



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Vliv únavy na vykonání přístrojového přiblížení
The Influence of Fatigue on an Instrument Approach

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Lenka Hanáková

doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.

Jan Weiss

Praha 2020



K621**Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Jan Weiss

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Vliv únavy na vykonání přístrojového přiblížení**

Název tématu (anglicky): Influence of Fatigue on Instrument Approach

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zhodnotit vliv únavy na přístrojové přiblížení v průběhu experimentu s proměnlivou úrovní únavy.
- Vypracujte analýzu současného stavu v oblasti hodnocení přesnosti pilotáže s hlavním zaměřením na identifikaci a hodnocení konečné fáze přiblížení.
- Navrhněte softwarové řešení pro identifikaci a hodnocení konečné fáze přiblížení na základě dostupných letových dat a řešení validujte.
- Navrhněte a vykonajte experiment zaměřený na kontinuální vykonávání letů v průběhu 24 hodin.
- Vyhodnoťte naměřená data prostřednictvím navrženého softwarového řešení.
- Výsledky diskutujte v kontextu únavy a stanovte závěry práce.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Socha, Vladimír, et al. "Evaluation of relationship between the activity of upper limb and the piloting precision." 2014.
Socha, Vladimír, et al. "Basic piloting technique error rate as an indicator of flight simulators usability for pilot training." 2016.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Hanáková**
doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2019**
(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: **10. srpna 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jan Weiss
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. října 2019



Abstrakt

Unavený pilot je hrozbou pro bezpečné provedení letu, zejména v jeho kritických fázích jako například přiblížení na přistání, to jsem osobně zjistil už při leteckém výcviku a dokazují to také statistiky nehodovosti. Cílem této bakalářské práce je vliv únavy blíže prozkoumat prostřednictvím 24 hodin dlouhého experimentu na leteckém simulátoru na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického, v rámci něhož bylo s osmi subjekty provedeno 16 letů, každý včetně přístrojového přiblížení, ve kterém byla pomocí navrženého softwarového řešení hodnocena trajektorie letounu v kontextu kritérií pro stabilizované provedení této konečné fáze letu. Výsledky prozradily, že existuje spojitost mezi přesností a správností provedení přístrojového přiblížení a mírou únavy pilota, která může vést k nestabilizovaným přiblížením, jež mají velmi negativní vliv na celkovou bezpečnost. Je tedy důležité i nadále věnovat patřičnou pozornost maximálním dobám letových služeb, dostatečnému prostoru pro odpočinek leteckých posádek a pokračovat v aktivním vývoji systémů pro včasné řízení rizik spojených s únavou pilotů.

Klíčová slova:

přesnost pilotáže, přístrojové přiblížení, únava



Abstract

A tired pilot is a threat to the safe conduct of a flight, especially during its critical phases such as an approach for a landing. That is one of the facts that I discovered as soon as during my early flight training and it is backed up by reputable accident statistics and investigations. The aim of this thesis is to determine the influence of pilot fatigue with the aid of an experiment consisting of 8 pilots flying a total of sixteen flights over the course of 24 hours in a simulator at the Department of Air Transport at the Faculty of Transportation of the Czech Technical University. Each flight includes an instrument approach during which the piloting precision was monitored and analysed according to the rules of a stabilised approach. The results show that there is a connection between the fatigue levels and the accuracy and precision of the flying during the last phase of the flight. It can lead to unstabilised approaches which undoubtedly pose a threat to the overall safety of flight operations. It is very important to adequately manage the maximum flight duty time limitations, allow for sufficient rest of the flight crews and continue to develop complex fatigue risk management systems.

Keywords:

fatigue, instrument approach, piloting precision



Poděkování

V následujících řádcích bych rád poděkoval všem, kteří mě podpořili nejen při psaní této práce, ale také v průběhu celého studia. Velice děkuji vedoucím práce panu doc. Ing. Bc. Vladimírovi Sochovi, Ph.D. a slečně Ing. Lence Hanákové za trpělivost, preciznost a nadšení pro vědecký výzkum. Poděkování pak zaslouží i chrabří spolužáci, kteří byli ochotni se náročného experimentu zúčastnit buď jako subjekty, nebo dokonce s jeho průběhem aktivně pomáhat či provádět vlastní měření, bez nich by tato práce zcela jistě nemohla vzniknout. Velké díky patří také mojí rodině, která mě podporuje již od útlého dětství a bez které bych se určitě nenacházel v pozici, ve které dnes stojím.

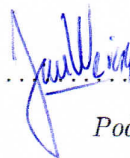


Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Vliv únavy na vykonání přístrojového přiblížení vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové 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).

V Praze dne 04. srpna 2020



Podpis



Obsah

Úvod	11
1 Teoretické základy práce	13
1.1 Konečné přiblížení	13
1.2 Přiblížení ILS	14
1.2.1 Indikace	14
1.2.2 Sestupová rovina	15
1.2.3 Krytí systému ILS	15
1.3 Přehled současného stavu hodnocení přesnosti pilotáže	16
1.3.1 Hodnocení přesnosti konečného přiblížení dvou skupin dopravních pilotů	16
1.3.2 Vyhodnocování polohy letounu při sestupech GBAS	18
1.3.3 Analýza polohy řídicích prvků letadla	20
1.3.4 Zpracování dat o přesnosti pilotáže u pilotů typů s různými mírami automatizace	21
1.3.5 Proběhlý experiment na ČVUT spojený s únavou pilotů	23
1.4 Statistiky nehodovosti	23
1.5 Únava	24
1.5.1 Spánek	26
1.5.2 Biologické rytmy	26
1.6 Shrnutí kapitoly	28
2 Metody	29
2.1 Simulátor	29
2.2 Průběh experimentu	31
2.3 Tratě a letiště	32
2.4 Subjekty	37
2.5 Přesnost a správnost	37
2.6 Výstupní data	39



2.7	Metoda vyhodnocení dat	41
2.8	Teorie statistické analýzy	45
3	Prezentace výsledků	46
4	Diskuze výsledků	54
	Závěr	57
	Seznam použité literatury	60
	Přílohy	62



Seznam obrázků

1.1	Graf odchylky od sestupové roviny při GLS přiblížení	20
1.2	Cirkadiánní rytmus - průběh teploty, hladiny hormonů a bdělosti	27
2.1	Modul pro družicovou navigaci simulující Garmin GTN 750	29
2.2	Prostředí simulátoru včetně přístrojů, navigační dokumentace a checklistu .	30
2.3	Přesnost a správnost ilustrována na střeleckém terči	38
2.4	Uživatelské rozhraní instruktorské stanice se zobrazením konečného přiblížení	40
2.5	Kužel sestrojený s pomocí daných parametrů a bodů (GeoGebra)	44
3.1	Trajektorie letu z Karlových Varů do Hofu	46
3.2	Sestupový kužel s trajektorií mezi 1000 ft AAL a zemí	47
3.3	Sestupový kužel s patrným vybočením v polovině přiblížení	48
3.4	Kužel přiblížení letěného jedním ze subjektů během sedmého letu, v době odpovídající WOCL, pozn.: Na osách se nachází souřadnice v podobě zeměpisné délky, zeměpisné šířky a výška převedená na úhel	49
3.5	Krabicový diagram zobrazující stabilizovanost v rámci jednotlivých přiblížení	51

Seznam tabulek

2.1	Časový harmonogram jednoho dne měření se dvěma subjekty	32
2.2	Příklad výstupu z nahrávání letových dat v rámci instruktorské stanice . . .	41
3.1	Poměrné vyjádření stabilizovanosti přiblížení pro jednotlivá měření	50
3.2	Výsledky post-hoc analýzy pro první měření	52



Seznam symbolů a zkratek

AGL	Nad úrovní země (Above ground level)
CDI	Course deviation indicator
CI	Konfidenční interval (Confidence interval)
DER	Odletový konec ranveje (Departure end of runway)
FAF	Fix konečného přiblížení (Final approach fix)
FAP	Bod konečného přiblížení (Final approach point)
FD	Flight director
FRMS	Systémy řízení rizik spojených s únavou (Fatigue risk management system)
FTL	Flight and duty time limitations
GBAS	Ground based augmentation system
GNSS	Globální navigační družicový systém (Global navigation satellite system)
GS	Sestupový radiomaják (Glideslope)
IAC	Mapa přístrojového přiblížení (Instrument approach chart)
IAS	Indikovaná vzdušná rychlost (Indicated airspeed)
IATA	International Air Transport Association
ILS	Systém pro přesné přiblížení a přistání (Instrument landing system)
IR	Kvalifikace pro létání podle přístrojů (Instrument rating)
LOC	Kurzový radiomaják (Localizer)
MAPt	Bod nezdařeného přiblížení (Missed approach point)
MMR	Multi mode receiver
PFD	Primární letový displej (Primary flight display)
RMSE	Střední kvadratická odchylka (Root mean square error)
RNAV	Prostorová navigace (Area Navigation)
SID	Standardní přístrojový odlet (Standard instrument departure)
STAR	Standardní přístrojový přilet (Standard instrument arrival)
WOCL	Window of circadian low



Úvod

Únava jako taková je přirozenou součástí životů, a to nejen lidských. Vyplývá z potřeby spánku, který je pro organismus nezbytně nutný, protože bez něj nelze dlouhodobě fungovat. Projevy únavy se mohou u různých jednotlivců lišit, ale každý je na sobě může snadno pozorovat. Tyto projevy mohou často zapříčinit, že se činnosti za běžných okolností automatické a přirozené stanou náročnými a začnou vyžadovat o mnoho více soustředění, což je kritické zejména v prostředích, kde je potřeba udržovat dobré situační uvědomění. Poměrně dobrým příkladem takového prostředí je právě paluba letadla.

Lidský faktor hraje v letectví velice důležitou roli, lidské chyby a selhání mohou vyústit až v katastrofu. Jelikož únava lidskou výkonnost podstatně omezuje, je třeba jí důsledně prozkoumat a ohodnotit vliv na bezpečné provedení letu, zejména ve fázích, kdy je potřeba rozdělení pozornosti a udržení maximální bdělosti nejpodstatnější. V minulosti již byly některé experimenty provedeny, ale já svou práci zaměřím na jednu konkrétní fázi letu – konečné přiblížení, ve které je zatížení pilotů typicky poměrně vysoké a maximální míra koncentrace je klíčová pro bezpečné provedení letu. Piloti dopravních letadel jsou pravidelně hodně vytěžováni z důvodu vysoké poptávky po cestování leteckou dopravou. Není neobvyklé, že pracují do pozdních večerních hodin a také se nezdá, že svou službu začínají brzy nad ránem, když je do východu slunce ještě poměrně daleko. Oba tyto případy jsou méně než ideální a poskytují prostor pro ospalost. Dalším faktorem je, zejména pro piloty dálkových linek, častá krátkodobá změna časových pásem, kdy se začnou rozcházet cirkadiánní cykly jedince a skutečná denní doba v novém časovém pásmu, z čehož vzniká stav, kterému se říká také pásmová nemoc, z které často plynou spánkové poruchy, náládovost a právě únava.[1]

Existují mezinárodní normy, které stanovují maximální délku letových služeb, doby odpočinku a počty hodin, které může člověk za dané období odpracovat, ale přirozeně není možné, aby i při jejich dodržování přišla na palubu letadla nehledě na denní dobu vždy



perfektně odpočatá posádka a setrvala v tomto stavu až do konce služby.

Já osobně jsem se s únavou v kokpitu poprvé ve větší míře setkal už v letecké škole při létání nočního výcviku. Při pilotáži je potřeba být precizní a aktivně rozdělovat pozornost mezi poměrně velké množství vjemů. To se člověk ostatně učí už od úplného začátku leteckého výcviku, ať se jedná o piloty kluzáků nebo budoucí piloty dopravních letadel. Neměl jsem s těmito věcmi zásadní problém až do doby, kdy přišlo na výcvik pilotáže v noci. Díky noční době, během které se výcvikový let koná, spojené s jeho poměrně dlouhým trváním jsem zjistil, že mám s úkony a činnostmi, které je člověk během běžného provozu zvyklý dělat automaticky a přesně, najednou mnohem více práce a má výkonnost postupně klesá. To mě přimělo k úvahám o tom, že by nebylo od věci tento vliv detailněji prozkoumat, a to zejména ve fázi konečného přiblížení, kdy je typicky zatížení posádky na nejvyšší úrovni.



1 Teoretické základy práce

Experiment, který bude prováděn bude vyžadovat určité metody hodnocení přesnosti pilotáže. Vzhledem k tomu, že práce se týká konkrétní fáze přiblížení – přiblížení konečného, přesnost bude hodnocena zejména zde. Proto bude nutné vhodně zvolit průběh experimentu, tak aby umožňoval vyhodnotit vliv únavy na přesnost pilotáže co nejlépe a nejobjektivněji.

1.1 Konečné přiblížení

Úsek konečného přiblížení je definován jako úsek vedoucí od fixu konečného přiblížení (Final approach fix – FAF) či bodu konečného přiblížení (Final approach point – FAP) do bodu nezdařeného přiblížení (Missed Approach point – MAPt), kde v případě získání vizuální reference pilot pokračuje a s letadlem přistává, v případě opačném provádí takzvaný go-around a přejde do fáze nezdařeného přiblížení. Bod konečného přiblížení FAP je pro přiblížení typu ILS (Instrument landing system) bod v prostoru na trati konečného přiblížení, kde nadmořská výška/výška středního přiblížení protíná nominální sestupovou dráhu ILS [2]. Délka konečného přiblížení je určena kombinací sklonu sestupové dráhy a výšky, ve které se nachází FAP. Nadmořská výška/výška středního přiblížení zpravidla protíná nominální sestupovou dráhu ILS ve výškách od 300 m (1 000 ft) do 900 m (3 000 ft) nad výškou dráhy nad mořem [2].

Vzhledem k relativně těsné blízkosti terénu a překážkám, nízké rychlosti a typicky velkému odporu letounu jsou v tomto úseku kladeny vysoké nároky na přesnost pilotáže, a tak se poměrně často tato přesnost hodnotí například v rámci různých přezkoušení. Ke zhodnocení přesnosti mohou sloužit například maximální či průměrné odchylky indikátoru systému ILS instalovanému na palubě letadla.



1.2 Přiblížení ILS

Přiblížení s pomocí systému ILS je přiblížení podle přístrojů používající směrové a vertikální navigační vedení, je tedy jedním z typů takzvaného 3D přiblížení. [2] Toto navigační vedení je založeno na pozemních vysílačích modulovaného radiového signálu v pásmu velmi krátkých vln, který je přijímán na palubě letadla, kde je podle hloubky modulace přijatého signálu vyhodnocena odchylka od optimální trajektorie, načež je indikována posádce letounu. Tyto vysílače se nazývají LOC (Localizer - kurzový radiomaják) a GS (Glideslope - sestupový radiomaják)

1.2.1 Indikace

Pilot tyto odchylky celou dobu přiblížení vidí na přístroji zvaném CDI – course deviation indicator, případně v modernějších zástavbách využívajících glass cockpit přímo v rámci PFD (Primary flight display), který sdružuje několikero klasických přístrojů typicky včetně umělého horizontu, rychloměru, výškoměru, a právě zobrazení deviace od sestupové dráhy, a může na ně aktivně reagovat. V podobě podávané pilotům se odchylky udávají v takzvaných tečkách, anglicky dots. Tečky znázorňují změnu hloubky modulace signálu – nelze tedy přesně říct, že jedna tečka znázorňuje jednu konkrétní hodnotu deviace od optimální trajektorie. Záleží pak na konkrétním přístroji a množství indikovaných teček, typicky jsou ale indikovány dvě tečky nad skluzovou rovinou, dvě pod ní, to samé v případě odchylky od osy dráhy doleva a doprava. Důležité je, že je deviace indikována nepřerušovaně a právě díky kontinuitě zobrazovaných informací lze podle indikace v kokpitu vést letadlo po požadované trajektorii velice přesně a konzistentně, a tak by měl být případný vliv únavy dobře patrný na třech parametrech, které se od ideálních mohou lišit i v důsledku nepřesnosti pilotáže – indikovaná vzdušná rychlost IAS, odchylka od prodloužené osy přistávací dráhy a odchylka od sestupové roviny.



1.2.2 Sestupová rovina

Sestupová rovina klesá typicky z bodu konečného přiblížení FAP či fixu konečného přiblížení FAF až do zóny dotyku pod úhlem 3° - může to být více či méně, dle předpisu standardně od 2.5° až do 3.5° (pro přiblížení kategorie II/III do 3.0°) [2]. Pro experiment byla vybrána letiště, na nichž svírá sestupová rovina s horizontální rovinou ve většině případů úhel 3.0° , nicméně některá z nich pro přiblížení na dráhu vyžadují sestup strmější, konkrétně o hodnotách 3.2° a 3.5° . Na vyhodnocování experimentu to však nebude mít negativní vliv, nicméně bude potřeba, aby tato skutečnost byla brána v potaz při konstrukci referenčního obrazce, vůči kterému má letadlo v prostoru v danou chvíli být [2].

1.2.3 Krytí systému ILS

Je dobré objasnit i předpisem dané oblasti krytí systému ILS pro vytvoření si představy o tom, kde se musí letadlo nacházet, aby systém pracoval správně. v rovině horizontální pokrývá kurzový radiomaják prostor $\pm 10^\circ$ od prodloužené osy dráhy do vzdálenosti 45 km a $\pm 35^\circ$ do vzdálenosti 30 km. V takto ohraničeném sektoru je indikace na CDI správná ve smyslu, že pilot vidí, zda je vlevo či vpravo od osy dráhy, výchylka přístroje je však maximální, a tak nelze říci, jak přesně daleko. Míra odchylky od této osy lze z přístroje odečíst až potom, co letadlo vstoupí do tzv. kurzového sektoru, který se ve své velikosti liší v závislosti na délce konkrétní dráhy, pro kterou je dané zařízení nainstalováno. Kurzový radiomaják je totiž nainstalován zhruba 400 m za opačným koncem dráhy (DER – departure end of the runway), než na který přistáváme. Šířka kurzového sektoru nad prahem dráhy musí být vždy 210 metrů, a tak musí být pomyslný kužel kurzového sektoru pro různé délky dráhy různě rozevřen. Čím delší bude dráha, tím bude úhel rozevření menší, podle předpisu L10 může být rozevřen od 3° do 6° [3]. Různá míra rozevření kurzového sektoru má samozřejmě za následek ve větší vzdálenosti od prahu na různých drahách různou odchylku letounu od osy dráhy při stejné výchylce ručičky na přístroji, to ale není nutně na škodu, jelikož ve větších vzdálenostech je ještě dost času na provedení korekcí, důležitá je pevně stanovená sektorová šířka v oblasti



prahu dráhy, která zajišťuje, že pro všechna letadla na všech letištích vybavených systémem ILS bude plná výchylka přístroje odpovídat odchylce 105 m od osy dráhy, a tak bude mít pilot v nejkritičtější fázi blízko nad zemí možnost uniformně reagovat na výchylky přístroje, ať je na jakémkoliv letišti na světě [3] [4].

Krytí sestupového radiomajáku je dáno v oblasti od 0.3Θ do 1.75Θ do vzdálenosti 18.5 km od antény sestupového radiomajáku, kde Θ je úhel sestupové roviny. Pohyb indikace na letovém přístroji pak probíhá v oblasti $\pm 0.24 \Theta$. Na rozdíl od kurzového radiomajáku ukazuje sestupový radiomaják na všech letištích se stejným úhlem sestupové roviny Θ stejně [4].

1.3 Přehled současného stavu hodnocení přesnosti pilotáže

Pro správné vykonání experimentu a nalezení způsobu a vhodných metod pro zpracování dat se můžeme podívat do světa na již proběhlé experimenty, kde byla přesnost pilotáže nějakým způsobem hodnocena. Následuje několik experimentů, které by mohly poskytnout náhled na relevantní skutečnosti, které bude třeba vzít v úvahu během měření a vyhodnocování dat.

1.3.1 Hodnocení přesnosti konečného přiblížení dvou skupin dopravních pilotů

Analýzy již zmíněného tečkového typu indikace bylo využito například při experimentu v Německu zaměřeném na porovnání přesnosti pilotáže mladých prvních důstojníků, kteří sice nemají nalétáno příliš velké množství hodin, průměrně 3 373.9, ale jsou velice dobře zvyklí na každodenní přiblížování k drahám při letech na krátké vzdálenosti s relativně velkým počtem přistání, v průměru 16.6 za posledních 30 dní, a zkušených kapitánů, kteří měli nalétáno průměrně 15019.7 hodin, létajících převážně dlouhé long haul lety s minimem doby strávené ručním řízením letounu a nízkým počtem přistání, pouze 3.4 za posledních 30 dní [5].

Při experimentu piloti letěli dvě přesná přístrojová přiblížení, přičemž odchylky byly měřeny až při druhém, ve výškách od 3000 ft. AGL (Above ground level - nad úrovní země) do 200 ft.



AGL v případě sestupového majáku a do 50 ft. AGL v případě majáku kurzového. Přiblížení bylo rozděleno do třech segmentů, nejprve od 3000 ft. AGL do 1000 ft. AGL, následně 1000 až 270 ft. AGL, kde už existuje legislativní požadavek na maximální odchylku, kužel v prostoru, jehož hranice tvoří tyto maximální odchylky se zužuje, a tak obtížnost přiblížení narůstá, jelikož i relativně menší absolutní odchylka letadla vyjádřená například rozdílem souřadnic od požadované trajektorie znamená velkou odchylku na přístroji. v posledním segmentu rozprostírajícím se od 270 ft. AGL do 50 ft. AGL už probíhá přesun pohledu pilota z přístrojů ven z kabiny tzv. head down to head up a přechází se na vizuální dokončení přiblížení [6].

Dalším parametrem, pomocí kterého se během tohoto experimentu hodnotila výkonnost pilotů, bylo místo prvního doteku s dráhou, tedy dosednutí. Při ideálním přiblížení a podrovnání by měl pilot sednout na takzvaný zaměřovací bod, který je pro dráhy delší než 2400 metrů vzdálený 400 metrů od začátku dráhy [7] a laterálně přesně na střed dráhy, často označovaný také jako osa dráhy nebo anglicky centerline.

Použití autopilota nebylo možné, a tak byl celý sestup prováděn ručně bez flight directoru (FD) – letěn byl takzvaný raw data ILS, kdy pilot provádí korekce pouze na základě zobrazení již zmíněných teček. Měřená byla jak odchylka v horizontální rovině, tak v rovině vertikální. Vyhodnocení proběhlo dvěma způsoby – nejdříve bylo provedeno měření maximální odchylky a následně zprůměrování, poté se vzala maximální odchylka a byla porovnána s legislativními požadavky, které stanovují, že pro stabilizované přiblížení může být pod 1000 ft AGL odchylka maximálně jedna tečka na každou stranu od ideální polohy vůči kurzové i sestupové dráze. Pro typy Airbus A320 a A340, na kterých byl experiment prováděn, koresponduje tato odchylka s $\pm 0.4^\circ$ deviací od sestupové roviny a $\pm 0.8^\circ$ deviací od prodloužené osy dráhy [6]. Maximální odchylky je důležité v reálném provozu dodržovat, aby pilot udržel letadlo bezpečné v rámci ochranných prostorů [4].

Pro vyhodnocení přesnosti jednotlivých pilotů byla stanovena střední kvadratická odchylka (RMSE), jelikož nebylo účelem rozlišit mezi odchylkami doleva a doprava, případně příliš



vysoko a příliš nízko, tak jako to pravděpodobně bude provedeno i v našem experimentu. Obě skupiny byly následně porovnány s pomocí parametrických i neparametrických testů.

Při využití teček nepracujeme nutně s polohou letounu v prostoru vyjádřenou souřadnicemi, ale monitorujeme maximální odchylky od stanovené trajektorie vyjádřené hloubkou modulace, což je pro účely stanovení přesnosti pilotáže ve fázi konečného přiblížení poměrně vhodné. Navíc lze podle této odchylky porovnat skutečnou výkonnost pilotů od legislativních požadavků, které stanovují právě maximální odchylku jedné tečky. Nevýhodou je, že je třeba odchylku do teček určitým způsobem převést, jelikož ze softwaru simulátoru zpravidla vystupuje odchylka absolutní vyjádřena rozdílem souřadnic polohy letadla a polohy, ve které by se mělo v dané vzdálenosti od prahu dráhy vyskytovat [6].

1.3.2 Vyhodnocování polohy letounu při sestupech GBAS

Jiný experiment, také prováděn na německé půdě, prezentoval odchylky od sestupové roviny ve své části létané na simulátoru odlišným způsobem a také za jiným účelem. Tato práce byla zaměřena na zkoumání možnosti využití strmých sestupových úhlů, a to až do takové míry, že nejsou standardně dosažitelné systémem ILS, proto byl použit systém GLS – Ground-based Augmentation System Landing System. Ten pracuje s daty o poloze letounu v prostoru poskytovanými systémem GNSS – Global navigation satellite system, dále je pomocí pozemních stanic a vysílačů lokálně zpřesňuje, čímž dosahuje přesnosti velmi vysoké, a tak může být využit pro provedení 3D přiblížení, tedy s kontinuálně poskytovanou informací o vertikálním vedení, do minim, která odpovídají CAT I, tj. výška rozhodnutí nejméně 60 m (200 ft) a buď s dohledností nejméně 800 m nebo dráhovou dohledností nejméně 550 m [8]. Zobrazení výstupu tohoto systému je v kokpitu prakticky shodné s přiblížením ILS, jako kdyby byla indikována hloubka modulace signálu od kurzového a sestupového radiomajáku. Předmětem výzkumu byla možnost použití strmých úhlů sestupu z důvodu snížení hlukové zátěže na oblasti nacházející se pod trajektoriemi konečného přiblížení. Byly provedeny testovací lety na simulátoru a následně byla získaná data ověřena i ve skutečných letadlech různých typů



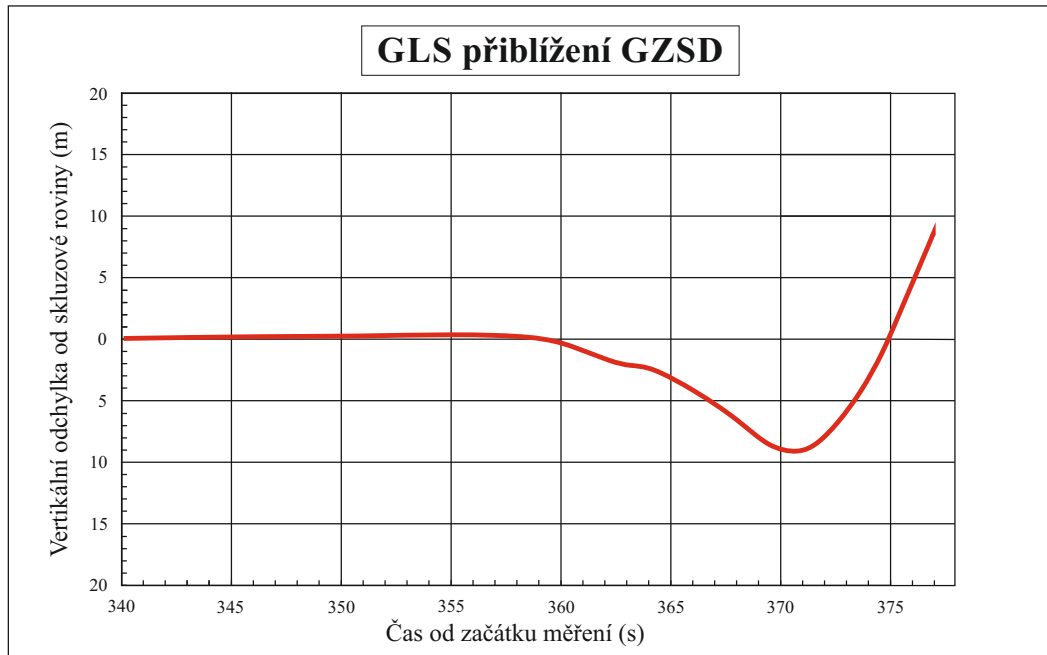
na letišti Braunschweig-Wolfsburg, kde bylo zařízení pro GBAS nainstalováno způsobem, aby GLS sestup byl s co nejpodobnějšími parametry již existující ILS zástavbě, jen byly modifikovány výšky FAP, aby bylo dosaženo většího sklonu sestupové dráhy, konkrétně 3.5° , 4.5° , 5° a 5.5° postupně pro přiblížení pojmenovaná GZSA, GZSB, GZSC, GZSD [9].

Použitým simulátorem byl v tomto případě simulátor GECO (Generic Experimental Cockpit) umístěném v German Aerospace Centre - Institute of Flight Guidance, který je volně založen na kokpitu typu Airbus A320. Pro práci s GLS bylo nutné vytvořit simulaci přístroje MMR – multi mode receiver, který ve skutečných strojích signál při přiblížení zpracovává a vypočítává odchylky od požadované trajektorie, načež je zobrazuje pilotovi. Aby bylo možno tuto simulaci provést, systém si převádí souřadnice letadla do lokálních kartézských souřadnic s počátkem v bodu doteku na přistávací dráze, kde je osa x součástí a prodloužením osy dráhy. Horizontální odchylky jsou tak počítány vzhledem x,z rovině, tedy vyjádřeny souřadnicí y, kdežto vertikální odchylka je počítána na základě výšky a poloze na ose x. Lety na simulátoru pak byly zaměřeny na zhodnocení pracovní zátěže na posádku a provozní požadavky postupů s vysokými úhly sestupové roviny [9].

Na obrázku 1.1 můžeme vidět graf, znázorňující průběh odchylky od požadované sestupové trajektorie v závislosti na čase simulace vyjádřené v metrech. Během letu s použitím autopilota se odchylka pohybovala kolem 0 metrů, v momentě, kdy přebral řízení pilot, došlo ke snížení podélného sklonu a podklesání sestupu, aby na dráhu dosedli dříve z důvodu její relativně krátké délky [9].

Podobná technika před podrovnáním, ačkoli méně výrazná bude pravděpodobně patrná i při měření v rámci experimentu zaměřeném na vliv únavy a způsobená výchylka zpravidla nemusí být nežádoucí, vznikne pak větší prostor na provedení přechodového oblouku a delší výdrže před konečným dosednutím na povrch přistávací dráhy. Proto by mohlo být vhodné při experimentu měřit odchylku jen do omezené výšky, řekněme 50 ft. nad práh dráhy nebo do podrovnání, kdy je odchylka stále relevantním parametrem zohledňujícím přesnost pilotáže

v kontextu únavy.



Obrázek 1.1: Graf znázorňující odchylku od sestupové roviny (na vertikální ose) v čase (na horizontální ose) při GLS strmém přiblížení [9] (upraveno)

1.3.3 Analýza polohy řídicích prvků letadla

Dalším zajímavým parametrem, který můžeme v rámci některých simulací sledovat, je samotná poloha řídicích prvků v kokpitu letadla. Lze tak pozorovat, zda nemá pilot tendenci k přehnaným výchylkám kormidel, na které nemá letadlo jako takové šanci reagovat. Tento děj je mezi odborníky znám jako takzvaný over controlling a je spojován zejména s méně zkušenými piloty. v trochu jiném kontextu byl vztah výchylek kormidel a chování letadla analyzován v experimentu na Univerzitě Obrany v Brně, který sledoval možnost využití simulátorů pro analýzu chování zejména vojenských pilotů a vyhodnocení jejich výcviků. v rámci tohoto výzkumu byly vybírány některé nezvyklé polohy a hodnotil se čas, který potřebovaly různě zkušené piloti na správnou reakci na vizuální podnět, ale také rychlost, s



jakou manipulovali s kniplem letounu [10].

Vybírání nezvyklých poloh sice nebude součástí pokusu sledujícího vliv únavy na provedení přístrojového přiblížení, ale vyhodnocení výchylek řídicích prvků v průběhu standardního letu by mohlo určitým způsobem únavu indikovat. S narůstající mírou únavy by se mohla tendence k over controlu v důsledku snížení bdělosti zvyšovat.

1.3.4 Zpracování dat o přesnosti pilotáže u pilotů typů s různými mírami automatizace

Data, která budou v experimentu získána bude třeba pro jejich vyhodnocení podrobit statistické analýze s pomocí vhodných metod. Inspirací by mohl být experiment vykonán v roce 1995 na americké univerzitě v Salt Lake City, který měl za úkol zjistit, zda existují rozdíly v přesnosti a preciznosti pilotáže mezi posádkami více automatizovaných letounů a piloty letadel klasičtější koncepce s výrazně nižší mírou automatizace. K tomuto účelu bylo vybráno 48 pilotů, tedy 24 posádek od jedné aerolinky, kde 12 z nich létalo ve více automatických kokpitech a 12 v typech starší koncepce. Hodnocení přesnosti probíhalo na plně pohyblivém simulátoru se šesti stupni volnosti se simulací sil v řízení tak, aby celkový vjem co nejvíce odpovídal realitě. Výkony posádek byly zkoumány v rámci několika manévrů: běžný vzlet a počáteční stoupání, vzlet a počáteční stoupání se závadou na jednom motoru, ILS přiblížení a přistání a ILS přiblížení a přistání s jednou pracující pohonnou jednotkou. Parametry, které byly sledovány byly následující: náklon a podélný sklon letounu; indikovaná vzdušná rychlost, kurz a výška; odchylka od kurzového radiomajáku a sestupové roviny; vstupy do řízení [11].

Jako nulová hypotéza bylo stanoveno tvrzení, že mezi středními hodnotami obou skupin nebude žádný rozdíl, tedy:



$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (1.1)$$

kde μ_1 je střední hodnota zkoumaného parametru jedné skupiny a μ_2 střední hodnota zkoumaného parametru druhé skupiny [11].

Pro vyhodnocení našeho experimentu jsou nejzajímavější hodnocené parametry odchylky od sestupové roviny a kurzového radiomajáku. Pro piloty konvenčních, méně automatizovaných letounů vycházely střední hodnoty odchylek 11.8'' od sestupové roviny a 26.0'' od kurzového radiomajáku. Posádky létající typy s větší mírou automatizace dosáhly odchylek o středních hodnotách 24.6'' a 54.0''. Tyto hodnoty pak byly použity při testu nulové hypotézy zvoleným statistickým testem a výsledné t hodnoty t-testu byly 8.70 pro odchylku od sestupové roviny a 11.68 pro odchylku od kurzového radiomajáku. Obě hodnoty jsou výrazně vyšší než kritická t hodnota 2.069 (pro hladinu významnosti $\alpha = 0.05$), a tak byla poměrně jednoznačně nulová hypotéza zamítnuta [11].

V případě ILS přiblížení a přistání s jednou pracující pohonnou jednotkou byly střední hodnoty odchylek pro posádky konvenčních letounů 11.9'' od sestupové roviny a 27.1'' od kurzového radiomajáku, tedy velice podobné jako v případě, že oba motory pracovaly správně, kdežto pro piloty více automatizovaných typů dosáhly hodnot 25.9'' od sestupové roviny a 61.9'' od kurzového radiomajáku. Po otestování nulové hypotézy vyšly hodnoty t-testu 9.19 a 11.09, takže opět nastal případ, kdy jsou v případě obou odchylek čísla podstatně vyšší, než je kritická hodnota, a tak byla s jistotou opět zamítnuta nulová hypotéza [11].

V rámci tohoto experimentu tedy statistika ukázala, že posádky zvyklé létat s menší mírou automatizace objektivně ve fázi přiblížení a přistání pilotují letouny lépe a precizněji, což plně korespondovalo se subjektivními dojmy dozorujících pracovníků, kteří v chování druhých posádek pozorovali zmatečnost, spoléhání se na automatické funkce letounu a autopilota v neadekvátních situacích a často přímo chybné reakce na vysoké odchylky zobrazené na



přístrojích. Lze tak říci, že v tomto případě byla zvolená metoda statistického testování správná a skutečně reflektovala reálný stav věci. Účelem tohoto statistického testu však bylo porovnat dvě různé skupiny lidí, pro analýzu, zda spolu u daného subjektu souvisí zvyšující se míra únavy a průběh letu ve fázi konečného přiblížení je tento konkrétní test nevhodný.

1.3.5 Proběhlý experiment na ČVUT spojený s únavou pilotů

V minulých letech byl již na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického v Praze jeden experiment spojený s únavou pilotů a přesností pilotáže prováděn. Byl zaměřen na přesnost horizontální, a to zejména ve fázi traťového letu, konečného přiblížení se dotkl jen okrajově a například přistání nehodnotil vůbec. Bylo využito prostředí programu MATLAB, které se zdá být pro účely statistické analýzy velice vhodné. Data byla vykreslena v podobě krabicových diagramů, takzvaných boxplotů a vzhledem k tomu, že se pro každý subjekt jednalo o data závislá, jednotlivá měření byla vyhodnocena statistickými testy pro účely komparace. Tato měření měla však své limitace dané například poměrně malým počtem subjektů a letů nebo už zmíněnou absencí hodnocení přistání či dokonce přesnosti ve vertikální rovině, která je pro bezpečné provedení letu velice důležitá jak pro traťový let, tak i pro fázi konečného přiblížení, kdy je letoun potřeba řídit s ohledem na stále se přibližující terén a překážky. Proto bude důležité zhodnotit vliv únavy i z tohoto pohledu [12].

1.4 Statistiky nehodovosti

Fáze konečného přiblížení je jedna z nejkritičtějších a klade vysoké nároky jak na pilotáž samotnou, tak na situační povědomí, schopnost rychle se rozhodovat a v případě vícečlenných posádek i na správnou kooperaci s druhým pilotem v kokpitu. Statistiky mluví poměrně jednoznačně.

Podle IATA bylo v letech 2013 až 2017 94 z 339 (34 %) fatálních leteckých nehod spojeno s chybami při manuálním řízení letadla [13]. Příklady takovýchto chyb jsou následovné:



vertikální či laterální odchylky od trajektorie; odchylky od rychlosti; chybné volby míry vysunutí mechanizace na křídle, systému autobrake, obracečů tahu; špatně zvolený tah; odchylky při konečném přiblížení, například let pod optimální sestupovou rovinou a chyby týkající se pohybu letounu po zemi. Takzvaný fatigue management je stále problémem. Jsou sice určené pevné limity délky služeb a minimální pauzy mezi nimi, ale nejsou zohledňovány rozdíly v provozu různých společností a typů obchodního létání. I přes tato časová omezení hraje při leteckých nehodách a incidentech roli a u mnoha je stále přispívajícím faktorem. Spousta provozovatelů stále neví, kde přesně začít s potlačováním rizik spojených s únavou a vyčerpáním letových posádek [13]. Experti se dokonce domnívají, že únava je nejsilnější z identifikovatelných faktorů přispívajících k leteckým nehodám a incidentům [14].

Podle statistik IATA se ve pětiletém období začínajícím lednem 2014 a končícím prosincem roku 2018 z celkových 316 leteckých nehod větší část – něco málo přes 200 stala právě ve fázi přiblížení a přistání. Když se podíváme celkově na fatální letecké nehody, únava byla přispívajícím faktorem u 18 % z nich, což je poměrně vysoké číslo [13].

Statisticky zajímavá čísla spojená s délkou služeb můžeme najít i za oceánem, v Americe. Jen zhruba 10 % ze všech letových služeb překročilo délku 10 hodin, ale pokud se podíváme na incidenty a nehody, celých 20 % z celkového objemu v rámci komerční letecké dopravy na území Spojených států amerických se událo během desáté hodiny ve službě nebo později, kdy už jsou posádky zákonitě nezanedbatelně unavené [15].

1.5 Únava

Pro správnou interpretaci výsledků práce a jejich zařazení do kontextu se musíme blíže podívat i na únavu jako takovou a biologické rytmy, které u člověka řídí střídání bdění a spánku, a do velké míry tak ovlivňují i jeho výkonnost v průběhu času.



Pro letecké posádky je únava něčím, s čím se setkávají prakticky každý den a nepochybně je problémem, kterému se je třeba věnovat. Zcela ji eliminovat se pravděpodobně nikdy nepovede, a to i díky celkovému charakteru této profese. Nepravidelná pracovní doba, dlouhé jednotlivé služby, časté cestování časovými pásmy ale i vyžadovaná vysoká míra pozornosti během pilotáže letounu, to všechno jsou skutečnosti, které přímo nahrávají častému výskytu únavy u členů posádek [15].

Je několik přístupů, jak se s únavou v letectví vypořádat. Jak se stávala s postupem času s rostoucí hustotou provozu stále výraznější skutečností, byla nastavena pravidla pro maximální délky služeb a minimální délky odpočinku, která měla za úkol minimalizovat rizika spojená právě s vyčerpaností posádek. Často je tento způsob označován zkratkou FTL (Flight and Duty Time Limitations). Tento způsob je však v lektérých případech nedostačující a nezohledňuje případná specifika konkrétních forem leteckého provozu. Proto se celosvětově přechází na systémy plánování založené na sledování reálných dat. V kontextu letectví jsou tyto systémy označovány jako FRMS (Fatigue Risk Management System) [16].

Podle ICAO je únava definována následovně [16]: *„Fyziologický stav snížené mentální nebo fyzické výkonnosti plynoucí z nedostatku spánku nebo příliš dlouhého bdění, cirkadiánního rytmu nebo pracovní zátěže (duševní a/nebo fyzická aktivita), který může negativně ovlivnit ostražitost a schopnost bezpečně obsluhovat letadlo nebo plnit úkony spojené s bezpečností.“*

Zajímavou studii provedli vědci na univerzitě v Kanadě, když porovnávali účinky alkoholu s prodlouženou dobou bdění na řízení motorového vozidla, což sice není zcela totožné s pilotováním letounu, ale v některých aspektech zcela určitě můžeme spatřit podobnosti. Došli k závěru, že pouhé bdění a práce po dobu 18.5 až 21 hodin má na výkonnost podobný vliv jako 0.5 až 0.8 promile obsahu alkoholu v krvi, což se dá považovat za velice výrazné [17].



1.5.1 Spánek

Je zcela přirozené, že se u živých tvorů střídají fáze bdění a odpočinku. Jako formu odpočinku bereme samozřejmě i spánek, který je pro člověka zcela esenciální. Během spánku se totiž lidské tělo nejen regeneruje po fyzické stránce, ale probíhají také mentální procesy a třídění informací získaných během doby, kdy byl člověk vzhůru [18]. Spánek je záležitostí velice individuální a jeho charakteristika se mění i u konkrétního jednotlivce v závislosti na proměnných jako je věk nebo například denní výdej energie [18].

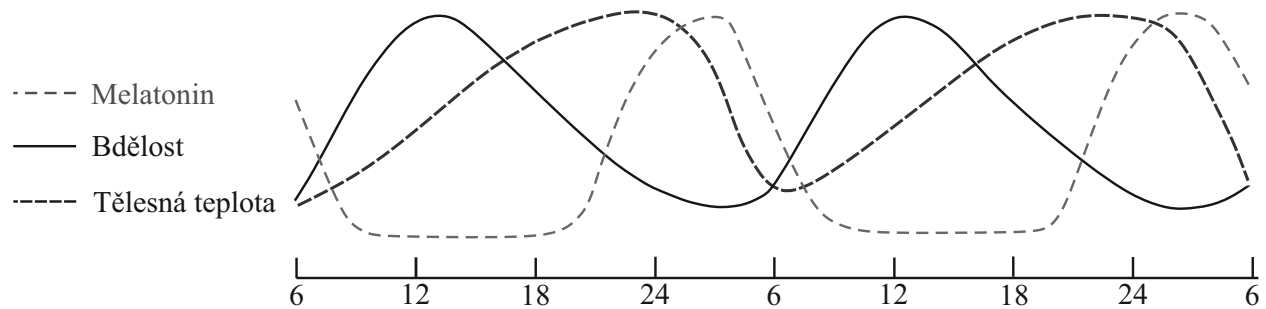
Pro potřeby této práce není důležité rozebírat do detailu jednotlivé fáze spánku a jejich charakteristiky, ale je důležité uvědomit si, jak důležitou hraje v lidském životě roli a v úvahách zohlednit i specifika provozu leteckých společností, který klade na výkonnost zaměstnanců vysoké nároky, přičemž pro posádky nemusí být vždy jednoduché skloubit dohromady výkon zaměstnání a kvalitní odpočinek. Jednoduché to není proto, že spánek řídí u lidí již zmíněné biologické rytmy, kterých je však několik a vzájemně se kombinují a ovlivňují. Přístup jednotlivců ke spánku tak musí být pro aktivní, musí o něm přemýšlet a dopředu plánovat, aby byli v zaměstnání schopni podávat co nejlepší výkony, a celkově tak udrželi bezpečnost na vysoké úrovni [18].

1.5.2 Biologické rytmy

Mnoho fyziologických procesů v těle má rytmickou povahu, která je řízena zejména v části mozku nazývajícím se hypothalamus. Takovéto procesy pak nereagují jen na bezprostřední podněty zvenčí, ale jsou řízeny zevnitř. Nemusí být navzájem vždy plně synchronizovány a jejich periody se pohybují v rozmezí od 90 minut do až zhruba jednoho měsíce [18].

Jedny z velice výrazných biorytmů, které se opakují každý den a velice přímo ovlivňují u člověka potřebu spánku, se nazývají cirkadiánní rytmy. Jejich perioda je zhruba 24 hodin, ale pokud je jedinec izolován od vnějších ukazatelů času, kterými mohou být například střídání

světla a tmy, pohled na hodiny či pravidelné podávání jídla během dne, a cirkadiánní rytmy se tak nechají volně běžet, tendence této periody je spíše protáhnout se ke 25 hodinám [18]. V rámci těchto rytmů se mění řada fyziologických parametrů, mezi které patří například tělesná teplota, krevní tlak, tepová frekvence nebo produkce hormonů [18]. Na následujícím obrázku je v rámci cirkadiánního rytmu zobrazen průběh bdělosti, hladiny melatoninu (spánkového hormonu) a tělesné teploty.



Obrázek 1.2: Cirkadiánní rytmus - průběh teploty, hladiny hormonů a bdělosti [19] (upraveno)

Jak je vidět na obrázku, tělesná teplota je jedním z relativně snadno měřitelných parametrů, které poměrně výrazně v průběhu rytmu kolísají. Mezi tělesnou teplotou a našim spánkovým cyklem je poměrně přímý vztah, kdy při nejnižší tělesné teplotě člověku dělá největší problém zůstat vzhůru ve stavu bdělosti a naopak, pokud naše tělesná teplota roste či je na denním maximu, dosahuje jedinec nejlepších výkonů [18].

Velice důležitým pojmem spojovaným s únavou a používaným nejen v letectví je takzvaný Window of circadian low, často označovaný zkratkou WOCL. EASA ho definuje jako časový úsek, kdy je pocit únavy nejvýraznější a lidé jsou nejméně schopni vykonávat mentální nebo fyzickou práci. WOCL nastává právě v době, kdy je tělesná teplota na denním minimu a standardně se jako WOCL bere časový úsek mezi časy 02:00 a 06:00, pokud je jedinec plně aklimatizován na lokální časové pásmo [14].



Bude tak velice zajímavé se při experimentu podívat i na to, zda bude definované časové rozmezí korespondovat u testovaných subjektů odpovídat podaným objektivně horším výkonům nebo zda se bude na individuální bázi hodně lišit.

1.6 Shrnutí kapitoly

Nový experiment bude svým způsobem navazovat na předešlý výzkum a prováděná měření zde na ČVUT, která vylepší o vyhodnocování i vertikální roviny společně s horizontální, jelikož pilotům poskytuje stejný, ne-li větší prostor pro chybu a vliv únavy může být také velice patrný. V mé práci se s ohledem na statistiky nehodovosti při zpracování dat zaměřím hlavně na kritickou fázi letu – přiblížení na přistání, konkrétně jeho konečnou fázi. Každý subjekt bude v rámci svého letu provádět vícero přístrojových přiblížení pro zvýšení získaného množství relevantních dat pro vyhodnocení vlivu únavy ve fázi konečného přiblížení.

Implementujeme i poznatky vyplývající ze zmíněných zahraničních experimentů, jako je ukončení sběru dat v určité výšce nad prahem dráhy či analýza vzdálenosti prvního doteku s dráhou od jejího prahu. Vyhodnocení dat provedeme tak, aby výstup byl relevantní vůči indikaci poskytované v kokpitu a skutečně odrážel vliv únavy na výkon pilota.

Správně navržený experiment je velmi důležitou součástí této práce, zapotřebí tedy bude stanovení jasné metodiky, nastavení jednotných pravidel a zajištění, pokud možno, co nejpodobnějších podmínek pro všechny subjekty, aby nedocházelo k ovlivňování výsledků nežádoucími externími vlivy a zároveň se daly co nejlépe vyhodnotit parametry adekvátní ke zjišťování míry únavy a jejího vlivu na provedení konečného přiblížení. Pro stanovení specifik a průběhu experimentu tak budeme vycházet z faktů a poznatků získaných odborníky při již zmíněných experimentech, na jejichž základě celé měření postavíme.

2 Metody

Na základě skutečností zjištěných při analýze současného stavu je potřeba stanovit vlastní přístup k řešení problému, popsat experiment, definovat práci na něm a také přiblížit použité vybavení, metody a způsob, jakým byla data hodnocena. Na to se zaměřím v kapitole metody.

2.1 Simulátor

Celé měření bude provedeno na simulátoru letounu Beechcraft Baron na Ústavu letecké dopravy na Fakultě dopravní ČVUT v Praze. Simulátor obsahuje sadu palubních přístrojů, podle kterých byly lety prováděny – rychloměr, umělý horizont, barometrický výškoměr, CDI, zatáčkoměr a příčný relativní sklonoměr, směrový setrvačník, variometr, sekundární CDI, radiokompas a magnetický kompas. Dále byla k dispozici sada přístrojů pro kontrolu draku a pohonné jednotky a v neposlední řadě také modul pro využití družicové navigace simulující jednotku Garmin řady GTN750, vyobrazen v detailu na obrázku 2.1, s jehož využitím byla prováděna traťová navigace při přeletech mezi letišti, na kterých byla hodnocena přístrojová přiblížení.



Obrázek 2.1: Modul pro družicovou navigaci simulující Garmin GTN 750

Samotné ovládací prvky simulátoru odpovídají prvkům ve skutečném letadle. Pro řízení podélného sklonu a náklonu pilot používá takzvané berany, pro ovládání směrového kormidla potom pedály a pro nastavování výkonu, bohatosti směsi a úhlu náběhu stavitelných vrtulí slouží pro každý z těchto parametrů dvě páky pod středovou konzolí obsahující spínače pro elektrické a palivové systémy a také ovladač podélného vyvážení, ovladač klapek a páku zatahovatelného podvozku. Simulátor tak bylo možné ovládat velice podobně, jako skutečný letoun, a to včetně použití takzvaných check-listů pro kontrolu důležitých úkonů pro každou fázi letu. Reference o okolním prostředí a poloze letadla mohl subjekt získat z palubních přístrojů, modulu pro družicovou navigaci a pod výškou rozhodnutí také z projekce simulující výhled z kabiny v závěrečné části konečného přiblížení. Navigační dokumentace sestávající z map pro přílety, odlety a přístrojová přiblížení byla k dispozici v jednotném formátu od firmy Jeppesen jak v papírové podobě, tak i v podobě elektronické na zařízení Apple iPad. Na obrázku 2.2 je potom vidět celé prostředí simulátoru s přístroji, navigační dokumentací a checklistem.



Obrázek 2.2: Prostředí simulátoru včetně přístrojů, navigační dokumentace a checklistu



2.2 Průběh experimentu

Celkově letěl během měření každý subjekt osm letů, z nichž každý trval kolem jedné hodiny a zavedl pilota na tři různá letiště včetně letiště odletu. Lety měly uniformní průběh, kdy bylo po vzletu z prvního letiště třeba následovat standardní přístrojový odlet SID, následně navázat na standardní přístrojový přilet STAR na druhém letišti, vykonat přilet, vykonat přístrojové přiblížení, přistát a hned začít konfigurovat letadlo na druhou část letu, která vedla též přes tratě SID a STAR na ILS přiblížení na třetí letiště. Během celé této doby subjekt konfiguroval letadlo, pracoval s navigační dokumentací, nastavoval navigační přístroje, prováděl samotný let a k tomu přecházel mezi jednotlivými radiovými frekvencemi, na kterých komunikoval s řídicím letového provozu, který postupně vydával letová povolení adekvátní pro danou část letu. Vznikly tak podmínky velice podobné těm, které panují na palubě skutečného letounu při letu podle přístrojů.

Časový průběh jednoho z měření je zaznamenán v tabulce 2.1. Začátek experimentu byl stanoven jednotně pokaždé na 18:00 místního času, kdy začaly přípravy techniky, krátká instruktáž a seznámení s prvky simulátoru, kontrola všech záznamových zařízení spojených s dalšími měřeními probíhajícími v rámci jednoho experimentu, nastavení instruktorské stanice a repozice letounu na první letiště prvního letu. Subjekty létaly po dvojicích, kdy jeden z nich vždy vykonával let a druhý mezi tím plnil úkoly v podobě únavových dotazníků a testů rychlosti reakcí. Po dokončení letu bylo vždy potřeba uložit naměřená data, repozicovat letoun v rámci simulátoru na odpovídající letiště pro začátek letu dalšího a na jednotlivce, který byl jeho účastníkem, byly umístěny akcelerometry, elektrokardiografické elektrody a elektroencefalografická helma pro měření mozkové aktivity.

Jakákoliv forma spánku byla mezi lety zakázána a povolena nebyla ani konzumace výrobků obsahující kofein nebo jiné stimuluující látky. Krom dvou subjektů byl u experimentu přítomen celou dobu jeden další člověk, který zastával roli řídicího letového provozu, obsluhoval instruktorské stanoviště, kde mohl nastavovat atmosférické podmínky, měnit pozici letadla



a sledovat průběh celého letu a zaznamenával průběh experimentu, přičemž také sledoval funkčnost všech záznamových zařízení.

Tabulka 2.1: Časový harmonogram jednoho dne měření se dvěma subjekty

pozn.: Pro účely vyhodnocování budou označeny jednotlivá přiblížení s přistáními jako jednotlivé lety, tzn. druhé přistání při prvním letu bude označeno jako druhý let, první přistání v druhém letu jako třetí let apod.

		Subjekt 1	Subjekt 2			Subjekt 1	Subjekt 2
1. Trať	Start měření	19:23:29	21:07:54	5. Trať	Start měření	07:10:18	08:20:38
	1. Přistání	19:52:05	21:39:03		1. Přistání	07:36:22	08:48:02
	2. Přistání	20:24:18	22:12:25		2. Přistání	08:04:20	09:21:40
2. Trať	Start měření	22:35:12	00:10:15	6. Trať	Start měření	10:16:00	11:57:47
	1. Přistání	23:12:10	00:46:45		1. Přistání	10:44:11	12:28:32
	2. Přistání	23:50:49	01:10:23		2. Přistání	11:33:26	13:24:09
3. Trať	Start měření	01:28:45	02:53:29	7. Trať	Start měření	13:14:16	15:19:10
	1. Přistání	01:56:38	03:15:08		1. Přistání	14:19:08	15:52:31
	2. Přistání	02:44:21	04:00:20		2. Přistání	15:04:33	16:30:48
4. Trať	Start měření	04:10:16	05:26:43	8. Trať	Start měření	16:40:18	17:36:54
	1. Přistání	04:38:43	05:56:16		1. Přistání	17:09:50	18:00:56
	2. Přistání	05:14:29	06:30:33		2. Přistání	17:30:27	18:20:26

2.3 Trať a letiště

Trať a letiště, která byla vybrána pro tento experiment leží ve střední Evropě a jsou si navzájem poměrně podobná, aby byly nároky na pilota v průběhu experimentu, pokud možno, po celou dobu na podobné úrovni. Následuje seznam tratí, jednotlivých letišť, procedur, které byly letěny (odlety a přílety) a také dokumentace, která byla ke každému letu potřeba:



Trať č. 1:

První trať začíná na německém letišti u Lipska poblíž města Altenburg (EDAC). Po vzletu z dráhy 04 se levou zatáčkou pilot dostane k radiomajáku GOT, ze kterého pak pokračuje k letišti Lipsko/Halle (EDDP), kde přistává na dráze 08L. Po rekonfiguraci letounu poté opět ze stejné dráhy vzlétá a přes odletovou trať MAG 3E a bod PENEM přeletí na finální letiště Magdeburg Cochstedt (EDBC), kde využije dráhu 26.

EDAC – SID OSKAT 1G, po R-104 GOT až na VOR GOT

EDDP – přílet na GOT, z GOT na SONDU (IAF) podle STAR chart RWY 08L/08R a pak ILS 08R, SID MAG 3E přes PENEM

EDBC – ILS 26 s IAF MAG

Dokumentace: EDAC SID RWY04, EDDP STAR 08L/08R, EDDP IAC ILS 08L, EDDP SID 08R, EDBC IAC ILS RWY 26

Trať č. 2:

Druhá trať začíná na dráze 22 v německých Drážďanech, ze které pilot odletí po odletové trati MAREM 5W, následně přelétne na bod GOPSI, kde začíná příletová trať GOPSI 2P na letišti do Karlových Varů, na jehož dráze 29 pilot přistane. Po nakonfigurování letounu a vzletu z dráhy 29 přes odletovou trať OKG 1F přes radio maják Cheb se letoun dostane na začátek příletové tratě ABERU 3A, která letadlo dovede až na letiště Hof-Plauen (EDQM).

EDDC – SID MAREM 5W, pokračujeme na GOPSI

LKKV – STAR GOPSI 2P na IAF ARMOV a dále ILS 29, SID OKG 1F, pokračování na ABERU

EDQM – STAR ABERU 3A na IAF HOF, pak ILS RWY 26

Dokumentace: EDDC SID RWY 22, LKKV STAR 29, LKKV IAC ILS 29, LKKV SID 29, EDQM STAR 08/26, EDQM IAC ILS RWY 26



Trať č. 3:

Aby se pilot vydal na třetí trať, odstartuje z letiště v Eggenfeldenu (EDME), kde po odletové trati BIBAG 1R nasadí kurz na bod BADIT, který už leží v Rakousku a začíná na něm příletová trať BADIT 1R pro přílet do Salzburgu (LOWS). Po přistání na dráze 15 a následné předletové přípravě subjekt odstartuje a za využití odletové tratě NEMAL 3A vedoucí na úpatí rakouských Alp nasadí kurz na letiště v Linci (LOWL). Poletí přes bod ARASA a odpovídající RNAV (Area navigation - prostorová navigace) transition, který ho navede na přístrojové přiblížení na dráhu 26.

EDME – SID BIBAG 1R, dále na BADIT

LOWS – STAR BADIT 1R na VOR SBG, poté přes SBG ILS RWY 15, SID NEMAL 3A

LOWL – STAR NEMAL 1K na ARASA a transition ARASA 1D přes WL812, WL822, WL827, WL828, PEROL na ILS RWY 26

Dokumentace: EDME SID RNAV 08/26, LOWS STAR, LOWS IAC ILS 15, LOWS SID RWY 15, LOWL STAR, LOWL RNAV Transition to IAP, LOWL IAC ILS RWY 26

Trať č. 4:

Čtvrtý let začne na letišti v Ostravě (LKMT), kde bude pro start využita dráha 22 směřující na jihozápad, poté bude subjekt pokračovat přes Holešov na letiště v Brně (LKTB), kde provede přístrojové přiblížení a přistání na dráhu 27. Po opětovném vzletu z Brna se vydá opět směrem na jih a přes odletovou trať MIKOV 2A a příletovou trať MIKOV 7W do Vídně (LOWW) opustí vzdušný prostor České republiky, aby přistál na dráze 16 mezinárodního letiště ve Schwechatu.

LKMT – SID HLV6F na NDB HLV

LKTB – STAR HLV3C přes IAF BUKAP na ILS 27, pokračujeme SID MIKOV 2A

LOWW – STAR MIKOV 7W na MABOD a pak buď transition to final dle AIP nebo vectoring (zhruba k VOR WGM – velice blízko FAF) a ILS 16

Dokumentace: LKMT SID 22, LKTB STAR 27, LKTB IAC 27, LKTB SID 27, LOWW



STAR, LOWW transition to final, LOWW IAC 16

Trať č. 5:

Pro pátou trať opět přesuneme letadlo do německých Drážďan (EDDC), kde se po startu z dráhy 22 přes odletovou trať BEBEX7W napojíme na přílet BEBEX 2T k letišti Lipsko/Altenburg (EDAC). Z Altenburgu odletí pilot po GOLAT 7H, který nás dostane blízko k radiomajáku ERF, ze kterého lze zahájit přílet na letiště v Erfurtu, na němž využijeme pro přistání přístrojového přiblížení na dráhu 28.

EDDC – SID BEBEX7W

EDAC – STAR BEBEX 2T na IAF ABU, následně ILS 22, SID GOLAT7H

EDDE – přílet na IAF (VOR ERF), ILS 28

Dokumentace: EDDC SID 22, EDAC STAR, EDAC IAC ILS 22, EDAC SID RWY 22, EDDE IAC 28

Trať č. 6:

Šestá trať zavede subjekt opět do České republiky, konkrétně na letiště v Karlových Varech (LKKV), odkud odletí po odletové trati BALTU 9Z, naletí bod LOMKI, ze kterého začne přílet na největší české mezinárodní letiště v Praze-Ruzyni (LKPR). Po přistání na dráze 06 následuje opět odlet, tentokrát po odletové trati VOZ 3D, která končí na radio majáku Vožice, odkud bude pokračovat na bod USUPA a přes příletovou trať USUPA 1M přiletí k letišti v Pardubicích (LKPD), kde pro přistání využije dráhu 27 směřující k západu z důvodu ILS přiblížení, které vede pouze z jednoho směru.

LKKV - SID BALTU9Z skončí na BALTU, pokračujeme na LOMKI

LKPR – STAR LOMKI6T přes IAF BAROX na ILS 06 SID VOZ3D, pokračujeme na USUPA

LKPD – STAR USUPA1M na IAF PK (NDB) a ILS 27

Dokumentace: LKKV SID 11, LKPR STAR 06, LKPR IAC 06, LKPR SID 06, LKPD STAR



27, LKPD IAC 27

Trať č. 7:

Sedmá trať vychází jako nejdelší ze všech a začíná v rakouském Salzburgu (LOWS), kdy se po odletové trati TITIG 2A a následném letu na bod NAPSA pilot dostane přes rakousko-německé hranice a přes příletovou trať NAPSA3A doletí k letišti v Mnichově (EDDM). Po přistání na dráze 26L odletí po odletové trati RIDAR 6S severně, pokračuje na radio maják DKB, kde začíná příletová trať DKB 5T. Poté, co pilot dosáhne bodu LETKU, dostane od řídicího pokyn pokračovat přímo na NUB, který je bodem počátečního přiblížení ILS na dráhu 28.

LOWS – SID RWY33 TITIG 2A, skončíme na TITIG a pokračujeme na NAPSA

EDDM – STAR NAPSA3A, na IAF OTT, pak ILS 26L a SID RIDAR6S, pokračování na VOR DKB,

EDDN – STAR DKB 5T, při dosažení LETKU DCT IAF NUB a ILS 28

Dokumentace: LOWS SID 33, EDDM STAR 08/26 SE, EDDM IAC ILS 26L, EDDM SID RWY26L N, EDDN STAR, EDDN IAC ILS 28

Trať č. 8:

Poslední, osmá trať začíná na letišti Lipsko/Halle (EDDP), kde tentokrát přes odletovou trať RUDAK 1E subjekt pokračuje na bod OSKAN, odkud už může začít přilet na letišti v Drážďanech (EDDC) OSKAN 4A. Jako bod počátečního přiblížení poslouží GARKI, ze kterého subjekt zahájí přístrojové přiblížení na dráhu 22. Z dráhy 22 potom odletí přes odletovou trať BEBEX 7W, která plynule naváže na přilet BEBEX 2T na letišti Lipsko/Altenburg (EDAC), na kterém po přeletění bodu počátečního přiblížení ABU pro přistání pilot využije dráhu 22.

EDDP – SID RUDAK 1E, pokračování na OSKAN

EDDC – STAR OSKAN 4A na IAF GARKI a pak ILS 22, SID BEBEX7W



EDAC – STAR BEBEX 2T na IAF ABU, ILS 22

Dokumentace: EDDP SID 08R, EDDC STAR 04/22, EDDC IAC ILS 22, EDDC SID RWY 22, EDAC STAR, EDAC IAC ILS 22

2.4 Subjekty

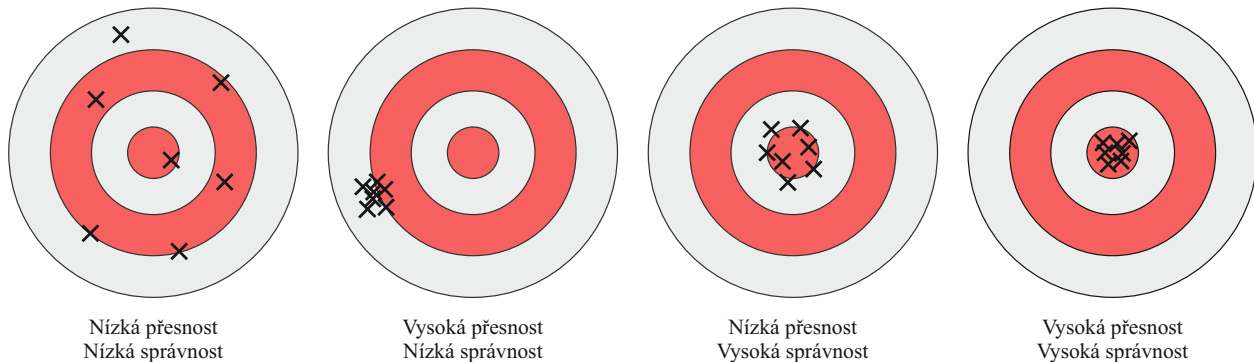
Experiment letělo celkem osm subjektů, z nichž byli všichni držitelé průkazu PPL(A) – soukromý pilot letounů a v době konání experimentu létali v rámci výcviku IR – Instrument rating pro získání kvalifikace pro let podle přístrojů. Průměrný věk účastníků experimentu byl 22 let \pm 3 roky a nálet se pohyboval v rozmezí 100 až 150 hodin v letounech a 30 až 50 hodin na certifikovaném FNPT II simulátoru v letecké škole ATO (Approved Training Organisation). Až na jednoho člověka byli všichni studenti třetího ročníku oboru Profesionální pilot na Fakultě dopravní ČVUT v Praze, což zajistilo velice podobnou míru znalostí a dovedností v rámci problematiky provádění letu v podmínkách létání podle přístrojů. Všichni byli také instruováni, aby v den experimentu vstávali v 08:00, aby byla zajištěna stejná doba bdění během experimentu.

2.5 Přesnost a správnost

Vzhledem k povaze analyzovaných dat a jejich následnému správnému vyhodnocení je třeba definovat dva statistické pojmy a rozdíl mezi nimi: přesnost – precision a správnost – accuracy. Tyto dva pojmy mohou být v běžném životě často zaměňovány, ale pro použití v rámci měření dat je důležité mezi nimi rozlišovat. Správnost měření je dána vztahem mezi naměřenou hodnotou a hodnotou správnou či absolutní, udává, jak jsou od sebe navzájem daleko [10]. Je samozřejmě žádoucí, aby se naměřená přiblížila té správné co nejvíce. Správnost měření ovlivňují zejména systematické chyby, tedy konstantního charakteru. Druhým pojmem je potom přesnost měření, ta vyjadřuje, jak jsou od sebe navzájem vzdáleny jednotlivé naměřené hodnoty [10], dá se tedy zhodnotit například jejich rozptylem. Ovlivňují jí zejména náhodné chyby. Je důležité uvědomit si, že je možné měřit či provádět činnosti správně, ale nepřesně;

přesně, ale nesprávně; nesprávně i nepřesně a v ideálním případě správně i přesně.

Celý tento koncept bývá typicky ilustrován na střeleckém terči, kde je rozdíl mezi přesností a správností poměrně patrný, jak je dobře vidět na obrázku 2.3:



Obrázek 2.3: Přesnost a správnost ilustrována na střeleckém terči

V případě vykonání konečné fáze přesného přiblížení lze přesnost a správnost samozřejmě také vyjádřit. Pro zjednodušení můžeme nejdříve uvažovat pouze vertikální rovinu, jako reference, kde by se měl letoun v průběhu celého přiblížení nacházet, tedy poslouží přímka znázorňující trajektorii sestupové roviny o sklonu $3,0^\circ$. Pokud by bylo přiblížení zaletěno naprosto přesně a zcela správně, letoun se bude po celou dobu nacházet na této přímce. v případě, že by například stejnému pilotovi byla odchylka od sestupové roviny konstantě chybně indikována, aviatik by se držel například o půl stupně nad ideálním sestupem, přiblížení by bylo zaletěno přesně ale nesprávně. Další variantou by mohl být jiný pilot, který by se v průběhu přiblížení neustále pohyboval kolem oné ideální trajektorie v obou směrech, nahoru i dolů, ve výsledku se ale skutečně držel kolem třech stupňů, přiblížení tak bylo zaletěno správně, nicméně díky jeho velkým odchylkám v jeho průběhu, tím i jejich vysokému rozptylu, bylo zaletěno nepřesně. Lze samozřejmě uvažovat i čtvrtou možnost, tedy přiblížení nesprávné a nepřesné, kdy by se pilot držel zcela mimo třístupňovou sestupovou rovinu, a ještě zcela nekonzistentně.



V konečné fázi přiblížení je velice důležité letět ho správně, aby byla dodržena stanovená trajektorie, z důvodu rozstupu od překážek, oblastí citlivých na hluk, ostatního provozu nebo terénu, ale zároveň existuje již zmíněný legislativní požadavek na přesnost. Pilot se při přiblížení ILS nesmí dostat do situace, kdy je pod 1000 ft. AGL jeho odchylka od sestupové roviny a trajektorie dané kurzovým radiomajákem větší než polovina stupnice indikace jeho palubního přístroje CDI.



2.6 Výstupní data

Průběh celého letu byl nahráván prostřednictvím instruktorské stanice, jejíž uživatelské rozhraní je vidět na obrázku 2.4, kde je vidět dokonce grafický výstup fáze konečného přiblížení pro zběžné vizuální zhodnocení výkonu pilota v reálném čase. Pro řízení letu nabízí mnoho možností týkajících se jak prostředí, například změny počasí a repozice na jiné místo, tak i letounu samotného, zobrazení letových přístrojů a parametrů, simulaci závad a mnoho dalšího.



Obrázek 2.4: Uživatelské rozhraní instruktorské stanice se zobrazením konečného přiblížení

Pro zhodnocení vlivu únavy na provedení přístrojového přiblížení je potřeba nahrát průběh letu, aby bylo možno provést analýzu polohy letadla vůči té optimální v průběhu času. Program Instructor Station by Luis Gordo, taktéž znám jako iStation, který byl použit ve spojení se simulátorem Microsoft Flight Simulator X, takovou funkcionalitu nabízí a po zapnutí nahrávání začne s periodou 0.4 sekundy, tedy frekvencí 2.5 Hz, zaznamenávat sadu výstupů ze simulátoru do textového souboru formátu DAT. Zaznamenává čas, rychlosti,



výšku, náklon a podélný sklon, kurz, trať, souřadnice a konfiguraci letounu. Příklad části tohoto výstupu je vidět v následující tabulce.

Tabulka 2.2: Příklad výstupu z nahrávání letových dat v rámci instruktorské stanice
IAS (Indicated Airspeed) - Indikovaná vzdušná rychlost, TAS (True Airspeed) - Pravá vzdušná rychlost, GS (Ground Speed) - Rychlost vůči zemi, VS (Vertical speed) - Vertikální rychlost, HDG (Heading) - Kurz, LAT (Latitude) - Zeměpisná šířka, LONG (Longitude) - Zeměpisná délka

Čas (s)	IAS	TAS	GS	VS	Výška	Pitch	Bank	Track	HDG	LAT	LONG
700	160	176	175	-218	6932	0.7	8.9	188	184	48.828744	16.632363
700.4	160	176	175	-210	6932	0.7	9.5	188	184	48.828417	16.632298
700.8	160	176	176	-203	6929	0.6	10.0	187	183	48.828091	16.623237
701.2	160	176	176	-196	6929	0.6	10.5	187	183	48.827763	16.632179
701.6	160	176	176	-189	6929	0.6	11.0	187	183	48.827435	16.632125
702	160	176	176	-184	6926	0.6	11.4	186	182	48.827107	16.632075

Jak je vidět, zaznamenáváno je relativně velké množství dat, přičemž pro účely tohoto experimentu jsou nejpodstatnější sloupce obsahující čas, nadmořskou výšku a souřadnice v podobě zeměpisné šířky a zeměpisné délky. Pro každé letiště, na které bylo vykonáváno přístrojové přiblížení pak byla ručně stanovena informace o poloze takzvaného zaměřovacího bodu, kam pilot směřuje své přistání. Na přistávací dráze je toto místo vyznačeno dvěma bílými obdélníky. znát přesné souřadnice tohoto místa je velmi důležité, neboť právě z něj bude v prostoru konstruován kužel, za pomoci kterého budou přiblížení hodnocena.

Po ukončení experimentu pak budeme pracovat pro každý jednotlivý subjekt s 16 výstupy z instruktorské stanice s nahranými letovými daty ve formátu jako v tabulce 2.2 – v rámci 8 letů byla při každém provedení dvojice přístrojových přiblížení, z nichž každé bylo nahráno zvlášť. Krom letových dat byly zaznamenány také časy jednotlivých letů a přiblížení, aby bylo možné dát přesnost do kontextu s cirkadiánními rytmy a únavou. Třetím vstupem do zpracování dat je potom soubor obsahující souřadnice a výšky jednotlivých zaměřovacích bodů. S těmito daty budeme při zvolení vhodné metody schopni analyzovat a zhodnotit vliv



únavy na provedení přístrojového přiblížení.

2.7 Metoda vyhodnocení dat

Pro práci s daty byl navržen skript v rámci prostředí programu MATLAB, pomocí kterého jsme schopni v prostoru vykreslit kužel, jehož vrchol je umístěn v bodě dotyku s drahou. Je také potřeba vzít v potaz takzvané podrovnání a kužel tedy mírně posunout. Osa kužele, tedy úsečka mezi vrcholem a bodem v podstavě, kolem kterého je podstava symetrická – pro kruhovou podstavu její střed, pak v případě tří stupňového sestupu svírá s povrchem dráhy, který je v rámci prostředí simulátoru vodorovný, právě úhel třech stupňů a pokračuje do výšky 1000 ft nad vztazný bod letiště, kde, jak již bylo zmíněno, existuje legislativní požadavek na stabilizované přiblížení. Přesnost bude tedy hodnocena mezi tisícem stop a povrchem dráhy.

Simulátor použitý při experimentu ukládá údaje o poloze letounu vyjádřenou jako stupně zeměpisné délky, stupně zeměpisné šířky projekce polohy letounu na zemský povrch a výšku letounu nad střední hladinou moře (MSL). Při vyhodnocení je proto třeba pracovat ve sférické soustavě souřadné a výšku nad úrovní moře taktéž převést na úhlovou souřadnici.

V situaci, kdy známe bod v prostoru, který má být vrcholem kužele, řekněme $P(a,b,c)$, v našem případě shodný s bodem dotyku letounu na přistávací dráze, můžeme zkonstruovat úsečku se směrem shodným se směrem přiblížení o požadovaném sklonu většinou právě 3.0° , která sahá do výšky 1000 ft AAL. Na konci této úsečky se pak nachází bod, ve kterém bude střed podstavy kýžného kužele pojmenovaný $S(x_0, y_0, z_0)$. Poté si průměrem podstavy určíme, jak bude kužel rozevřený, a označíme ho R .

Parametrická rovnice kružnice podstavy pak bude ve tvaru:



$$\gamma(u) = (x_0 + R \cos u, y_0 + R \sin u, 0) \quad (2.1)$$

Každý bod na kuželu potom leží na přímce procházející bodem $P(a, b, c)$ a bodem na kružnici podstavu, proto platí:

$$\gamma(u) - P = (x_0 + R \cos u, y_0 + R \sin u, 0) - (a, b, c) = (x_0 - a + R \cos u, y_0 - b + R \sin u, -c) \quad (2.2)$$

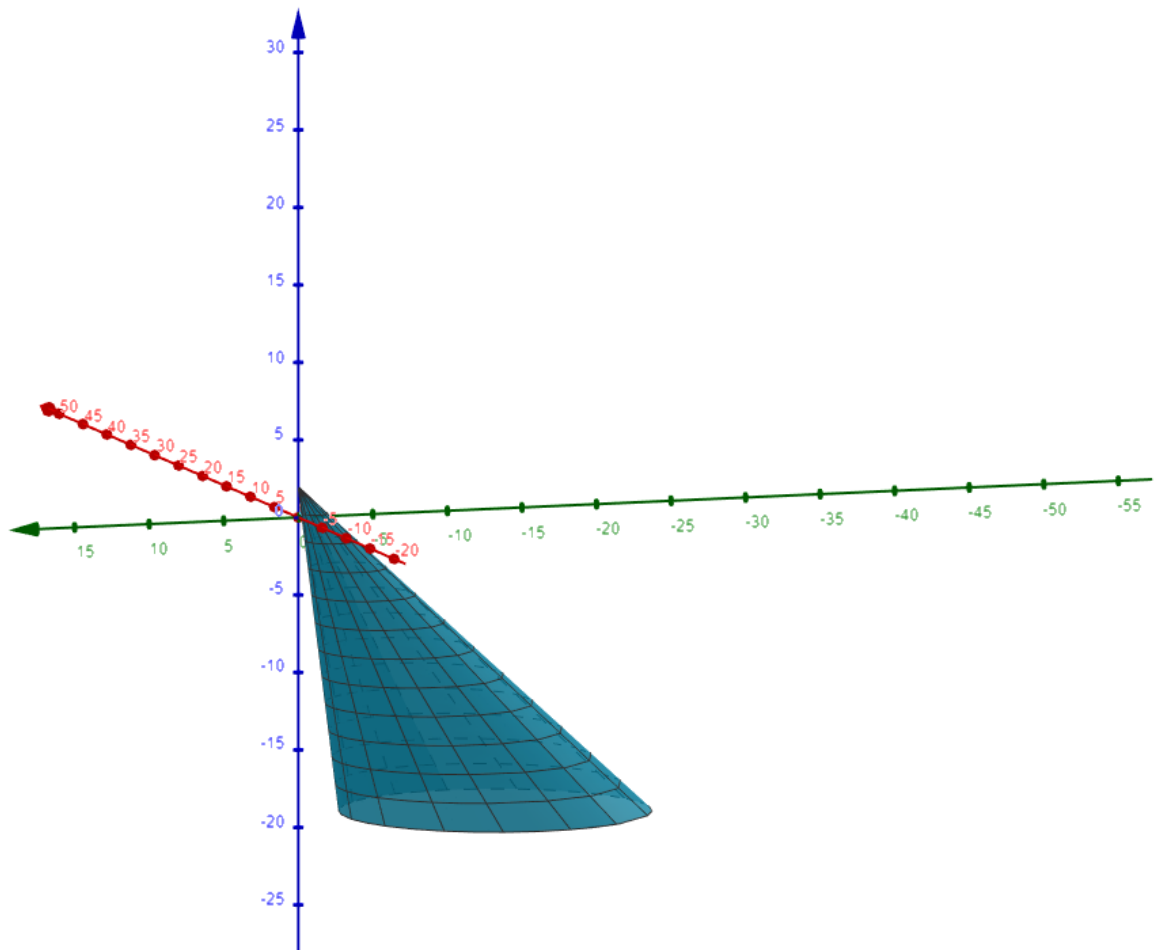
A jelikož přímka prochází bodem $P(a, b, c)$, parametrická rovnice přímky bude:

$$P + v(\gamma(u) - P) = (a, b, c) + v(x_0 - a + R \cos u, y_0 - b + R \sin u, -c) \quad (2.3)$$

Po zjednodušení potom dostaneme parametrickou rovnici kuželu:

$$\sigma(u, v) = (a(1 - v) + v(x_0 + R \cos u), b(1 - v) + v(y_0 + R \sin u), c(1 - v)) \quad (2.4)$$

Pokud do rovnice 2.4 dosadíme například hodnoty $P(0, 0, 2)$, $S(-1, -1, 0)$, $R = 1$ a parametry necháme nabývat hodnot: $u = [0, 2\pi]$ a $v = [0, 10]$, dostaneme kužel, který vidíme na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Kužel sestrojený s pomocí daných parametrů a bodů (GeoGebra)

V momentě, kdy máme takto zkonstruován kužel a vhodně ho umístíme do prostoru, můžeme nastavit jeho rozevření tak, aby přibližně odpovídal kritériím pro stabilizované přiblížení, tedy pod 1000 ft ne více než polovina odchylky stupnice indikátoru LOC a GS. Poté vezmeme trajektorii letu a pod 1000 ft porovnáme s kuželem, načež určíme, zda ve svém průběhu leží vně či uvnitř, z čehož můžeme usoudit, z jaké části se jednalo o přiblížení stabilizované, tedy jaká část trajektorie se nachází uvnitř kuželu a jaká část mimo. Právě to bude dobrým ukazatelem měnící se přesnosti pilotáže, kdy zjistíme procenta pro jednotlivá měření a budeme moci určit, zda se zde u subjektů vyskytovaly nějaké změny v závislosti na míře únavy, jelikož víme přesně, kdy jednotlivá měření proběhla.



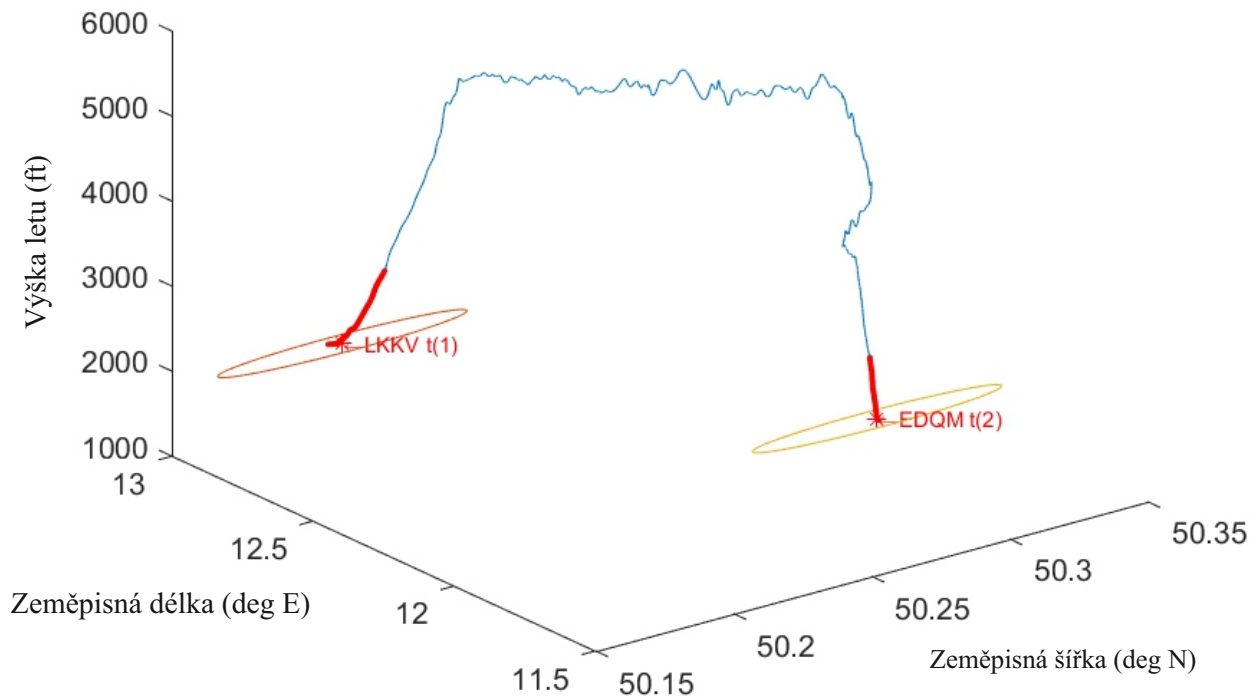
2.8 Teorie statistické analýzy

Jednotlivá měření pak budou podrobena statistické analýze a nejdříve budou vykreslena pomocí takzvaného krabicového diagramu, viz obr. 3.5, který ukazuje několik důležitých hodnot pro jednotlivé lety. Grafické zobrazení ve formě krabicového diagramu, jinak také takzvaného boxplotu, ukazuje odshora maximum, třetí kvartil, medián, první kvartil a minimum souboru dat pro jednotlivé lety.

Z povahy měření vyplývá, že data pro jednotlivé lety budou závislá, a tak využijeme test pro účely komparace dat. Neuvažujeme normalitu rozdělení, a tak vybíráme z neparametrických testů. Jako vhodný by se nabízel *Friedmanův test*, ale jelikož vlivem některých chybějících dat nemá každé měření stejně údajů, je potřeba zvolit test jiný. Bude tedy použit takzvaný *Skillings–Mackův test*, který je v zásadě variantou Friedmanova testu, ale může být použit i pro nekompletní data, která mohou chybět záměrně nebo zcela náhodně [20].

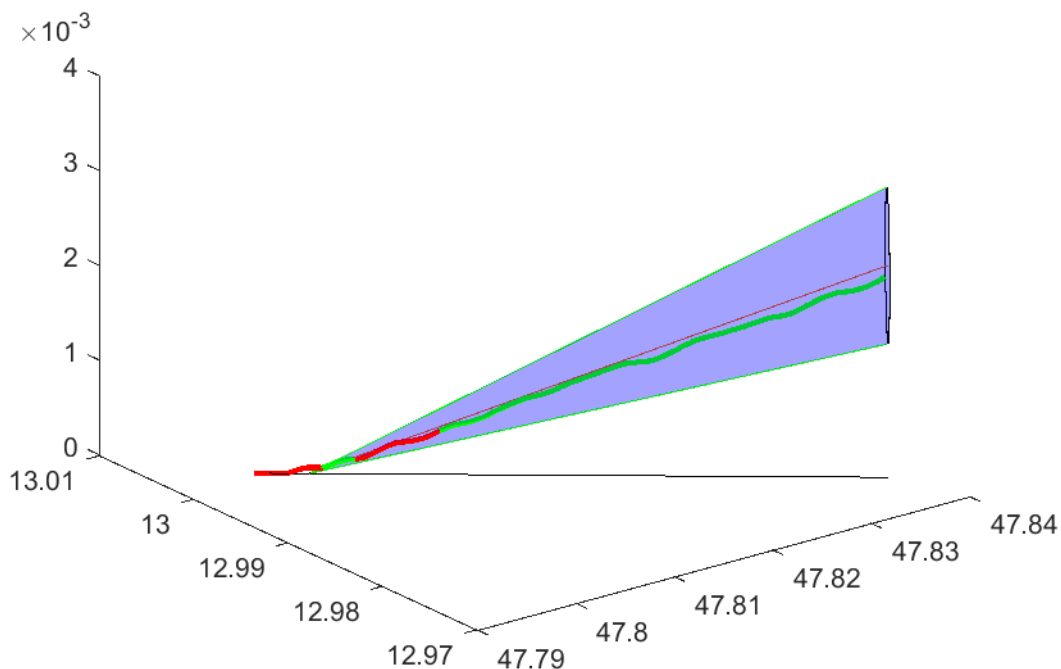
3 Prezentace výsledků

Po zaznamenání dat byla pomocí počítačového programu vykreslena trajektorie jednotlivých letů pro jednotlivé subjekty. Jak takovéto vykreslení vypadá je potom vidět na obrázku 3.1. Můžeme si všimnout červeně zvýrazněné části, která vyznačuje úseky, ve kterých je letová výška nižší než 1000 ft nad vztažným bodem letiště, tedy úseky, které nás zajímají pro vyhodnocení, zda bylo přiblížení stabilizované nebo nebylo. Takovéto úseky jsou během letu dva, zajímavý pro nás však jen druhý u cílového letiště, protože část stoupání po vzletu není předmětem hodnocení. Je také dobře vidět, že výška nebyla během letu konstantní, ale fluktovala kolem výšky přidělené řídicím letového provozu. Také je dobře vidět okamžik, kdy pilot začal z cestovní hladiny klesat do výšky, ve které čekal na nalétnutí GS, ze které poté začal fázi konečného přiblížení k dráze.



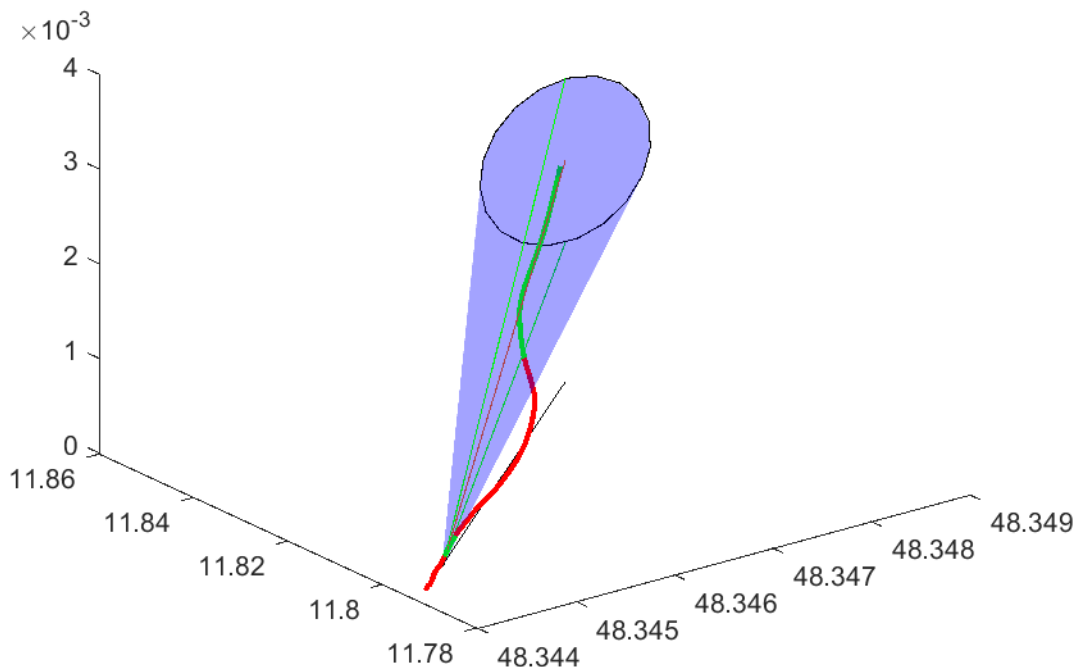
Obrázek 3.1: Trajektorie letu z Karlových Varů (LKKV) do Hofu (EDQM)

Pokud se podíváme blíže právě na úseky zvýrazněné v předchozím obrázku červeně, uvidíme právě fázi posledního tisíce stop před dosednutím na dráhu. Do tohoto místa byl pak umístěn kužel, za jehož pomocí hodnotíme přesnost. Toto umístění je vidět na následujícím obrázku. Tenkou červenou čarou je zde zvýrazněna třístupňová sestupová rovina a tenkými zelenými čarami pak okraje kuželu v tomto podélném řezu ohraničující oblast, ve které se ještě jedná o stabilizované přiblížení. Tlustou čarou je potom znázorněna trajektorie letu a to ve dvou barvách, jednak zeleně pro úseky, které se nachází uvnitř kuželu, druhak potom červeně, kde je už mimo kužel. Na obrázku 3.2 je vidět, že v průběhu přiblížení se subjekt držel po většinu času poměrně přesně nejen uvnitř kužele, ale i velice správně vertikálně kolem třístupňového sestupu. V samotném závěru přiblížení se však dostal mimo kužel v horizontální rovině, a tak je vidět červená část trajektorie, ač vertikálně je velmi správná a přesná.



Obrázek 3.2: Sestupový kužel s trajektorií mezi 1000 ft AAL a zemí,
pozn.: Na osách se nachází souřadnice v podobě zeměpisné délky, zeměpisné šířky a výška převedená na úhel

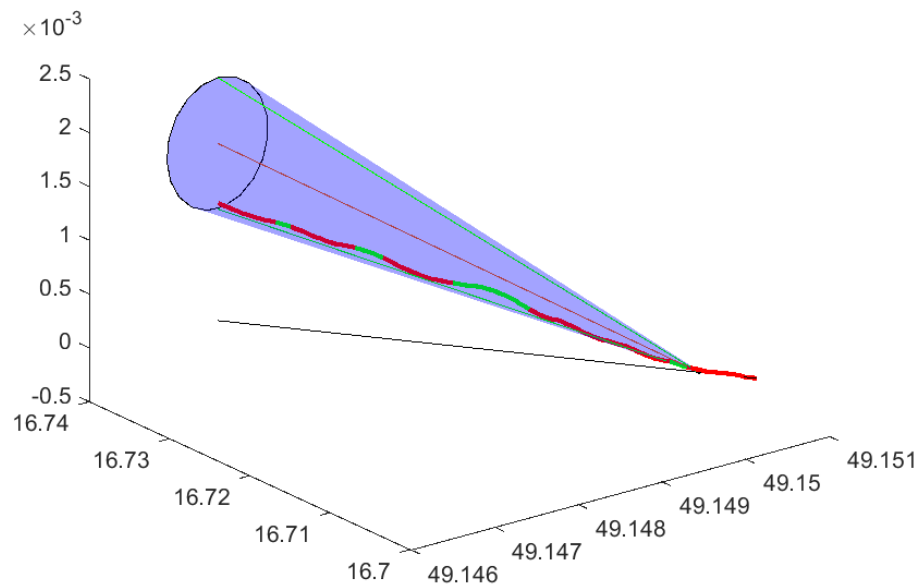
Na obrázku 3.3 pak vidíme, jak to vypadá, když je přiblížení zaletěno méně přesně, ze začátku se subjekt držel prakticky na ideálním sestupu, nicméně zhruba v 500 ft AAL nechal letoun výrazně podklesat GS a vybočil značně doleva, a tak se dostal mimo kužel stabilizovaného přiblížení, kde se držel prakticky až do podrovnání a dosednutí na dráhu. V tomto případě se uvnitř kužele nachází pouze 47 % délky.



Obrázek 3.3: Sestupový kužel s patrným vybočením v polovině přiblížení,

pozn.: Na osách se nachází souřadnice v podobě zeměpisné délky, zeměpisné šířky a výška převedená na úhel

V obrázku 3.4 je potom vidět průběh přiblížení při sedmém letu, který je zajímavý v kontextu s fází biologických rytmů, jak je popsáno v kapitole diskuze výsledků.



Obrázek 3.4: Kužel přiblížení letěného jedním ze subjektů během sedmého letu, v době odpovídající WOCL,

pozn.: Na osách se nachází souřadnice v podobě zeměpisné délky, zeměpisné šířky a výška převedená na úhel

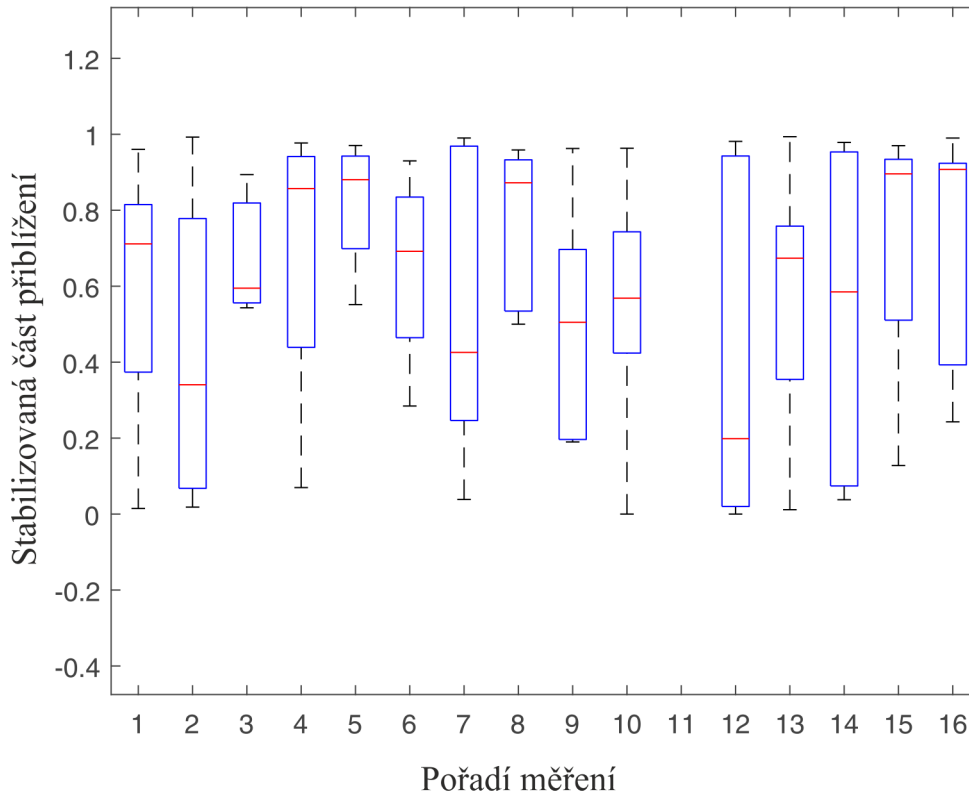
Následuje tabulka 3.1 s jednotlivými hodnotami pro šest subjektů, které vyjadřují, jaká část přiblížení se nachází uvnitř kužele, a je tedy stabilizovaná. Hodnota 1 by značila, že celé přiblížení se pod 1000 ft AAL odehrálo v rámci kužele, kdežto hodnota 0 říká, že se během sestupu letoun v kuželu nevyskytl.



Tabulka 3.1: Poměrné vyjádření stabilizovanosti přiblížení pro jednotlivá měření

	Subjekt 1	Subjekt 2	Subjekt 3	Subjekt 4	Subjekt 5	Subjekt 6
1. let	0.960	0.766	0.493	–	0.015	0.711
2. let	–	0.117	0.564	–	0.085	0.993
3. let	0.894	0.595	0.543	–	–	–
4. let	0.977	0.906	0.808	0.070	–	–
5. let	0.915	0.846	0.970	0.552	–	–
6. let	0.644	0.739	0.930	0.285	–	–
7. let	0.534	0.317	0.038	0.246	0.990	0.969
8. let	0.881	0.500	0.959	0.534	0.864	0.933
9. let	0.190	0.196	0.562	0.697	0.963	0.448
10. let	–	0.565	0.568	0.000	0.670	0.963
12. let	0.000	0.300	0.097	0.020	0.943	0.981
13. let	–	0.011	0.674	0.469	0.680	0.994
14. let	0.074	0.401	0.769	0.038	0.953	0.979
15. let	–	–	0.893	0.128	0.898	0.970
16. let	0.904	0.911	0.924	0.243	0.393	0.990

Na obrázku 3.5 pak vidíme data vykreslená v rámci krabicového diagramu. Nejsou vidět data pro let číslo *jedenáct*, jelikož se vyskytla chyba při nahrávání dat, a nemáme k němu tak dostatek podkladů, pro účely vyhodnocení byl tak zcela vyřazen.



Obrázek 3.5: Krabicový diagram zobrazující stabilizovanost v rámci jednotlivých přiblížení

Nyní je ale potřeba porovnat mezi sebou jednotlivá měření navzájem, a to za pomoci statistických testů zmíněných v předchozí kapitole zabývajících se metodami.

Jako nulová hypotéza bylo testováno tvrzení, že střední hodnota všech měření je stejná oproti alternativní hypotéze, že střední hodnota stejná není. P-hodnota poté na 95 % hladině pravděpodobnosti vyšla $p = 0.1510$, což je dostatečně nízká hodnota na to, aby byla nulová hypotéza zamítnuta. Můžeme tedy bezpečně říci, že střední hodnota se mezi jednotlivými lety lišila

Po samotném testu byla provedena i post-hoc analýza dat pro zjištění rozdílů mezi jednotlivými měřeními, vždy po dvojicích označených jako *měření x* a *měření y*. Tabulky



s jejími kompletními výsledky jsou v příloze k práci. V tabulce 3.2 je však vidět jejich část pro rozdíl mezi prvním měřením a měřeními následujícími.

Tabulka 3.2: Výsledky post-hoc analýzy pro první měření,
pozn.: 0.95CI - 95 % konfidenční interval, SH - střední hodnota

Měř. x	Měř. y	Spodní hranice 0.95CI	Odhad rozdílu SH	Horní hranice 0.95CI	p-hodnota
1	2	-0.265	0.319	0.902	0.998
1	3	-0.615	0.036	0.688	1.000
1	4	-1.225	-0.642	-0.058	0.013
1	5	-1.399	-0.747	-0.096	0.007
1	6	-0.688	-0.164	0.360	1.000
1	7	-2.602	-1.951	-1.299	<0.050
1	8	0.001	0.534	1.066	<0.050
1	9	0.143	0.622	1.100	<0.050
1	10	-1.283	-0.761	-0.239	<0.050
1	12	-1.946	-1.424	-0.903	<0.050
1	13	-1.057	-0.535	-0.013	<0.050
1	14	-1.309	-0.658	-0.006	<0.050
1	15	-2.114	-1.463	-0.811	<0.050
1	16	-1.304	-0.653	-0.001	<0.050

Z výsledků post-hoc analýzy plyne, že mezi prvními dvěma měřeními nedošlo k příliš velké změně rozdělení parametru podílu stabilizované části přiblížení ku celkové délce přiblížení, z krabicového diagramu pak ale pozorujeme mírné zhoršení. Znatelná změna nenastala ani mezi lety 2 a 3. K signifikantní změně ($p = 0.0288$, $CI = (-1.329; -0.027)$) došlo až mezi 3. a 4. letem, kdy se medián souboru zvýšil a přesnost byla lepší, jelikož se subjekty nacházely po delší dobu uvnitř kuželu. Tato vyšší přesnost vydržela i mezi čtvrtým a pátým letem a mezi pátým a šestým, kdy nenastaly žádné příliš výrazné změny.

Velice signifikantní změna ($p < 0.05$, $CI = (-2.383; -1.190)$) však nastala mezi šestým a sedmým letem, kdy se medián souboru podstatně snížil a přesnost se významně zhoršila, což je situace, která koresponduje s tím, co lze vyčíst z boxplotu na obrázku 3.5. Parametry



přiblížení nezůstaly stejné ani mezi sedmým a osmým měřením, kdy došlo opět k nárůstu ($p < 0.05, CI = (1.889; 3.080)$) mediánu souboru a správnost přiblížení opět dosáhla vyšších úrovní, kde poté zůstala i po dobu osmého a devátého měření. K další významnější změně ($p < 0.05, CI = (-1.796; -0.969)$) došlo mezi měřením devátým a desátým, kde si při pohledu na boxplot můžeme všimnout například výrazné změny rozptylu hodnot.

Poté přeskočíme rovnou z letu desátého až na let číslo 12, mezi těmi je také zřetelná výrazná změna ($p < 0.05, CI = (-1.137; -0.190)$). Můžeme říct, že zde je opět velký rozptyl, ale také výrazný pokles mediánu, z čehož vyplývá, že se výkony subjektů lišily, ale celkově byla přesnost a správnost na nízké úrovni. To se opět zlepšilo mezi letem dvanáctým a třináctým, kde nastala změna ($p < 0.05, CI = (0.416; 1.363)$) a medián souboru se opět posunul k vyšším hodnotám, z čehož se dá soudit, že se charakter přiblížení zlepšil. Na podobné úrovni zůstal poté i mezi 13. a 14. letem, ale mezi 14. a 15. došlo k dalšímu zlepšení ($p < 0.05, CI = (-1.518; -0.092)$) mediánu.

I mezi posledním 16. a předposledním 15. letem došlo na nezanedbatelnou ($p < 0.05, CI = (0.097; 1.523)$) změnu rozdělení v rámci vyhodnocené přesnosti jednotlivých subjektů, a to znovu směrem k vyššímu mediánu a tím pádem i k větší preciznosti.



4 Diskuze výsledků

Už první výsledek testování dat, a tedy ten, že střední hodnota všech souborů není stejná, což potvrdil *Skillings-Mackův test*, ukazuje na fakt, že výkonnost pilotů je i ve fázi konečného přiblížení ovlivněna únavou. Skutečně se tedy lišilo, jak stabilizovaně byli schopni zaletět přiblížení v průběhu času, na čemž má svůj díl viny rozhodně únava, což se shoduje i se závěry dalších výzkumů, jako je například experiment, který byl prováděn v roce 2018 taktéž na Fakultě dopravní [12].

Pro obecný pohled na výsledky měření je dobré podívat se na krabicový diagram, viz obrázek 3.5. Vidíme na něm jednak, že rozptyl hodnot přesnosti jednotlivých subjektů v průběhu měření se nejprve zúží, což je velmi pravděpodobně způsobeno tím, že si subjekty zvykly na prostředí simulátoru, načež se opět začne spíše rozšiřovat, což může značit například s narůstající únavou menší míru soustředění u některých jedinců. Podobný dojem pak vyvolává i rozpětí mezi prvním a třetím kvartilem, což může také poukazovat na míru unavenosti.

Z krabicového diagramu je však pravděpodobně nejzajímavější pohled na mediány jednotlivých měření, které jsou vyznačeny červeně. Vidíme, že než si subjekty zvykly na prostředí simulátoru, během prvních dvou měření byl poměrně nekonzistentní, dokonce měl i snižující se tendenci, zhoršení ale není příliš výrazné, jak ukazuje post-hoc analýza rozdílu mezi *prvním* a *druhým* měřením. Poté je však dobře vidět, že se medián opět zvyšuje, velmi pravděpodobně kvůli tomu, že piloti v tu chvíli nejsou ještě vystaveni nekomfortním úrovním únavy či vyčerpání, ale naopak si více zvykají na ovládání a specifika tohoto konkrétního simulátoru, což ostatně potvrzuje i post-hoc analýza, která říká, že mezi *třetím* a *čtvrtým* měřením nastalo velké zlepšení a poměrně vysoká úroveň správnosti a přesnosti se držela přes *pátý* let až do *šestého*.

Situace se ale poměrně výrazně změnila mezi *šestým* a *sedmým* letem, což nám řekla post-hoc analýza, ale dobře vidět to je i v krabicovém diagramu. Zvýšil se tu rázem rozptyl



hodnot, mezikvartilové rozpětí a medián se posunul k poměrně výrazně nižším hodnotám, konkrétně 0.4255, což značí, že přiblížení bylo stabilizované ve 42,5 % jeho průběhu. Dá se tak domnívat, že pro subjekty byla v tuto chvíli pilotáž náročná, což bylo potvrzeno i subjektivními dojmy na místě a poměrně zajímavě to lze vidět na obrázku 3.4, který graficky zobrazuje průběh jednoho z přiblížení při sedmém letu, subjekt sice provádí korekce, ale nedostatečné a opakovaně vypadává ven z kuželu. Když si potom spojíme sedmý let s časem měření z tabulky 2.1, uvidíme, že přistání při něm bylo ve 04:38 místního času. Zbylé subjekty potom při tomto letu při svých experimentech prováděly přistání vlivem operačních faktorů mezi 02:27 a 06:39 místního času. To poměrně přesně odpovídá takzvanému oknu cirkadiálního útlumu - WOCL, jak ho definuje ICAO a používá letecký svět, tedy od 02:00 do 06:00 pokud je jedinec aklimatizován na lokální časové pásmo [14]. Je tedy zajímavé vidět, že se takto přesně projevilo zhoršení i v našem experimentu a vedlo dokonce k tomu, že medián stabilizovanosti přiblížení se dostal na hodnotu 0.425.

Hned při dalším letu je poté patrné zlepšení výkonnosti pilotů, a to jak pohledem na krabicový diagram, tak i statistickým testováním rozdílů mezi jednotlivými měřeními. V *osmém* letu se přesnost pilotáže opět zvýší a vydrží ještě na relativně vysoké úrovni i během letu *devátého*. Zlepšení může být způsobeno tím, že se subjekty začaly dostávat přes denní minimum tělesné teploty během WOCL a jejich výkonnost se začne opět zvyšovat.

K dalšímu zhoršení podle post-hoc analýzy došlo během *desátého* letu a na nejnižší hodnotu mediánu se poté subjekty dostaly během letu *dvanáctého*. To už nelze spojovat s cirkadiálním oknem útlumu, ale je zde potřeba vzít v úvahu, že subjekty prováděly přiblížení mezi 08:22 a 13:04, takže časy bdění v tu chvíli dosahovaly 24 až 29 hodin u jednotlivých účastníků experimentu. Svou roli také mohl hrát fakt, že pro mnoho subjektů byl v čase *dvanáctého* letu čas kolem svítání, a tak ještě jejich tělo nemělo na tento Zeitgeber čas zareagovat. Subjektivně v tuto chvíli pociťovali vysokou míru vyčerpání a vykazovali známky podráždění.



Po *dvanaáctém* letu, kdy už byly všechny subjekty přivyknuté na světlo nového dne, došlo k dalšímu zlepšení a zlepšující se trend poté s pauzami pokračoval až do letu *šestnáctého*. Nutno však říci, že ke konci experimentu bylo jasně patrné, že jsou piloti frustrováni, netrpěliví a unaveni. Například komunikační dovednosti, které jsou v kokpitu moderních dopravních letadel velice důležité, byly na velmi nízké úrovni. Nezřídka se stávalo, že pokyny musel řídicí letového provozu opakovat a někdy byly dokonce i chybně vykonány.



Závěr

Pro tuto bakalářskou práci bylo provedeno prozkoumání dostupných dat zabývajících se hodnocením přesnosti pilotáže s důrazem na fázi konečného přiblížení a byly dány dohromady poznatky důležité k jejímu měření společně s teoretickými základy únavy a biologických rytmů. Poté byl navržen a proveden 24 hodin dlouhý experiment, kterého se zúčastnilo celkem 8 subjektů, jež měl za cíl prozkoumat vliv únavy na provedení přístrojového přiblížení. Tato závěrečná část letu byla vybrána z důvodu vysoké náročnosti na výkon pilota, který musí letoun pilotovat velmi přesně a stabilně, k tomu sledovat mnoho informací na palubních přístrojích, a to při zachování maximální bezpečnosti letu i přes blízkost terénu a překážek. Nároky na posádku jsou tak v této fázi velmi vysoké a je žádoucí, aby piloti podávali pokud možno co nejlepší výkony. Při charakteru tohoto povolání je však prakticky nevyhnutelná určitá forma únavy, a tak bylo stanoveno za cíl zjistit, jakým způsobem je schopnost vykonávat činnosti spojené s bezpečným přivedením letounu z fáze příletu až k úspěšnému přistání ovlivněna únavou a či se nám nějak výrazněji do výkonnosti promítá prodloužená doba bdění, cirkadiánní rytmy či například denní doba.

Na experiment jako takový nastoupily vždy dva subjekty v 18:00, které byly vzhůru od 08:00, takže již při nástupu dosahovala doba bdění hodnoty deset hodin. Po krátké instruktáži a umístění akcelerometrů a senzorů sledujících mozkovou a srdeční aktivitu pro účely dalších prací spojených s tímto experimentem, začal první subjekt na první trati. Let trval kolem jedné hodiny a obsahoval v sobě dvě přístrojová přiblížení na různých letištích. Jeho průběh byl prakticky totožný s průběhem skutečného letu podmínkách IFR. Po druhém přistání přišla řada na druhý subjekt, který letěl to stejné, po němž opět nastoupil první subjekt na druhou trať. Takto experiment pokračoval než bylo odletěno všech osm tratí oběma subjekty. Zkoumána byla přesnost a správnost při přiblížení pod 1000 ft AAL.

Mezi limitace tohoto experimentu nepochybně patří relativně malý počet subjektů – osm. Původně bylo v plánu provést experiment s více lidmi, jenže do měření bohužel přišla



nešťastná situace spojená s koronavirem COVID-19, která nám znemožnila provádět další experimenty. Tento nedostatek byl však s ohledem na charakter práce kompenzován zvýšeným počtem přiblížení, kdy subjekt letěl v rámci jednoho letu celkem dvě. Díky tomu jsme byli schopni získat relativně široký vzorek dat i s méně subjekty. Další limitací tohoto měření pak mohou být některá chybějící data, což bylo sice minimalizováno, nicméně vlivem lidského faktoru či díky chybám na straně techniky se nekompletnosti datových souborů nedalo zcela vyhnout. S ohledem na to pak musely být zvoleny vhodné metody statistické analýzy.

V analýze výsledků bylo zjištěno, že stabilizovanost přiblížení jednoznačně v průběhu experimentu kolísala. To je do velké míry pravděpodobně způsobeno únavou subjektů, jelikož krom postupně zvyšující se délky bdění zůstávaly podmínky přibližně konstantní a průběhy letů uniformní. Při srovnání jednotlivých propadů v přesnosti pilotáže a denní doby se ukázalo, že největší propad nastal právě v době, která odpovídá oknu cirkadiálního útlumu, jak ho pro letecký provoz definuje ICAO, načež se přesnost opět zvýšila. Ukázalo se, že přiblížení se může dostat až do fáze, kdy jeho většina nelze brát jako stabilizovaná z důvodu příliš velkých odchylek od sestupové roviny a kurzového radio majáku. Výsledky práce mohou být inspirací pro další výzkum, či jen sloužit jako nahlédnutí na problematiku spojení únavy a pilotování letounu pro širší leteckou veřejnost.

V návaznosti na zjištění plynoucí z analyzovaných výsledků je zcela patrné, že je nutné nebrat únavu v kokpitu na lehkou váhu. Je potřeba, aby k ní zodpovědně a pro aktivně přistupovali nejen letečtí provozovatelé, ale také zákonné authority a v neposlední řadě také piloti samotní. Dodržování maximální délky letových služeb a minimálních délek odpočinku je naprostou nutností, ale v mnoha případech samo o sobě nemusí stačit. Je důležité pracovat na vývoji a zdokonalování aktivních systémů pro potlačování rizik spojených s únavou založených i na pozorování či subjektivních dojmech. Pokud se člen posádky necítí při nástupu do služby odpočatý, neměl by s ohledem na to, jak vážné mohou být následky únavy na palubě, pokud možno, do služby vůbec nastupovat.



Pro další podobně zaměřené výzkumy bych doporučil spojit metody tohoto experimentu pro hodnocení přesnosti ve fázi konečného přiblížení s hodnocením přesnosti během traťového letu, případně i vzletu odletu pro vytvoření komplexního pohledu na výkonnost pilotů ve spojení s únavou od chvíle, co se letadlo odlepí od země až do chvíle, kdy se na ní opět bezpečně vrátí.



Seznam použité literatury

- [1] William H. Walker, James C. Walton, A. Courtney DeVries, and Randy J. Nelson. Circadian rhythm disruption and mental health. *Translational Psychiatry*, 10(1), January 2020.
- [2] Řízení letového provozu České republiky, s. p. - Letecká informační služba. Letecký předpis L8168/1: Letové postupy, 2019. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [3] Řízení letového provozu České republiky, s. p. - Letecká informační služba. Letecký předpis L10/I: O civilní letecké telekomunikační službě, svazek I - radionavigační prostředky, 2018. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [4] Vladimír Soldán. *Letové postupy a provoz letadel*. Řízení letového provozu České republiky, s. p. - Letecká informační služba, Jenec, 2007.
- [5] Andreas Haslbeck, Paul Kirchner, Ekkehart Schubert, and Klaus Bengler. A flight simulator study to evaluate manual flying skills of airline pilots. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1):11–15, September 2014.
- [6] Andreas Haslbeck and Hans-Juergen Hoermann. Flying the needles. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58(4):533–545, April 2016.
- [7] Řízení letového provozu České republiky, s. p. - Letecká informační služba. Letecký předpis l14: Letiště, 2019. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [8] Řízení letového provozu České republiky, s. p. - Letecká informační služba. Letecký předpis l6/II: Provoz letadel, část 2, 2019. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [9] Robert Geister. Flight testing of steep precision approaches based on GBAS. 10 2010.
- [10] Boril, Jirgl, and Jalovecky. Using aviation simulation technologies for pilot modelling and flight training assessment. *Advances in Military Technology*, 12(1), August 2017.



- [11] Patrick R Veillette. Differences in aircrew manual skills in automated and conventional flight decks. 1995.
- [12] Lukáš Zibner. Vliv únavy pilota na přesnost pilotáže.
- [13] *Safety report 2018 : issued April 2019*. International Air Transport Association, Montréal, Québec, Canada, 2019.
- [14] European Union Aviation Safety Agency. Easy access rules for air operations. online, 2019.
- [15] John A. Caldwell. Fatigue in aviation. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 3(2):85–96, May 2005.
- [16] International Civil Aviation Organisation. Doc. 9966: Fatigue risk management systems: Manual for regulators. online, 2012.
- [17] J.Todd Arnedt, Gerald J.S Wilde, Peter W Munt, and Alistair W MacLean. How do prolonged wakefulness and alcohol compare in the decrements they produce on a simulated driving task? *Accident Analysis & Prevention*, 33(3):337–344, May 2001.
- [18] *Human performance and limitations*. Oxford Aviation Training, Oxford, fourth edition, 2008.
- [19] Birgit Koch. End-stage renal disease: sleep disturbances and the biological clock. jul 2020.
- [20] M. Chatfield. The skillings-mack test (friedman test when there are missing data). *Stata Journal*, 9(2):299–305(7), 2009.



Přílohy

Příloha 1

Tabulka 1: Výsledky post-hoc analýzy pro první měření,
 pozn.: 0.95CI - 95 % konfidenční interval, SH - střední hodnota

Měř. x	Měř. y	Spodní hranice 0.95CI	Odhad rozdílu SH	Horní hranice 0.95CI	p-hodnota
1	2	-0.265	0.319	0.902	0.998
1	3	-0.615	0.036	0.688	1.000
1	4	-1.225	-0.642	-0.058	0.013
1	5	-1.399	-0.747	-0.096	0.007
1	6	-0.688	-0.164	0.360	1.000
1	7	-2.602	-1.951	-1.299	<0.050
1	8	0.001	0.534	1.066	<0.050
1	9	0.143	0.622	1.100	<0.050
1	10	-1.283	-0.761	-0.239	<0.050
1	12	-1.946	-1.424	-0.903	<0.050
1	13	-1.057	-0.535	-0.013	<0.050
1	14	-1.309	-0.658	-0.006	<0.050
1	15	-2.114	-1.463	-0.811	<0.050
1	16	-1.304	-0.653	-0.001	<0.050



Příloha 2

Tabulka 2: Výsledky post-hoc analýzy pro druhé a třetí měření,

pozn.: 0.95CI - 95 % konfidenční interval, SH - střední hodnota

Měř. x	Měř. y	Spodní hranice 0.95CI	Odhad rozdílu SH	Horní hranice 0.95CI	p-hodnota
2	3	-0.933	-0.282	0.368	1.000
2	4	-1.554	-0.961	-0.367	<0.050
2	5	-1.717	-1.066	-0.416	<0.050
2	6	-1.017	-0.483	0.051	0.154
2	7	-2.920	-2.269	-1.619	<0.050
2	8	-0.317	0.215	0.747	1.000
2	9	-0.166	0.303	0.771	0.924
2	10	-1.601	-1.080	-0.559	<0.050
2	12	-2.265	-1.743	-1.222	<0.050
2	13	-1.375	-0.853	-0.332	<0.050
2	14	-1.627	-0.977	-0.326	<0.050
2	15	-2.432	-1.782	-1.131	<0.050
2	16	-1.622	-0.972	-0.321	<0.050
3	4	-1.329	-0.678	-0.027	<0.050
3	5	-1.497	-0.784	-0.071	<0.050
3	6	-0.797	-0.201	0.396	1.000
3	7	-2.700	-1.987	-1.274	<0.050
3	8	-0.098	0.497	1.093	0.313
3	9	0.038	0.585	1.133	<0.050
3	10	-1.392	-0.797	-0.203	<0.050
3	12	-2.055	-1.461	-0.866	<0.050
3	13	-1.166	-0.571	0.024	0.082
3	14	-1.407	-0.694	0.019	0.070
3	15	-2.212	-1.499	-0.786	<0.050
3	16	-1.402	-0.689	0.024	0.076



Příloha 3

Tabulka 3: Výsledky post-hoc analýzy pro čtvrté a páté měření,

pozn.: 0.95CI - 95 % konfidenční interval, SH - střední hodnota

Měř. x	Měř. y	Spodní hranice 0.95CI	Odhad rozdílu SH	Horní hranice 0.95CI	p-hodnota
4	5	-0.756	-0.106	0.545	1.000
4	6	-0.056	0.477	1.011	0.173
4	7	-1.960	-1.309	-0.658	<0.050
4	8	0.643	1.176	1.708	<0.050
4	9	0.795	1.263	1.732	<0.050
4	10	-0.641	-0.119	0.402	1.000
4	12	-1.304	-0.783	-0.261	<0.050
4	13	-0.414	0.107	0.628	1.000
4	14	-0.667	-0.016	0.635	1.000
4	15	-1.472	-0.821	-0.170	0.001
4	16	-0.662	-0.011	0.640	1.000
5	6	-0.013	0.583	1.180	0.066
5	7	-1.917	-1.203	-0.490	<0.050
5	8	0.686	1.281	1.876	<0.050
5	9	0.822	1.369	1.917	<0.050
5	10	-0.608	-0.014	0.581	1.000
5	12	-1.272	-0.677	-0.082	<0.050
5	13	-0.382	0.213	0.807	1.000
5	14	-0.624	0.090	0.803	1.000
5	15	-1.429	-0.715	-0.002	<0.050
5	16	-0.619	0.095	0.808	1.000



Příloha 4

Tabulka 4: Výsledky post-hoc analýzy pro šesté, sedmé a osmé měření,

pozn.: 0.95CI - 95 % konfidenční interval, SH - střední hodnota

Měř. x	Měř. y	Spodní hranice 0.95CI	Odhad rozdílu SH	Horní hranice 0.95CI	p-hodnota
6	7	-2.383	-1.786	-1.190	<0.050
6	8	0.232	0.698	1.164	<0.050
6	9	0.391	0.786	1.181	<0.050
6	10	-1.052	-0.597	-0.142	<0.050
6	12	-1.715	-1.260	-0.805	<0.050
6	13	-0.825	-0.370	0.085	0.380
6	14	-1.090	-0.494	0.103	0.338
6	15	-1.895	-1.298	-0.702	<0.050
6	16	-1.085	-0.489	0.108	0.364
7	8	1.889	2.484	3.080	<0.050
7	9	2.025	2.572	3.120	<0.050
7	10	0.595	1.190	1.784	<0.050
7	12	-0.068	0.526	1.121	0.192
7	13	0.821	1.416	2.011	<0.050
7	14	0.580	1.293	2.006	<0.050
7	15	-0.225	0.488	1.201	0.836
7	16	0.585	1.298	2.011	<0.050
8	9	-0.316	0.088	0.491	1.000
8	10	-1.748	-1.295	-0.841	<0.050
8	12	-2.412	-1.958	-1.505	<0.050
8	13	-1.522	-1.068	-0.615	<0.050
8	14	-1.787	-1.192	-0.596	<0.050
8	15	-2.592	-1.997	-1.401	<0.050
8	16	-1.782	-1.187	-0.591	<0.050



Příloha 5

Tabulka 5: Výsledky post-hoc analýzy pro deváté až patnácté měření,

pozn.: 0.95CI - 95 % konfidenční interval, SH - střední hodnota

Měř. x	Měř. y	Spodní hranice 0.95CI	Odhad rozdílu SH	Horní hranice 0.95CI	p-hodnota
2	3	-0.933	-0.282	0.368	1.000
9	10	-1.796	-1.383	-0.969	<0.050
9	12	-2.460	-2.046	-1.633	<0.050
9	13	-1.570	-1.156	-0.743	<0.050
9	14	-1.827	-1.279	-0.732	<0.050
9	15	-2.632	-2.084	-1.537	<0.050
9	16	-1.822	-1.274	-0.727	<0.050
10	12	-1.137	-0.663	-0.190	<0.050
10	13	-0.247	0.226	0.700	1.000
10	14	-0.491	0.103	0.698	1.000
10	15	-1.296	-0.702	-0.107	<0.050
10	16	-0.486	0.108	0.703	1.000
12	13	0.416	0.890	1.363	<0.050
12	14	0.172	0.767	1.361	0.001
12	15	-0.633	-0.038	0.556	1.000
12	16	0.177	0.772	1.366	<0.050
13	14	-0.718	-0.123	0.471	1.000
13	15	-1.523	-0.928	-0.333	<0.050
13	16	-0.713	-0.118	0.476	1.000
14	15	-1.518	-0.805	-0.092	<0.050
14	16	-0.708	0.005	0.718	1.000
15	16	0.097	0.810	1.523	<0.050