých klipů, které drží lamely v jednom kuse. U systému obracečů tahu se práce údržbou nezabývala z toho důvodu, že dostupná data nevykazují žádné podstatné zastoupení situací, kdy je T/R nefunkční. Provozní náklady byly stanovené na cenu paliva, které je spotřebováno nad volnoběžnou hodnotu každého z motorů. Celkové částky uvedené v této práci jsou založené na datech od jednoho provozovatele, proto se mohou finální ceny provozu a údržby obou systémů lišit. Další výzkum na toto téma by mohl zahrnovat více průběhů spotřeby motorů při použití obracečů tahu pro zvýšení objektivnosti dat. Závěr této části se věnuje otázkám výpočtu, určení výchozích hodnot a nastavením systému Autobrake a T/R.

Praktická část se zabývá výpočtem celkových brzdných drah v nejhorších možných a pak i příznivějších scénářích. Přínosem této práce je zjištění, že vyšší využívání systému obracečů tahu má pozitivní vliv na ekonomickou stránku provozu dopravních letounů. Výsledky z nejhorších dosažitelných scénářů byly zhodnoceny a vzniklo první doporučení, které



pojednává o ideální kombinaci nastavení systémů decelerace pro nejvyšší ekonomickou výhodnost. Obdobně došlo k vytvoření druhého doporučení, které analogicky určuje kombinace použitelné v situacích, kdy buďto na dráze panuje bezvětří, nebo se přistávací hmotnost letounu nepohybuje na maximální, ale je snižena na hodnotu 65 tun. Třetí doporučení pojednává o situacích, které jsou příznivější, než scénáře v obou výše zmíněných doporučených a taktéž udává základní myšlenku, že je z pohledu ekonomické výhodnosti třeba minimalizovat rychlost použitím klapek v poloze 40, využít plný dostupný zpětný tah a používat co nejnižší nastavení systému Autobrake. Doporučení jsou koncipována pro letecké provozovatele provozující B-737 MAX na Letišti Václava Havla Praha. V případě, že by se měla tato doporučení aplikovat i na jiná letiště, se musí brát v potaz rozdílná výška nad terénem, rozdílná délka dráhy a rozdílné rozsahy korekcí pro teplotu.

Limitace této práce se nacházejí primárně v omezení dostupných dat. Zpracovávána byla pouze data od jednoho provozovatele na jednom typu letounu, což znamená pouze malé množství letadel. Průběhy spotřeby by svým počtem taktéž mohly přispět různorodosti dat a přesnějšímu určení provozních nákladů. Podobně by prospělo využití většího vzorku frekvencí údržby na jednotlivých brzdových systémech. Práce se zabývala pouze deceleračními systémy, které mají největší vliv na zpomalování letounu při přistání. Předmětem výpočtů a doporučení bylo pouze přistání samotné, nikoliv následné pojíždění na stojáнку.

Další výzkum by se mohl podrobněji věnovat hraničním scénářům mezi využíváním plného a volnoběžného zpětného tahu. Dále by se mohl zabývat otázkou spotřebovaného paliva nad rámec běžného množství potřebného pro delší pojíždění kvůli přejetí běžného bodu výjezdu z dráhy. V tomto případě by se mohlo i uvažovat nad možností, že by se využívalo vyšší nastavení systému Autobrake i za cenu nižší životnosti brzd, což by bylo ale vyváženo cenou za palivo spotřebované zmíněným pojížděním ke stojánce.

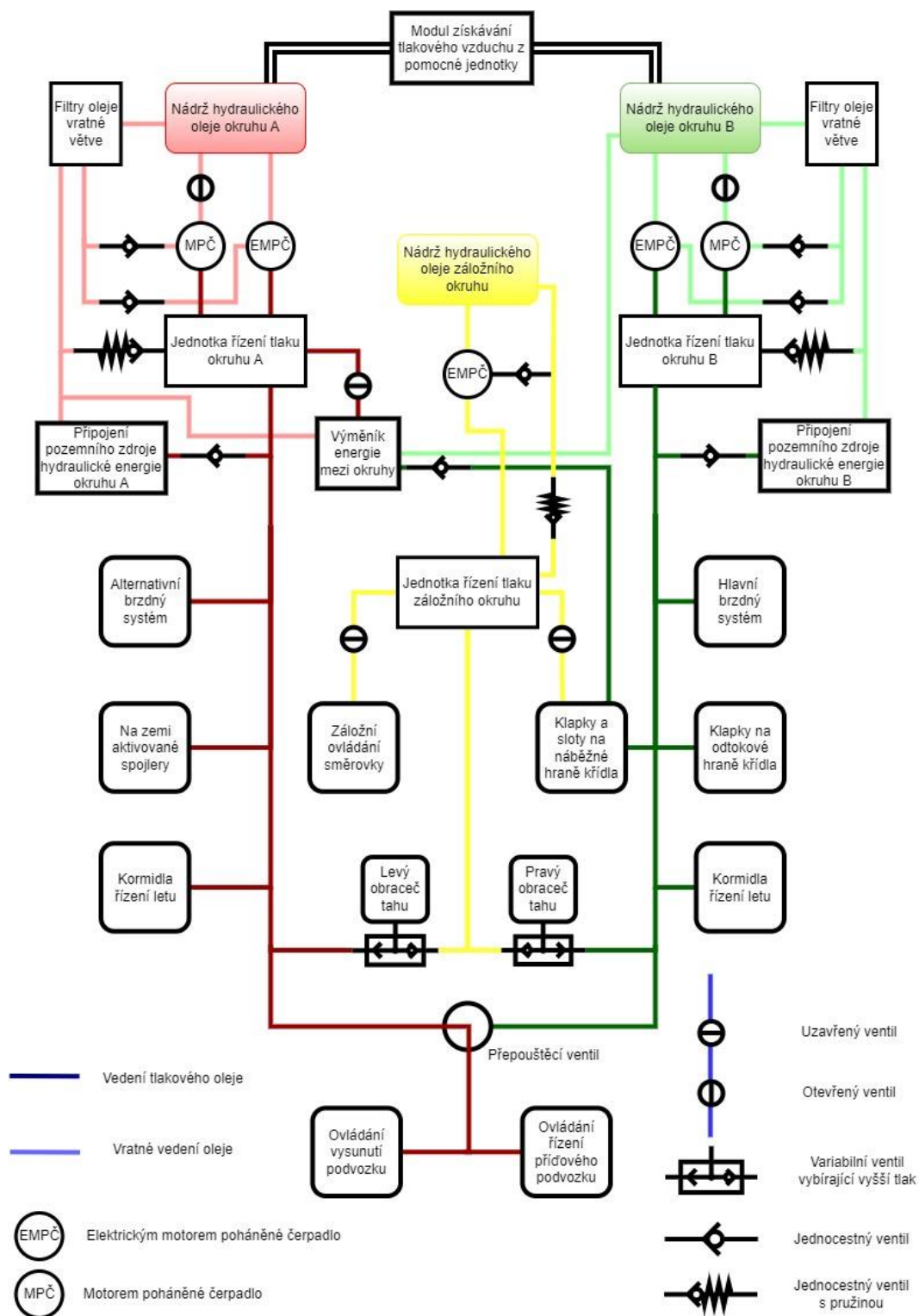
Psaní této bakalářské práce shledávám jako pro mě velmi přínosné. Umožnilo mi to zužitkovat znalosti nabyté při studiu, nahlédnout o něco blíže do reálného provozu letecké techniky a udělat si lepší obrázek o výdajích a potřebné údržbě letounu. Doufám, že tato práce v budoucnu poslouží kromě doporučení leteckým společnostem i jako náhled do alespoň části reálného dění kolem provozu letadel pro ostatní studenty.



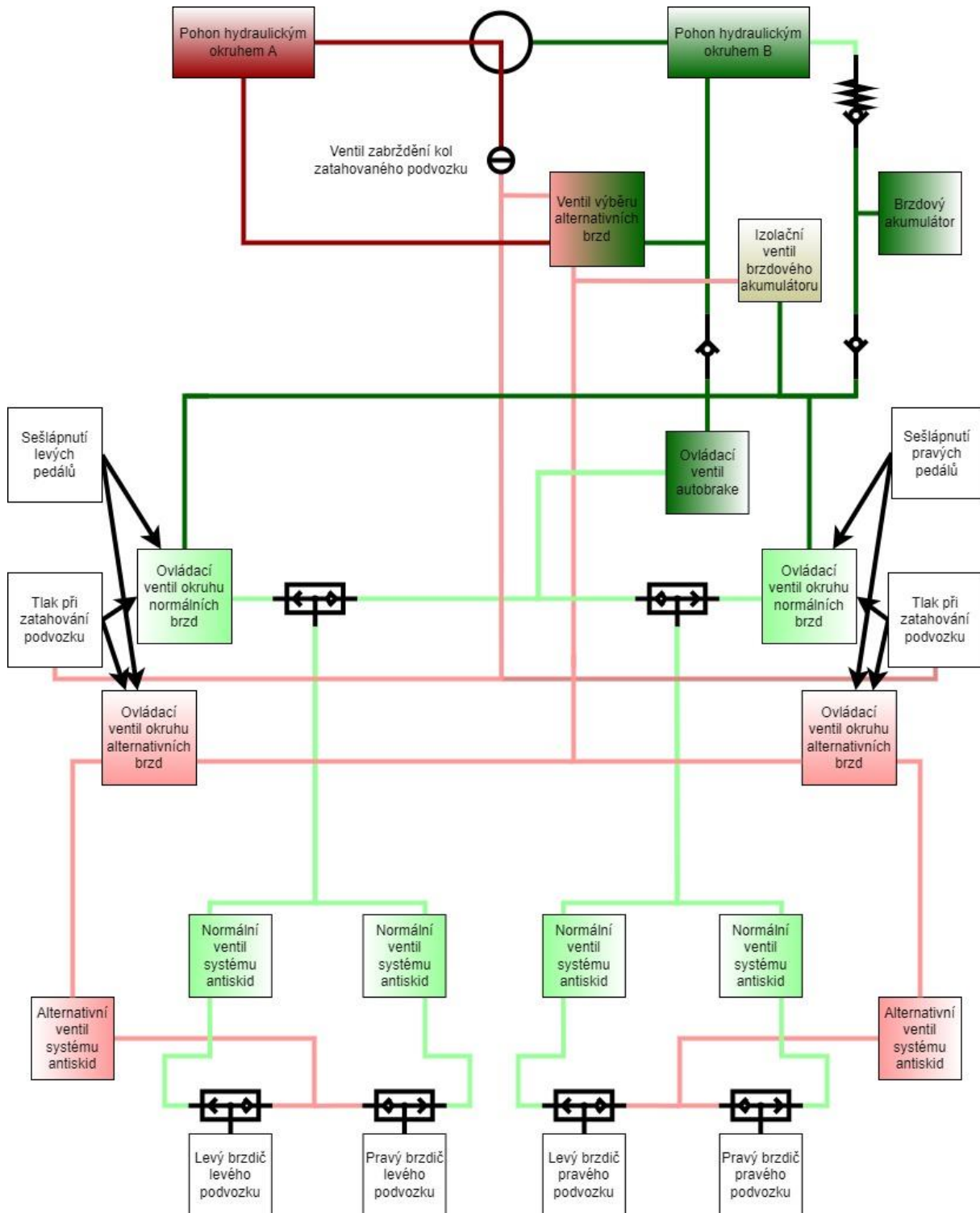
Reference

1. **BOEING**. System Description Section. *B737-7/8/9/10*. 2022.
2. —. 737-8 Aircraft Maintenance Manual. 2023.
3. —. Fleet Team Digest. *737MAX-FTD-32-17021*. 21. 4 2017.
4. —. TASK-32-41-41-700-803. *Main landing gear inspection*. 15. 1 2023.
5. —. 737 MAX Flight Crew Training Manual. *Flight Crew Training Manual*. 30. 6 2022.
6. **Smartwings**. *Data poskytnutá společností Smartwings*. 2023.
7. <https://aerodromes.eu/>. <https://aerodromes.eu/>. [Online] [Citace: 19. 7 2023.] <https://aerodromes.eu/>.
8. **Řízení letového provozu České republiky, s. p.** https://meteo.rlp.cz/LKPR_meteo.htm. *METAR LKPR*. [Online] 26. 06 2023. [Citace: 26. 06 2023.] https://meteo.rlp.cz/LKPR_meteo.htm.
9. **BOEING**. 737 Flight Crew Operations Manual. *737 Quick Reference Handbook*. 2023.
10. —. 737-8 Flight Crew Operations Manual. 2023.
11. **CZECH AIRLINES HANDLING a.s.** <https://www.czechairlineshandling.com/media/files/9/0/CSAH-AF-price-list110.pdf>. *Ceník paliva - Aviation fuel price for Jet A-1*. [Online] 16. 7 2023. [Citace: 16. 7 2023.] <https://www.czechairlineshandling.com/media/files/9/0/CSAH-AF-price-list110.pdf>.

Přílohy



Příloha 1 – Diagram hydraulických okruhů, Zdroj: (1), Autor



Příloha 2 – Diagram brzdného systému včetně Autobrake a Antiskid, Zdroj: (1), Autor