



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Využití dezorientačních simulátorů pro zvýšení odolnosti vůči somatogravické iluzi
Název závěrečné práce v AJ

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Socha, Ph.D.

Ing. Lenka Hanáková, Ph.D.

Bc. Jakub Chareziński

Praha 2024



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jakub Charezinski

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Zvyšování odolnosti vůči efektu somatogravické iluze**

Název tématu (anglicky): Enhancing the Resilience to the Somatogravic Illusion Effect

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je určit, zda výcvik na dezorientačním simulátoru v rozsahu 1 h má pozitivní vliv na zvýšení odolnosti vůči somatogravické iluzi.
- Vypracujte analýzu současného stavu se zaměřením na somatogravickou iluzi a kritické fáze letu, v nichž tato iluze může vznikat.
- V souladu s experimentem realizovaným ve spolupráci s Ústavem leteckého zdravotnictví vytvořte metodiku hodnocení letových dat, a to tak, aby bylo možné kvantifikovat exekuci vzletu, v rámci něhož byla navozena somatogravická iluze.
- S využitím vhodných statistických metod porovnejte exekuci vzletu bez iluze s exekucí vzletu s iluzí (u obou měření) a porovnejte, zda došlo mezi dvěma měřeními s odstupem 1 týdne ke zlepšení v exekuci vzletu. V rámci statistické analýzy uvažujte zkušenost pilotů.
- Objektivní výsledky založené na datech porovnejte se subjektivním hodnocením.
- Výsledky práce diskutujte, stanovte závěry, limitace a přínos práce společně s doporučeními pro další výzkum.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: DEMIR, A. E. a E. AYDIN. Vestibular Illusions and Alterations in Aerospace Environment. Turkish Archives of Otorhinolaryngology. 2021, 59(2), 139-149.
KARAPETJAN, L., et al. Implementation of a vestibular illusion simulator into IR training. Transportation Research Procedia. 2022, 65, 222-229.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2023**
(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 diplomové práce: **15. května 2024**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jakub Charezinski
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 15. července 2023



Abstrakt

Tato diplomová práce vznikla za účelem analýzy efektu somatogravické iluze u pilotů a zkoumání následné možnosti využití dezorientačního simulátoru ke zvýšení odolnosti vůči této iluzi. Cílem práce bylo identifikovat, jak somatogravická iluze ovlivňuje schopnosti pilotů během kritické fáze letu. Dílčím cílem byla analýza, zda může simulované prostředí pomoci pilotům zvýšit odolnost vůči somatogravické iluzi.

V teoretické části je definován problém a představeny základní koncepty, které se týkají vestibulárního systému a jeho reakce na navozenou iluzi. V experimentální části byla využita metoda simulovaných letových profilů, které napodobují skutečné podmínky, za účelem vyvolání iluze. Výsledky práce dokazují, že účast na letu na dezorientačním simulátoru, včetně navození somatogravické iluze, významně přispívá ke zvýšení odolnosti vůči iluzi, a tím pádem zajišťuje lepší připravenost pilotů na potenciální letové situace v reálném provozu, čímž následně dochází k přímému ovlivnění bezpečnosti letecké dopravy .

Klíčová slova: Vestibulární iluze, Somatogravická iluze, Dezorientační simulátor, Odolnost



Abstract

This thesis was developed to analyze the effect of somatogravic illusion on pilots and explore the subsequent potential of using disorientation simulators to increase resistance to this illusion. The objective of the work was to identify how somatogravic illusion affects pilot capabilities during critical flight phases. A secondary goal was to analyze whether a simulated environment can help pilots increase their resistance to somatogravic illusion.

The theoretical part defines the problem and introduces the basic concepts related to the vestibular system and its reaction to the induced illusion. In the experimental part, a method of simulated flight profiles was used, which mimic real conditions, for the purpose of inducing the illusion. The results of the work prove that participation in flights on a disorientation simulator, including the induction of somatogravic illusion, significantly contributes to resistance against the illusion and thus enables better preparedness of pilots for potential real-world flight situations, thereby directly influencing the safety of air traffic.

Keywords: Vestibular Illusion, Somatogravic Illusion, Disorientation Simulator, Resilience



Poděkování

Chtěl bych vyjádřit svou upřímnou vděčnost vedoucím mé diplomové práce, paní Ing. Lence Hanákové, Ph.D a panu doc. Ing. Vladimíru Sochovi, Ph.D, za jejich vřelé vedení, odbornost a trpělivost, které mi byly poskytnuty po celou dobu mého studia. Jejich moudré rady a neochvějná podpora formovaly mé akademické cesty a osobní rozvoj v měřítku, které přesahuje běžné pedagogické standardy. Jsem nesmírně vděčný za čas a energii, které mi byly věnovány, a za inspiraci, kterou jsem díky nim a jejich laboratoři získal.

S velkým uznáním bych také chtěl poděkovat paní Adéle a Lucii Krásné, jejichž pečlivé gramatické a stylistické úpravy významně přispěly k dokonalosti tohoto textu. Jejich odborné znalosti a ochota pomoci byly neocenitelné.

Nemohu opomenout poděkovat také své rodině, která mi poskytovala podporu po celou dobu mého studia. Děkuji za trpělivost, povzbuzení a příležitost věnovat se svému vzdělání. Vaše podpora byla zásadní pro dosažení tohoto významného milníku v mém životě.



Čestné prohlášení

„Nemám závažný důvod proti užívání 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).“

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu“.

V Praze dne 08. Května 2024

.....

Podpis



Obsah

Úvod	11
1 Teoretické základy práce	12
1.1 Publikované odborné práce a analýza současného stavu	13
1.2 Vestibulární systém a somatogravická iluze u pilotů	15
1.3 Současný výcvik pilotů	18
1.4 Simulátory pro výcvik pilotů	22
1.5 Simulátory ULZ	24
1.6 Proces rozhodování u pilotů	27
1.7 Nehody AOC letadel spojené se somatogravickou iluzí	29
1.8 Známé nehody GA letadel spojené se somatogravickou iluzí	35
2 Metodologie	36
2.1 Vzorek pilotů pro experiment	36
2.2 Plánování měřících letů	37
2.3 Provedení měření	40
2.4 Letové profily experimentu	41
2.4.1 První letový profil	42
2.4.2 Druhý letový profil	43
2.5 Navození iluze	44
2.6 Měření fyziologických aktivit	45
2.7 Zpracování dat	46
3 Presentace výsledků	52
4 Diskuze výsledků	63
5 Závěr	66
Seznam použité literatury	68



Seznam obrázků

1.1	Popis vestibulárního systému	16
1.2	Otolitické vnímání pohybu	17
1.3	Druhy používaných simulátorů	23
1.4	Dezorientační simulátor	25
1.5	Avionika dezorientačního simulátoru	26
1.6	Porovnání avioniky v kokpitu	29
1.7	Počet publikací sdílených zprostředkovatelem	30
1.8	Klíč k rešerši leteckých nehod	31
1.9	Statistika leteckých nehod v důsledku somatogravické iluze	34
2.1	VFR Chart PHNL	40
2.2	IFR Chart PHNL	44
2.3	Použitá metoda zpracování dat	47
2.4	Časová osa vzorkování	48
2.5	Schéma metody PCA	51
3.1	Data obou letových profilů	52
3.2	Normalizovaná data obou profilů	53
3.3	Globální Principal Component Analysis	53
3.4	Zprůměrovaná celková letová data	54
3.5	Cluster obou letových profilů	55
3.6	Zprůměrovaná letová data prvního a druhého profilu	56
3.7	Data z prvního letového profilu	56
3.8	Data z druhého letového profilu	57
3.9	Principal Component Analysis prvního a druhého profilu	57
3.10	Cluster prvního letového profilu	58
3.11	Porovnání identifikačního vyhodnocení letů	58
3.12	Cluster druhého letového profilu	59
3.13	Záznam pohybu řídicí páky bez a následně s normalizací	59
3.14	Principal Component Analysis pohybu řídicí páky	60
3.15	Zprůměrovaná data výchylky řídicí páky	61



3.16 Subjektivní hodnocení iluze z prvního a druhého letového profilu	61
3.17 Statistika dotazníkového řízení	62



Seznam symbolů a zkratek

AOC	Air operator certificate
ATO	Approval training organization
ATP	Airline transport pilot
ATPL	Airline transport pilot licence
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
CMC	Crew Management Critique
CPL	Comercial pilot licence
CVR	Cockpit voice recorder
ČVUT	České vysoké učení technické
DTO	Declared Training Organization
DTW	Dynamic time warping
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EEG	Electroencephalogram
FAA	Federal Aviation Administration
FDR	Flight data recorder
FFS	Full flight simulator
FNPT	Flight and Navigation Procedures Trainer
FSTD	Flight Simulation Training Device
FTD	Flight training device
GA	General Aviation
HNL VOR	Very High Frequency Omnidirectional Range Station at Honolulu range
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument flight rules
ILS	Instrument Landing System
IMC	Instrument Meteorological Conditions
IPT	Integrated physiological trainer
IR	Instrument rating



JAA	Joint Aviation Authorities
LOC-I	Loss of Control In-flight
LPC	License Proficiency Check
MCC	Multi crew cooperation
NTSB	National transport safety board
OPC	Operator Proficiency Check
PCA	Principal component analysis
PHNL	Daniel K. Inouye International Airport ICAO code
POH	Pilot operational handbook
PPS	Preflight planning system
RNAV	Area Navigation
SOP	Standard operation procedures
UCL	Úřad pro civilní letectví
ULZ	Ústav leteckého zdravotnictví
UPRT	Upset Prevention and Recovery Training
UZPLN	Ústav pro zjišťování příčin leteckých nehod
VFR	Visual Flight Rules
VMC	Visual meteorological conditions
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Range Station
VOR	VHF Omnidirectional Range
VPN	Virtual privat network



Úvod

V současné době se letecký průmysl intenzivně zaměřuje na zvyšování bezpečnosti a efektivity, nejen v běžném provozu, ale i v oblasti pilotního výcviku. Přitom klíčovým aspektem, který ovlivňuje bezpečnost letů, je schopnost pilotů správně reagovat na různé nestandardní situace, včetně dezorientací, které mohou během letu nastat. Jedním z nejzásadnějších fenoménů je somatogravická iluze, která může piloty vést k nesprávnému vnímání orientace letadla, a v extrémních případech může mít fatální následky.

Tato diplomová práce se podrobně zaměřuje na analýzu somatogravické iluze a její vliv na piloty během letu. Pozorovaná somatogravická iluze je způsobena specifickými fyzikálními a fyziologickými podmínkami a její pochopení je klíčové pro vývoj efektivních tréninkových metod. Tyto metody mají za cíl pomoci pilotům iluzi rozpoznat a účinně ji řešit.

Vzhledem k významu tohoto tématu a potenciálnímu riziku, které somatogravická iluze představuje, je nezbytné vyvíjet a implementovat výcvikové strategie, které tuto problematiku efektivně řeší. Hlavním cílem této práce je proto navrhnout a otestovat specifický letový profil na dezorientačním simulátoru, který by pilotům pomohl lépe odolávat somatogravické iluzi. Tento proces zahrnuje simulaci realistické letové situace, které navodí podmínky vedoucí ke vzniku somatogravické iluze.

Cílem práce je ověřit, zda let na dezorientačním simulátoru umožní zvýšení odolnosti vůči somatogravické iluzi a tím výrazně přispěje ke zvýšení bezpečnosti letového provozu. Toto ověření má zásadní význam pro další vývoj tréninkových programů, které by mohly být implementovány v pilotních školách po celém světě, čímž by se výrazně posílila globální letecká bezpečnost.



1 Teoretické základy práce

Iluze, je klíčový pojem této diplomové práce, je definována jako mylný smyslový vjem. Tento vjem může být buď cíleně vyvolán, nebo působit jako nechtěný vedlejší efekt určitého procesu. Iluze má potenciál vyvolat nebezpečný fyziologický stav, který negativně ovlivňuje fyziognomické schopnosti a vnímání okolního světa. Pro účely této práce je zásadní odlišit pojem iluze od optického klamu. Zatímco optický klam se vztahuje na nesprávné vnímání reality, které je přijímáno do mozku výhradně prostřednictvím zraku, iluze je ze své podstaty pojmem daleko širším. V rámci této diplomové práce se zkoumá specificky vestibulární iluze, tedy iluze spojená se smyslovým orgánem, jenž je zodpovědný za vnímání rovnováhy a pohybu v prostoru.

Vestibulární systém člověka, složený z komplexní sítě kanálků a receptů umístěných v uchu, je esenciální pro udržení naší orientace a rovnováhy. Jakmile jsou informace z tohoto systému nesprávně interpretovány mozkiem, může dojít ke vzniku vestibulární iluze, což je stav, kdy jedinec má mylný pocit pohybu nebo změny polohy. Tento jev v leteckém průmyslu obzvláště vážné důsledky, protože piloti mohou začít vnímat nesprávnou orientaci letadla, což může vést k chybným rozhodnutím a v krajních případech i k leteckým nehodám.

Závažnost tohoto fenoménu je v práci podrobně rozpracována a to i s ohledem na případy leteckých nehod, kdy vestibulární iluze přispěla k leteckým tragédiím. Analýza těchto incidentů ukazuje, jak zásadní roli hraje správné vnímání vestibulárních signálů a jak nebezpečné může být jejich mylné interpretace. Tato práce zkoumá, do jaké míry mohou být piloti vycvičeni, aby lépe rozpoznávali a efektivně reagovali na vestibulární iluze, a zda nám moderní simulační technologie mohou tento výcvik usnadnit.

Tato metoda má potenciál nejen zvýšit bezpečnost letů tím, že se piloti stanou odolnějšími vůči efektům vestibulární iluze, ale také poskytne cenné poznatky pro další výzkum. Cílem je vytvořit robustní práci, která může být využita například pro vytvoření vhodných výcvikových programů pro získání odolnosti vůči vestibulární iluzi, čímž se přispěje k celkovému zvýšení bezpečnosti a leteckého provozu.



1.1 Publikované odborné práce a analýza současného stavu

Obecně na téma somatogravických iluzí bylo vytvořeno velké množství odborných prací a to zejména s lékařským podtextem. Pro účely této práce byl však kladen důraz na zpracování relevantních publikací zabývajících se konkrétně somatogravickou iluzí spojenou s letectvím.

První taková práce nesoucí název 'Perception of tilt (somatograviv illusion) in response to sustained linear acceleration during space flight' [1] se sice zabývá somatogravickou iluzí, ale je úzce vázaná na lineární zrychlení v průběhu kosmického letu. Proto jsou výchozí teze práce použitelné pro tuto diplomovou práci jen omezeně.

Druhou prací, která je přínosná v této oblasti je výchozí materiál k výzkumu nesoucí název 'Objective Evaluation of the Somatograviv Illusion from Flight Data of an Airplane Accident' [2]. Jak už název napovídá, je hlavním cílem práce odhalit somatogravické iluze z letových dat, které lze získat z letadla v případě nehody. Tato práce aplikuje tři různé metody analýzy dat, které jsou vhodné k použití při vyhodnocování letových dat, jako doplněk k současným postupům zakládajících se na odhadu gravito-inerciálního zrychlení. Tento výzkum nahlíží na somatogravické iluze z jiné perspektivy, než jak je pojata diplomová práce.

Třetí prací je práce, která byla publikována v rámci tiskoviny Journal of medical system s názvem 'Optical Illusions and Spatial Disorientation in Aviation Pilots' [3]. Tato práce detailně zpracovává příčiny vzniku jednotlivých typů iluzí a to jak vestibulárních, tak i vizuálních. Okrajově autoři práce hodnotí i vážnost této problematiky, která každoročně zapříčiňuje mnoho leteckých nehod. Práce je komplexním zpracováním již publikovaných výsledků výzkumů a vytváří ucelený pohled na širokou paletu iluzí, se kterými se pilot při výkonu svého zaměstnání může setkat.

Čtvrtá práce význačná pro moji diplomovou práci nese název 'Visual Flow Scene Effects on the Somatograviv Illusion in Non-Pilots' [4]. Tato publikace se zabývá navozením iluzí při využívání simulátoru. V tomto případě byly iluze navozovány na centrifuze. Výzkum se skládal ze dvou experimentů, kterých se účastnilo 12 a 13 subjektů. Pro měření byly využívány head-trackery, tj. snímače pohybu hlavy a náhlavní display. Autoři výzkumu poté porovnávali obě skupiny navzájem, kdy první skupina měla referenci k horizontu a druhá skupina měla navíc referenci i s umělým horizontem. Závěrem tohoto výzkumu bylo, že pokud dojde k aplikaci intuitivního umělého horizontu, má takové opatření za následek snížení efektu somatogravické iluze. Limitací tohoto



výzkumu však byla zkušenost respondentů, kteří byli z řad nepilotů. I proto lze závěry z této práce užít spíše v teoretické rovině.

Pátá práce se zabývá přímo implementací vestibulárních iluzí do IR výcviku. Tohoto experimentu se zúčastnilo 25 instruktorů s přístrojovou kvalifikací. Tito účastníci byli v době experimentu aktivními piloty činnými v komerční letecké dopravě [5]. Experiment byl proveden na stejném simulátoru v prostorách ULZ. Letový profil který sloužil k navození iluzí byl však vytvořen odlišně v porovnání s profilem v diplomové práci. V této práci byla zpracována a vyhodnocena i somatogravická iluze, která byla navozena při nezdařeném přiblížení, kde dochází ke kritickému zrychlení, které může navodit mylný pocit náklonu. Tento výzkum prokázal, že 54 procent pilotů nezaznamenalo tuto iluzi. Kromě této iluze se v letovém profilu navozovaly další tři iluze, kontrétně somatogyrální iluze, Coriolisova iluze a leans Illusion. Závěrem práce bylo zjištění, že zařazení simulátoru v rámci přípravy pilotů vestibulárních iluzí zvýší bezpečnost v letectví. Tato práce poskytuje dobrý teoretický základ pro mojí diplomovou práci.

Poslední publikací, která stojí za zmínku v souvislosti s vestibulárními iluzemi, je publikace od kapitána Simona Ludwova, který v roce 2016 na konferenci International Air Safety Summit v Dubaji odprezentoval svou přednášku na téma snížení hrozby somatogravické iluze [6]. Tato prezentace poskytuje komplexní přehled a kromě zpracování leteckých nehod staršího data než kterými se zabývá část této práce, obsahovala jeho přednáška i teoretickou část, kde autor rozebírá teoretické možnosti snížení počtu nehod v důsledku somatogravické iluze. Zajímavým návrhem, který kapitán Ludwov v prezentaci zmiňuje je použití reálných dat z leteckých nehod pro výcvik nových pilotů. Následně navazuje možnostmi úpravy SOP společností pro preferenci brzkého zapnutí autopilota v případě nočních letů a letů za špatných povětrnostních podmínek. V případě postupu nezdařeného přiblížení autor práce v rámci publikace navrhuje aplikovat snížený výkon, nikoliv maximální tah motoru, což je aplikovatelné pouze za určitých podmínek, například v případě, kdy pilot rozhodne o postupu nezdařeného přiblížení nad minimy, aby nedošlo k proklesání MDA, což by bylo nepřijatelným rizikem takto publikované metodiky.

Krom publikací které se věnují somatogravické iluzi není v současnosti žádný důraz na odbourávání somatogravických iluzí. Vyjímkou byla prezentace kapitána Ludwova prezentovaná na dubajské konferenci. Bohužel během rešerše bylo zjištěno že piloti přijdou do styku s informacemi o somatogravické iluzi pouze ve výcviku a to dokonce ne vždy. Neprobíhá žádné nitrofiremní zvyšování povědomí o existenci somatogravické iluzi. Některé zahraniční internetové portály



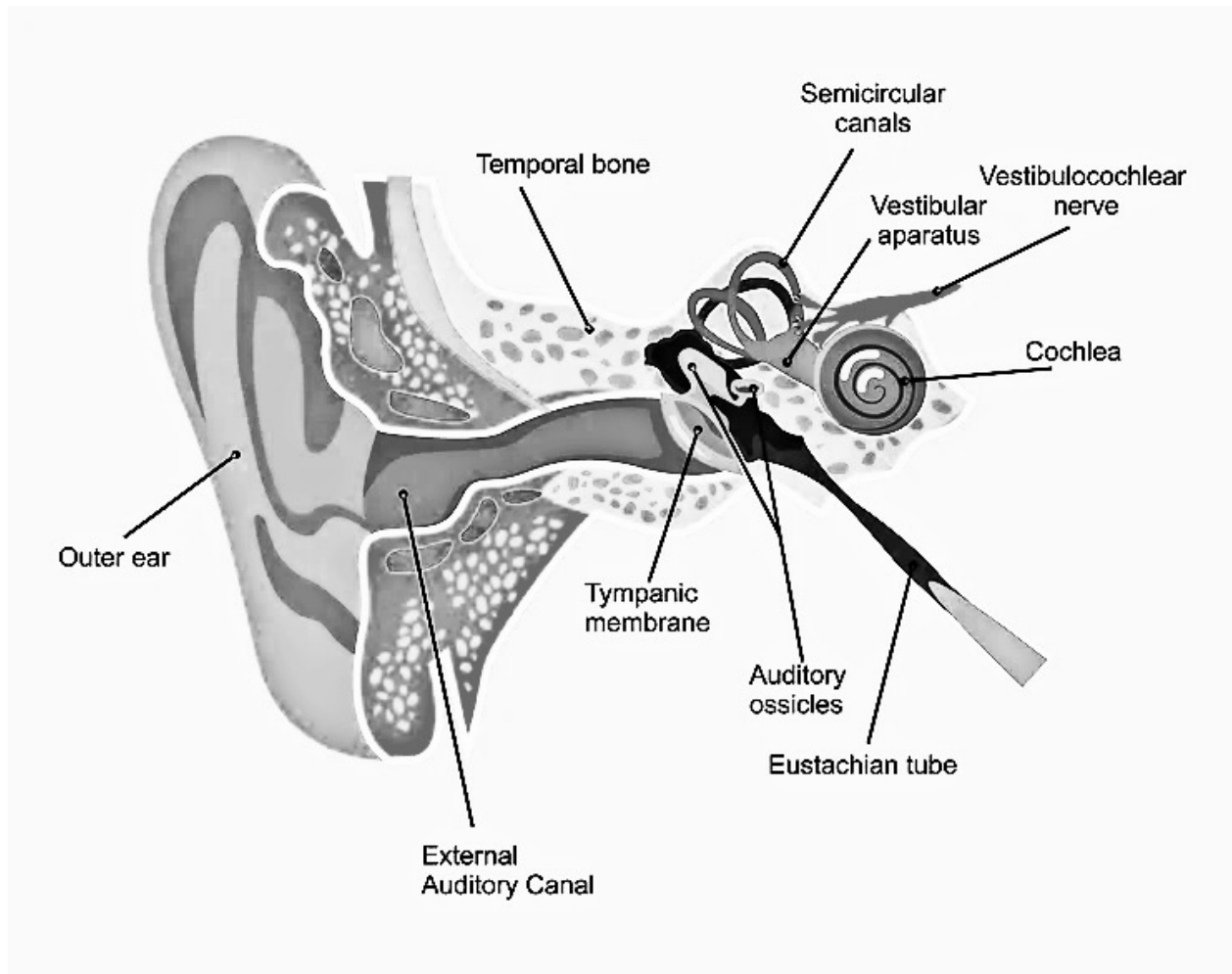
publikovali články povětšinou populárního charakteru, které však nemohou mít globálnější dopad než na pravidelné navštěvovatele daného periodika. Zcela subjektivně lze říci že na otázku co je somatogravická iluze , jak probíhá a v jaké fázi letu ji můžeme potkat nedokáže odpovědět většina pilotů, bez ohledu na jejich zkušenost. V současné době je málo kladený důraz na prevenci a připomínání takového iluzorního nebezpečí v podobě somatogravické iluze.

1.2 Vestibulární systém a somatogravická iluze u pilotů

Pro piloty je příznačné, že se během letu pohybují v rozdílných výškách, zrychleních a v dalších různých faktorech prostředí, což výrazně zvyšuje exponovanost jejich vestibulárního systému. Z dosavadních výzkumů vyplývá, že nejnáchylnější k iluzím je pilotův vestibulární systém ve fázích letu, které jsou vedeny podle přístrojů. Tento fakt je zcela logický, neboť dokud má pilot vizuální kontakt s okolím, například s horizontem nebo se zemí, dokáže se velmi dobře orientovat. Pokud je však pilotovi zamezeno ve vizuálním kontaktu s těmito body, dochází k přechodu na vnímání pomocí vestibulárního systému, který byl do této chvíle upozaděn. V těchto momentech by se pilot měl spolehnout na přístroje a jejich indikace. Historicky však není ojedinělé, že pilot vestibulární iluzi podlehl. Tuto problematiku dále popisují ve své práci, zejména v kapitolách 1.7 a 1.8.

K pochopení somatogravické iluze je nutné nastínit funkci vestibulárního systému a popsat, které jeho části jsou během letu namáhány a ovlivněny, pro úplnou představu byla práce doplněna o schématický obrázek 1.1. Vestibulární systém - statokinetický orgán, je integrální součástí lidského těla, která umožňuje udržovat rovnováhu a orientaci v prostoru. Nachází se převážně ve vnitřním uchu a skládá se z několika částí, které detekují pohyby hlavy a změny polohy těla vůči gravitaci. Základní součástí tohoto systému tvoří tři polokruhové kanálky, detekující rotační pohyby, a otolitové orgány (sacculus a utriculus), které registrují lineární pohyby a polohu hlavy ve vztahu ke gravitaci [7].

Polokruhové kanálky lze chápat jako tři tekutinou naplněné struktury, orientované ve třech rovinách prostoru (rovina frontální, transverzální a sagitální), umožňující detekci rotačních pohybů hlavy. Každý kanálek má na jednom konci zduření zvané ampula. Tato ampula obsahuje senzoričné buňky ve struktuře zvané cupula. Při otáčení hlavy se tekutina v kanálcích pohybuje, což vede k pohybu cupuly a následně ke stimulaci senzoričných buněk.

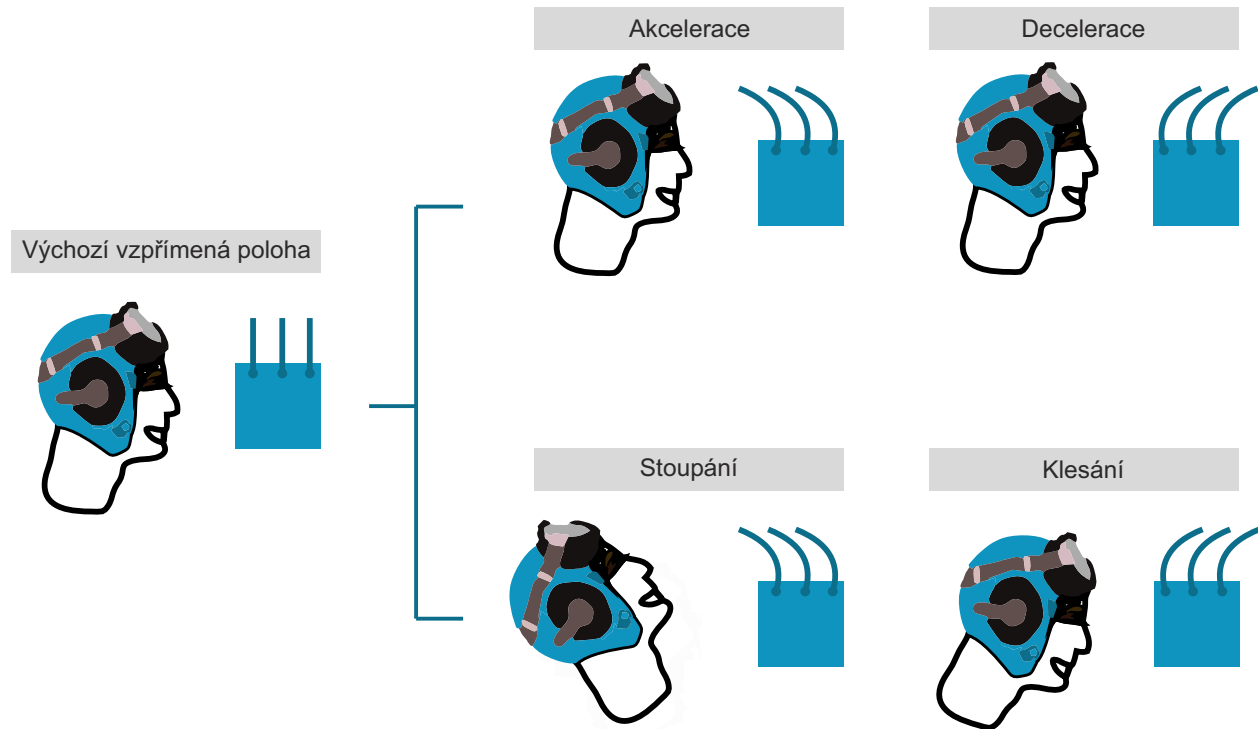


Obrázek 1.1: Popis vestibulárního systému [8]

Součástí vestibulárního systému jsou také tzv. otolitové orgány, tvořené předsíňovými váčky nazývanými sacculus a utriculus, které jsou zodpovědné za detekci lineárního pohybu a změn polohy hlavy vůči gravitaci. Tyto orgány obsahují vápenaté krystaly zvané otolity, které při změně polohy tlačí na gelovou vrstvu pokrývající senzory buňky, což vede k jejich stimulaci. Princip funkce otolitových orgánů je vyobrazen na obrázku 1.2

Pro další výklad je nezbytné popsat somatogravickou iluzi. Tento druh iluze je typ vestibulární iluze, kdy dochází ke zmatení mezi směrem gravitace a pohybem těla [9]. Tato iluze se obvykle vyskytuje, dojde-li ke konfliktu mezi zrakovou a vestibulární informací nebo když jsou vestibulární senzory stimulovány neobvyklým způsobem. Právě piloti mohou být náchylní k těmto typům iluzí,

například během letu za špatné viditelnosti, kdy pilot obtížně rozlišuje, jakým směrem (zda nahoru či dolů) se vůči zemi pohybuje.



Obrázek 1.2: Otolitické vnímání pohybu

Během somatogravické iluze může dojít ke klamně aktivaci otolitových orgánů kvůli neobvyklým pohybům nebo polohám těla. Při lineárním zrychlení, jako je zrychlení letadla na vzletové dráze, mohou být otolity stimulovány způsobem, který mozek interpretuje jako změnu polohy těla vůči gravitaci. To může vést k iluzi, že tělo je ve skloněné poloze, i když je ve skutečnosti v poloze horizontální. Toto klamně vnímání může být ještě umocněno nedostatkem vizuálních referencí, což zavádá mozkou dospět k nesprávným závěrům o orientaci těla.

Jednou z fascinujících vlastností vestibulárního systému je schopnost jeho adaptace a neuroplasticity. Vestibulární systém má schopnost sám sebe přetrénovat a přizpůsobit změnám, které mohou nastat v důsledku poranění nebo onemocnění. Tento proces se nazývá vestibulární kompenzace a je klíčový pro obnovu rovnováhy a normálního pohybu u lidí po poškození vestibulárního systému.



Při vestibulární kompenzaci mozku dochází k neuromodulaci - procesu, při němž jsou vytvářeny nové nervové spoje, aby se nahradily ty, které byly poškozeny. Mozek se učí spoléhat více na zrakové a somatosenzorické vjemy, aby pomohl kompenzovat nedostatek informací, které běžně poskytuje vestibulární systém. Tento proces může trvat od několika týdnů do několika měsíců a je podpořen specifickým vestibulárním rehabilitačním tréninkem.

Tato adaptace dobře demonstruje neuvěřitelnou schopnost lidského nervového systému regenerovat a přizpůsobovat se okolním vlivům, což umožňuje lidem se závažnými vestibulárními dysfunkcemi obnovit svou schopnost vést plnohodnotný život.

Vestibulární systém pilotů je neustále vystavován extrémním podmínkám během letu, kdy se musí pružně adaptovat na rychlé změny směru, rychlosti a orientace. Právě proto je schopnost adaptace a neuroplasticity důležitá pro zvládnání a překonávání vestibulárních iluzí, které mohou ohrozit bezpečnost letu.

Jedním z příkladů, jak může vlastnost adaptace být aplikována na piloty, je právě výše zmíněný proces vestibulární kompenzace. Tento proces je zásadní ve chvíli, kdy pilot zažívá vestibulární dysfunkci, například po vestibulárním šoku způsobeném extrémním manévrováním nebo po expozici nepříznivým letovým podmínkám, jako je let v turbulentní oblasti nebo v noci bez vizuálních referencí.

Součástí vestibulární kompenzace u pilotů je již uvedená neuromodulace. V takový moment dochází zároveň ke zvýšené závislosti na vizuálních a somatosenzorických vjemech, což pomáhá kompenzovat informace, které poskytuje narušený vestibulární systém [7]. Tento proces přizpůsobení umožňuje pilotům udržovat orientaci a rovnováhu v prostředí, ve kterém jsou vestibulární signály často zkreslené nebo zcela chybějící.

1.3 Současný výcvik pilotů

V následující kapitole bude mým hlavním cílem popsat současný proces výcviku pilotů a jednotlivá preventivní opatření, která jsou v současnosti v souvislosti se somatogravickými iluzemi aplikována.

Pilot před zahájením své profesionální kariéry projde řadou zdravotních, psychologických a vědomostních testů. Piloti proto patří mezi velmi vysoce kvalifikované pracovníky, kteří se věnují specializované činnosti. Při své práci dochází ke zvýšenému vystavení pilotů vestibulárním



iluzím. Jak již bylo pojednáno výše, piloti podstupují několik vědomostních testů, které jsou organizovány na různých úrovních v závislosti na druhu pilotovy licence. Kromě samotných zkoušek může být velký rozdíl ve výcviku způsobený samotnou výcvikovou organizací. ATO, respektive schválená výcviková organizace, je osvědčení, které musí získat každá organizace, která chce poskytovat letecké výcviky komerční cestou. Požadavky na tyto organizace jsou jasně specifikované předpisem, ovšem splnění těchto požadavků není vždy na nejvyšší, či alespoň adekvátní úrovni. Mnoho nesrovnalostí ve standardu výcviku je odstraněno během interních auditů nebo externích auditů řízených UCL. V menších organizacích však interní audity téměř neprobíhají a externí audit zdaleka nedokáže odhalit úplně veškeré nedostatky ve výuce. Tento fakt nemůže být přičítán za vinu UCL.

Příkladem, který si ve spojitosti s vestibulárními iluzemi můžeme demonstrovat, je výcvik pilotů v malém lokálním aeroklubu. Pilot, který touží získat licenci soukromého pilota, se přihlásí do kurzu. Kurz absolvuje formou samostudia, které se následně vykáže jako bloková výuka. Teoretická příprava soukromého pilota má přesně danou časovou dotaci, která musí být naplněna. Instruktor se může jakkoliv dohodnout s žákem, avšak nemá způsob, jak ověřit dostatečný rozsah samostudia. Toto přehlížení se řetězí. Odpovědný manažer nezasáhne a následně UCL doloží, že instruktoři, kteří mají možnost případné nedostatky v množství samostudia odhalit, jsou dostatečně proškoleni a že výuka proběhla v dostatečném rozsahu, ačkoliv fakticky tomu tak není. Je tedy jasné, že by pro výcvik začínajících pilotů bylo mnohem vhodnější se vzdělávat ve výcvikové organizaci, která umožňuje prezenční výuku teorie. Každopádně teorie je pouze začátek v cestě jednotlivce za cestou k pilotnímu průkazu a budoucího pilota čeká ještě mnoho dalších kroků skýtajících leckdy nedostatky.

Prvním trochu opomenutým milníkem je průkaz pro pilotování bezmotorových kluzáků. Je vhodné, aby již v elementární přípravě pro tento provoz byly zmíněny základní informace o iluzích při letech ve větroních. Často tomu tak bývá.

Následně se pilot posouvá na kvalifikaci umožňující létání s motorovým letadlem. Zde vstupují do hry nové a pilotem dosud nepoznané typy iluzí, a to zejména optické iluze s návazností na rotující vrtuli v zorném poli pilota. Kromě těchto vizuálních iluzí se v této fázi výcviku pilota začínají v hojnější míře vyskytovat právě iluze vestibulární. Výraznou komplikací, která jen umocňuje jednotlivé iluze, je létání motorovým letadlem v noci nebo za snížených vizuálních podmínek. Tento komplexní rozsah provozu je tedy náchylný k iluzím nejen optickým, ale právě i vestibulárním. Piloti,



kterí létají na motorových letadlech mají zpravidla průkaz zdravotní způsobilosti druhé nebo první třídy, což je jeden z dobrých předpokladů pro lepší zvládnání vestibulárních iluzí.

U pilotů komerčních je povinnost mít průkaz zdravotní způsobilosti první třídy [10] a rovněž je pilot nucen složit zkoušky ATP. Zkoušky se skládají ze 14 předmětů včetně předmětu Human Performance, který kromě nauky o lidském činiteli obsahuje i informace o iluzích, které za letu mohou nastat. Tyto informace jsou často vnímány jako okrajové téma. Velké procento pilotů se totiž na svoji profesionální kariéru připravuje studováním otázkových bank, kde připravující se piloti v rámci usnadnění sudia opakovaně procházejí otázky, dokud jejich úspěšnost ve zkouškách a sebevědomí nevzrostou na dostatečnou úroveň pro složení zkoušky na úřadu pro civilní letectví pod státním dozorem. Tento způsob studia nepomáhá hlubšímu porozumění problematice vestibulárních iluzí. Otázka vestibulárních iluzí tak bývá často marginalizována a obecně vnímána jako málo pravděpodobná. Tento přístup k teoretickému studiu je však chybný.

Pro podložení významu dobré teoretické vybavenosti, jakož i praktické zkušenosti si dovolím uvést přílehlavou metaforu z přípravy pilota. K rozdílnému přístupu a důležitosti praktického výcviku porovnám osnovu výcviku v České republice s osnovou ve Spojených státech amerických. V České republice je například, díky zkušeným instruktorům a velké tradici, běžné, že se během výcviku létají vývrtky. Student má díky této zkušenosti možnost vývrtku zažít a zjistit, jak se letadlo v této nestandardní situaci chová a jak letadlo následně dokáže stabilizovat. Ve Spojených státech je úmyslné uvedení letadla do vývrtky naprosto nemyslitelné, proto jsou američtí studenti vedeni pouze k nácviku zábrany vývrtky a opravdovou vývrtku a pocity s tím spojené nemají možnost zažít. Není potřeba si pokládat otázku, kdo je na vývrtku lépe připraven, zda pilot, který ji zažil, již v minulosti letadlo z vývrtky vyvedl a tudíž má reálnou zkušenost, jak s letdlem v takové situaci zacházet, či pilot, který vývrtku viděl jen teoreticky v učebnici. Vývrтка je velmi nebezpečný jev, ke kterému dochází nejčastěji v kritických fázích letu. Právě tento jev se stal osudným mnoho letadlům a pilotům a proto je vhodné umět adekvátně reagovat na takto nastalou situaci.

Tento stručně popsaný pohled na vývrtky je možné analogicky aplikovat i na fenomén vestibulární iluze. Bezesporu každý pilot v průběhu svého výcviku o problematice vestibulárních iluzí slyšel, ovšem nikdy nebyl tomuto jevu vystaven a neměl šanci získat praktickou zkušenost s tímto stavem, a to napříč všemi kontinenty. Pro piloty tedy bude těžké předpovídat a odhadovat své reakce, jelikož nemají dostatek zkušeností. Pilot bez hlubšího povědomí o problematice iluzí



nemusí iluzi rozpoznat od běžné nevolnosti a následně může tomuto pocitu podlehnout a učinit tak unáhlené, nepřesné či nevhodné kroky.

Let jako takový má zákonitě jisté fáze. Ty obvykle začínají již dlouho před letem v návaznosti na druh letu a rozsah působnosti společnosti či samotného pilota, přičemž rozlišujeme několik typů příprav. Specifickou přípravu k letu má pilot aerolinie, který dostane připravené dokumenty, které pouze překontroluje a bere je jako závazné pro provedení letu. Náročnější to mají piloti u menších provozovatelů provozujících převážně letadla z business jet sféry. U těchto společností piloti často plánují lety sami, a tedy před provedením samotného letu je nutná dostatečná všestranná příprava na další lag. Tato příprava je však podpořena použitím různých podpůrných softwarů jako NAV, PPS či jiných dostupných alternativ. Dalším případem je skupina pilotů létajících na GA letadlech, kde je příprava letu výhradně na pilotech. Proto u tohoto druhu provozu převažují lety VFR a plánování tedy probíhá jako příprava pro provedení letu za použití srovnávací navigace. Piloti GA mají jen řídkou podporu plánovacích softwarů.

Můžeme tedy říct, že let začíná ještě před vstupem do samotného letadla. Tento časový interval může být od desítek minut až po řády hodin, v extrémních případech i dnů. Následně, když dojde k vytvoření platné přípravy pro let, může pilot samotný let provést.

Po připravení letadla pro let dojde k pojiždění na vyčkávací místo dráhy v užívání a následně ke vzletu. V tento moment se dostáváme do první kritické fáze letu. Do kritických fází letu řadíme právě take-off run, take-off flight path, final approach, missed approach, landing, landing roll a fáze letu, které určí sám velitel letadla za kritické. Optikou somatogravické iluze je nejnáchylnější částí letu pro pilota vzhledem k tomuto fenoménu vzlet, který patří právě do kritické fáze letu a následně postup nezdařeného přiblížení při opětovné akceleraci a následném převedení do stoupání.

Na tomto místě považuji za vhodné připomenout, že příčinou vyvolání somatogravické iluze je oklamání vestibulárního systému. Jedná se primárně o zaměnění dvou rovin, které vestibulární systém nedokáže bez další reference dobře rozpoznat. Právě například během vzletu se kombinuje několik sil působících na pilota; kromě zrychlení dojde ke vzletu a následné zátěži vestibulárního systému. Vestibulární systém však v takovém případě nedokáže rozlišit, zda pilot stoupá nebo zrychluje, proto se může snadno stát, že tyto dvě osy budou zaměněny. V návaznosti na tento fakt je zřejmé, proč k navození dochází nejčastěji v době vzletu nebo opakovaného přistání.



1.4 Simulátory pro výcvik pilotů

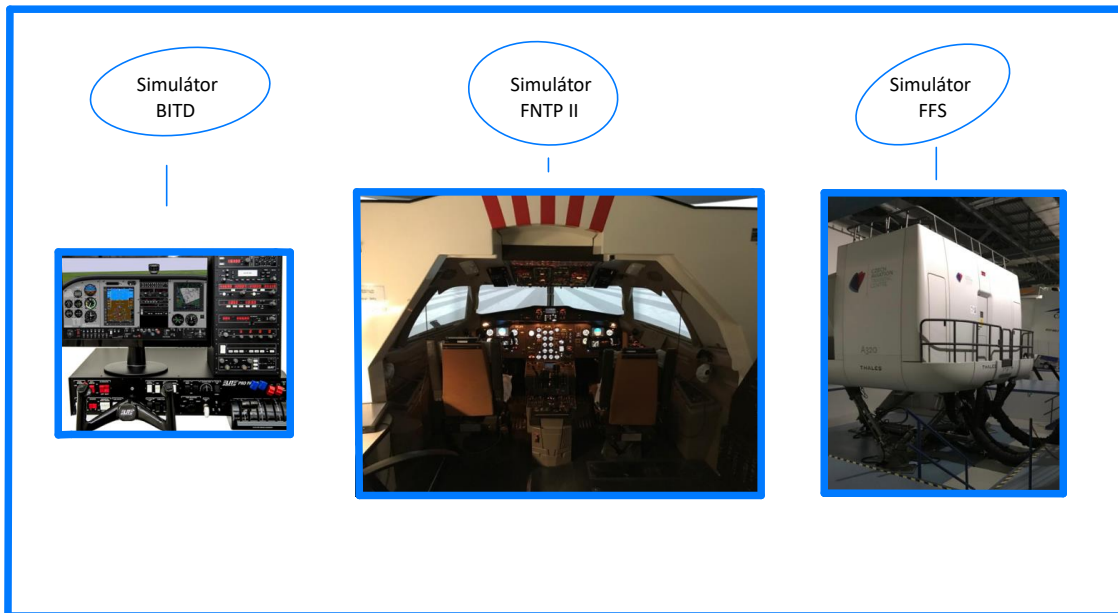
Díky rozsáhlým dovednostem, které pilot musí získat během svého výcviku, došlo postupem času k vytvoření stále lepších simulačních prostředků. Jelikož se trh se simulátory začal rozvíjet těsně po první světové válce, bylo nutné tuto možnost výuky ukotvit v legislativě. V našich zeměpisných šířkách pravidla pro simulátory udává EASA. Tato dozorčí agentura vytvořila závazné rozdělení, podle kterého se simulátory klasifikují [11]. Na obrázku 1.3 jsou uvedeny tři hlavní druhy používaných simulátorů.

Prvním a nejnižším stupněm je tzv. BITD simulátor, Basic Instrument Training Device, který slouží jako nejdostupnější varianta simulátoru pro nácvik letu podle přístrojů. Pro tuto třídu simulátoru je zapotřebí mít řídicí prvky letadla, ovládací panel a zobrazovací techniku. Tento simulátor nemusí mít podobu kokpitu a používá se hlavně na počátku výcviku.

Druhou vyšší třídou simulátoru je simulátor FNTP, což znamená Flight Navigation and procedures trainer. Tato třída simulátorů se dělí do tří kategorií, konkrétně na FNTP I, FNTP II a FNTP III. U těchto simulátorů může dojít ještě k rozšíření certifikace o výuku MCC, tudíž nejčastějším označením pro výcvik pilotů bude FNTP II/MCC, který udává druhou třídu Flight navigation and procedures trainer simulátoru v kombinaci s Multi crew cooperation provozem.

Další kategorií jsou FTD simulátory. Tyto simulátory se na rozdíl od FNTP staví konkrétně podle potřeb a rozměrů daného typu. Tento simulátor lze použít v počátečních fázích typového výcviku, jelikož je simulátor vytvořen s přesným umístěním všech přístrojů a ovládacích prvků. FTD simulátory se rozdělují na level 1 až 3, přičemž level 3 je určen pouze pro výcvik pilotů vrtulníků.

Královskou třídou jsou pak FFS simulátory, které se na rozdíl od předchozích plně pohybují. Dělí se od levelu A po level D. Tyto simulátory dokáží navodit nejrealističtější simulaci letu a využívají se jak pro typový výcvik, tak i pro opakovací výcvik pilotů během jejich celé kariéry. Tyto simulátory mohou být rozlišeny na pneumatické, hydraulické a elektrické. Hlavní rozdíl spočívá v ovládnání základny simulátoru, který je vyvozen pomocí hydraulických válců, pneumatických válců nebo elektrických aktuátorů.



Obrázek 1.3: Druhy používaných simulátorů [12]

Výcvik pomocí leteckém simulátoru je bezpochyby důležitou komponentou vzdělávacího programu pilota, díky které může čerpat krom efektivnějšího výcviku i ekonomické benefity. Ekonomické benefity jsou oboustranně výhodné jak pro pilota tak pro provozovatele. Simulátorová část výcviku umožňuje pilotům získat zkušenosti a dovednosti, které jsou nezbytné pro bezpečnou pilotáž letadla, aniž by bylo nutné vynakládat prostředky na reálné lety. Díky tomu dochází k výrazným finančním úsporám v podobě ušetřeného paliva, nízkých nákladech na údržbu simulátoru oproti letadlu a mnoha dalších provozních benefitech v podobě palivových příplatku, přistávacích poplatků či pojištění. Díky možnosti simulace široké škály letových situací, včetně extrémních a neobvyklých podmínek, mohou piloti bezpečně trénovat a zdokonalovat své reakce na různé scénáře, což ve skutečném letu může znamenat záchranu životů a ochranu majetku.

Kromě snížení provozních nákladů také výcvik na simulátoru přispívá k zefektivnění výukového procesu. Piloti mohou během krátkého časového úseku prožít a analyzovat mnoho různých situací, simulátor umí let zastavit a přenést žáka do konkrétního bodu dle potřeby. V praxi to znamená že například nezdařený postup může být okamžitě zastaven, vrácen v čase a pilot ho může opakovat znovu a lépe, což by v reálných podmínkách vyžadovalo mnohem více času a zdrojů. Tento fakt je nejcitelnější pro nové piloty, kteří potřebují rychle získat praktické zkušenosti, v co nejekonomičtější



podobě. V dnešní době kdy je trendem zvedat cenu paliva jsou lety na simulátoru výtanou a využívanou alternativou.

Dalším důležitým ekonomickým aspektem je možnost standardizace výcviku. Simulátory umožňují leteckým společnostem a výcvikovým institucím provádět konzistentní úroveň výcviku napříč simulátorovými centry, v praxi to znamená že letecká společnost či škola která požaduje výcvik, zašle schválené příručky podle kterých dokáže centrum výcviku sestavit plán, který je možný využít na všech pobočkách dané organizace. V opačném případě může být osnova a metodika vytvořena přímo leteckou společností a opět poskytnuta výcvikovým centřům pro školení jejich pilotů. Fakt že různé posádky jezdí do různých výcvikových center za účelem edukace či recurrentu je zapříčiněn přeplněnou kapacitou a to i přes nonstop provoz většiny simulátorů. Možnost této standardizace je důležitá pro udržení bezpečnostních a operačních standardů. Standardizace také napomáhá lepšímu sledování a hodnocení výkonu pilotů, bez rozdílu zvoleného výcvikového centra.

V neposlední řadě, je vhodné používání simulátorů přínosné v oblasti udržitelnosti a ekologie. Dosažené snížení počtu vykonaných letů může mít přímý dopad na snižování emisí skleníkových plynů a šetření přírody. V dnešní době, kdy je důraz kladen na environmentální aspekty každého průmyslu, je toto zvláště důležité pro zlepšení vnímání leteckého průmyslu ve společnosti a pro podporu jeho udržitelného rozvoje. Naštěstí při rozpočítání ekologické zátěže na přepraveného cestujícího nevychází neuspokojivé hodnoty. Interpretace s akcentací na neúnosnou ekologičnost leteckého průmyslu je povětšinou interpretovaná ekoteroristy bez hlubší znalosti leteckého průmyslu, aerodynamiky, principu proudových či spalovacích motorů nebo základních, elementárních znalostí pohodných hmot.

1.5 Simulátory ULZ

Simulátor, který byl využit při experimentu v této diplomové práci, je umístěn v areálu Ústřední vojenské nemocnice. Tento simulátor je ve vlastnictví Ústavu leteckého zdravotnictví. Simulátor s označením GYRO IPT-II [13] který je vyobrazený na obrázku 1.4 je v tuzemsku naprosto unikátní a ojedinělý. ULZ uvedl tento přístroj do provozu 8. května 2019, jedná se tedy o relativně nový simulátor. Simulátor byl vytvořen americkou společností, která má široké spektrum výrobků a pokrývá výraznou část trhu. Tato firma se specializuje právě na simulační prostředky

v letectví, armádě a kosmických technologiích. Kromě deziluzčního simulátoru, který byl použit při výzkumu v rámci diplomové práce společnost nabízí například centrifugy či jiné simulátory, které pomáhají co nejdříve navodit prostředí, kterému bude následně dotýčný exponován v reálném případě. Simulátor byl umístěn do prostor ULZ primárně po účely Armády České republiky.

Tento simulátor v Ústavu leteckého zdravotnictví doplňuje ostatní simulátory a výcvikové prostředky, které se mohou případně mezi sebou navzájem kombinovat. Veškeré výcviky, které se na simulátorech provádějí, jsou vždy úzce spjaty a propojeny s teoretickou přípravou, která je před praktickým tréninkem nepostradatelně důležitá a mnohdy zabírá poměrně výraznější část časové dotace pro daný typ výcviku.

Dezorientační simulátor ULZ



Obrázek 1.4: Dezorientační simulátor [14, 15]

Simulátor, který ULZ provozuje, je tzv. modulární. Samotná avionika simulátoru může být vyměněna, včetně ovládacích prvků v kokpitu. Kombinace letounů, jejichž podmínky dokáže simulátor navodit, je neobvyklá, avšak v prostředí armády je potřeba této variability pochopitelná. Simulátor je tedy možné využívat jak pro simulaci letounů Zlín řady 42, tak i pro víceúčelový bojový letoun JAS-39. Tyto dva typy letadel a jejich kombinace jsou pro Armádu České republiky důležité, jelikož JAS-39 Gripen je v současné době nejcennějším letounem, který armáda může poskytnout. Možnost nasimulovat letoun výrobce Zlín je důležitá pro výcvik, jelikož jak základní pilotáž, tak následně i vyšší pilotáž a s ní spojená akrobacie probíhají právě na letounech Zlín v Centru leteckého výcviku umístěném v Pardubicích. ULZ tedy v této otázce dokáže spolupracovat

s piloty napříč všemi letkami, jelikož všichni prošli přes analogový mechanický kokpit letounu Zlín, který je schématicky znázorněn na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Avionika dezorientačního simulátoru

Letoun je vybaven bohatou paletou avionických přístrojů a to i méně běžných pro kokpit letounu zlín Z-142. Mezi klíčové přístroje patří rychloměr, který ukazuje rychlost letadla v tomto provedení v uzlech, což u letadel československé proveniencie nebývá zvykem avšak u takového simulátoru je to odpovídající vzhledem k návazujícímu či pokračujícímu výcviku na modernějších strojích které mají moderní avionické vybavení dle západních standardů. Nejdůležitějším přístrojem který byl během letů intenzivně používán je umělý horizont umístěný ve středu horní řady, zobrazující podélnou a příčnou osu letadla. Výškoměr je třetím přístrojem, taktéž v horní řadě, udává výšku letadla přepočtenou na střední hladinu moře, nebo dle tlaku ISA. Příčný sklonoměr je umístěný ve druhé řadě zleva, ukazuje změnu směru letu a sklonu funguje na principu kyvadla, odlišným přístrojem je Heading Indicator v dolní řadě, který interpretuje aktuální směr letadla vzhledem k severu, jeho funkce je shodná s funkcí kompasu.

Vertical Speed Indicator, je klíčový pro stoupání a lesání během přístrojových odletů a zejména během přístrojových přiblížení. Tento přístroj měří rychlost změny výšky letadla v čase, indikuje



tedy jak rychle letadlo stoupá nebo klesá. Indikátor otáček neboli otáčkoměr, byl pro potřeby letu zanedbatelný, nevyžadoval se po pilotech let dle platných režimů z POH, přístroj slouží k odečtení otáček motoru. Ukazatel stavu paliva je jednou z doplňkových indikací které se během simulace nepoužívali. Pilot je mohl kontrolovat, ale během měření neměli významnější roli. Stejně nevyužitými indikátory byli ukazatelé teploty a tlaku oleje motoru které jsou při běžném letu vně simulátoru klíčové pro udržení motoru v provozních limitech. Nejdůležitějším vybavením pro provedení letu bylo hned po umělém horizontu radionavigační vybavení v podobě course deviation indicatoru a automatic direction finder, díky kterým bylo možné zaletět požadovaný profil dle pravidel IFR.

1.6 Proces rozhodování u pilotů

Proces rozhodování pilotů je komparativní kognitivní proces porovnávající několik alternativních řešení s cílem vytvořit a najít právě to nejvhodnější možné řešení. Jedná se o proces, který je nesmírně důležitý. I proto by každý pilot měl disponovat dobrou rozhodovací schopností.

Do procesu rozhodování vnáší letectví zásadní komplikaci, a tou je reakční čas. Čas, během kterého dokáže pilot přesně vyhodnotit situaci a udělat rozhodnutí, je limitní, jelikož letadlo během svého letu nemůže zastavit nebo decelerovat v dostatečné míře, aby bylo pilotovi poskytnuto více času na rozhodování. Tzv. decision making úzce navazuje na problém vestibulárních iluzí.

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1 popisující vestibulární systém a somatogravickou iluzi u pilotů, dochází k navození vestibulární iluze zejména v podmínkách IMC, případně se tato iluze může objevit i při letu podle pravidel VMC. Toto zjištění není překvapující, představíme-li si noční let v prvních či posledních fázích měsíce, kdy noční obloha je ozářena pouze hvězdami, které odrážejí malé množství světla. Pokud pilot dosáhne těchto podmínek nad vodní hladinou nebo neosídlenou pevninou, kde nejsou světelné zdroje, lze tuto situaci kvalifikovat jako let IFR. Pilot má pro tyto případy několik systémů, díky kterým může ověřit, zda je jeho poloha a pohyb v prostoru dle očekávání, či nikoliv. Navzdory umělému horizontu, variometru nebo příčnému sklonoměru pilot mnohdy podlehne vestibulární iluzi a bez ověření vstupu z přístrojů rozhodne neadekvátně. Právě v tomto případě hraje jednu ze stěžejních rolí správný decision making, neboť kdyby si pilot, který prožívá vestibulární iluzi, dokázal uvědomit, že iluzi prožívá, dokázal by reagovat vhodněji. Tento fakt se vztahuje i na piloty, kteří nerozeznají vstup do vestibulární iluze, ale dokáží nepodlehnout



vestibulárním vjemům a pokračují ve striktním letu podle přístrojů. V závislosti na fázi letu a vybavenosti letadla se pilot musí rozhodnout, jakým přístrojům bude věnovat míru své pozornosti. Letadla, která jsou určena pro IFR provoz, mají vždy dostatečné vybavení a adekvátní rozložení přístrojů dle předpisu CS-23 či CS-25 [16]. Proto je záhodno brát v potaz, že vestibulární iluze jde ruku v ruce s decision makingem.

V leectví je proto klíčovou dovedností schopnost pilotů spoléhat se na přístroje, zejména ve chvílích, kdy jsou vizuální reference právě omezené nebo zcela nedostupné [17]. Tato dovednost je zvláště kritická v případech, kdy piloti čelí podmínkám vhodných pro navození iluze a to včetně somatogravické iluze. Somatogravická iluze je jedna z vestibulárních iluzí, která vzniká, když piloti nesprávně interpretují síly působící na jejich tělo a chybně hodnotí polohu a pohyb letadla. Kpodlehnutí iluzi dojde v moment kdy piloti ztrácejí vizuální orientaci.

Pro boj s těmito iluzemi je nezbytné, aby piloti důvěřovali avionickému vybavení v kokpitu. Tyto přístroje poskytují objektivní informace o skutečném stavu letadla, jako je jeho rychlost, výška, náklon, směr letu a další klíčové parametry. Při důvěře v přístroje musí pilot ignorovat své subjektivní vnímání a spolehnout se na data, která mu přístroje poskytují. Pilot musí brát v úvahu certifikační proces, kterým avionické vybavení muselo projít, tudíž je exponenciálně pravděpodobnější, že dojde k chybnému úsudku pilota, nežli k chybnému vyhodnocení letových dat avionikou v letadle.

Tuto dovednost je nutné vštěpovat pilotům již během výcviku, kdy se učí interpretovat hodnoty poskytnuté přístroji v kokpitu a následně důvěřovat těmto přístrojovým datům. V kokpitu letadla se piloti mohou setkat jak s analogovými přístroji, tak s glass kokpitem, ať už v podobě již tovární vestavby nebo v dodělávaném retro fitu, porovnání kokpitů je zobrazeno na obrázku 1.6. Práce s avionikou, hlavně v raných fázích výcviku je neustálý cyklus učení, simulace a praktického tréninku, který umožňuje pilotům získat potřebné dovednosti a instinkty pro bezpečný let. V reálných letových situacích jsou piloti trénováni, aby neustále monitorovali a hodnotili informace z přístrojů a aby se rychle adaptovali na základě těchto informací. Během tohoto učení je možné využívat simulátory, které hrají klíčovou roli v edukaci pilotů. Díky nim je totiž možné piloty podrobit výcviku letů za ztížených podmínek, a naučit je tak jak vnímat letová data během těchto mimořádných letů a jak je následně vyhodnocovat. Důvěra v přístroje se dá tedy považovat za základní předpoklad pro bezpečnost a plynulost letecké dopravy. V momentu navození iluze je před pilota postavena



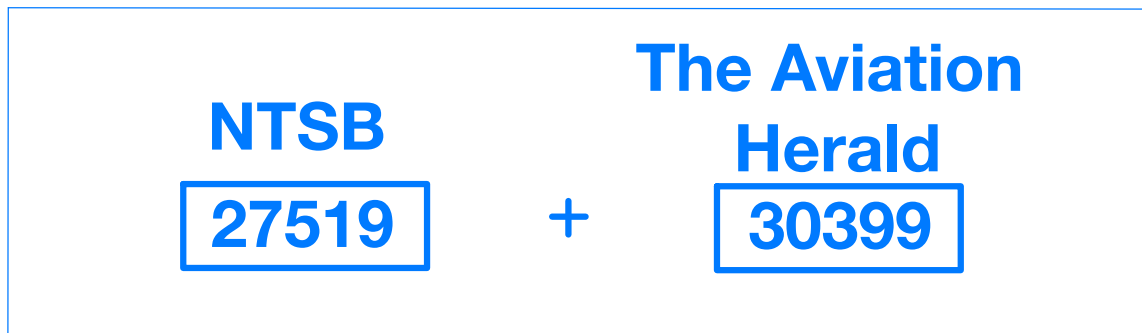
Obrázek 1.6: Porovnání avioniky v kokpitu

výzva, při které je jeho důvěra v přístroje nezbytná. Pro piloty je klíčové nepodléhat subjektivním pocitům a dát důvěru objektivním datům, která jim jejich přístroje poskytují.

1.7 Nehody AOC letadel spojené se somatogravickou iluzí

V následující části své práce se zaměřím na popis jednotlivých letů provozovaných v rámci komerční letecké dopravy, které byly negativně ovlivněny somatogravickou iluzí. Somatogravická

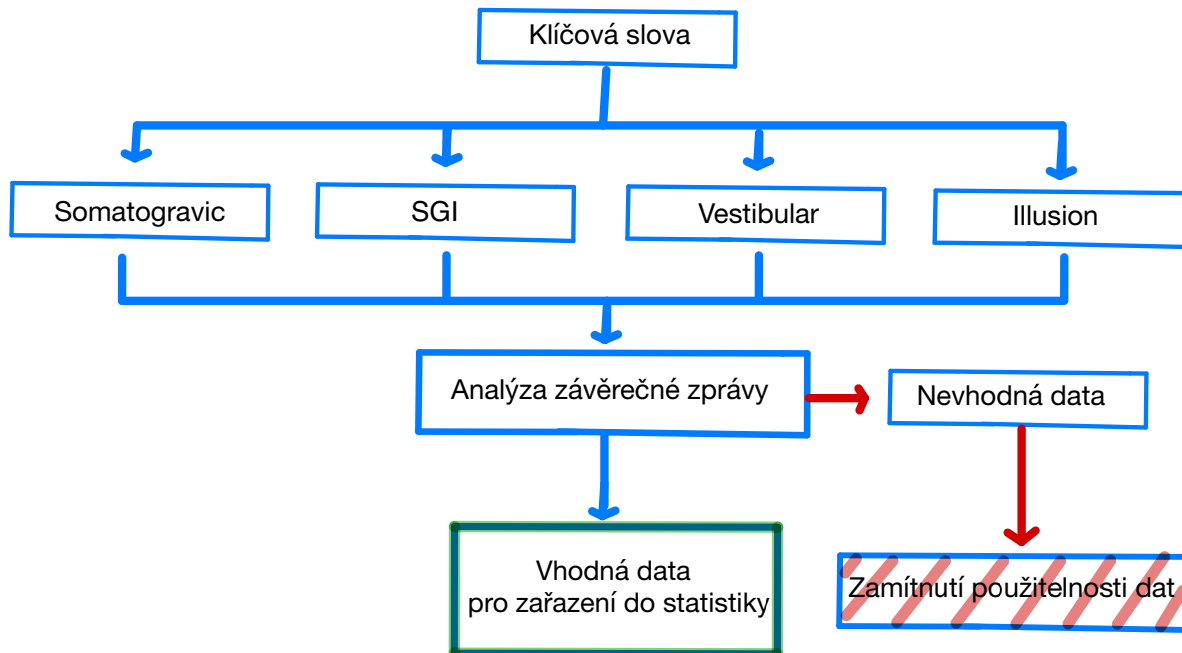
iluze byla v těchto případech posouzena jako hlavní důvod letecké nehody, případně byla vyhodnocena jako dílčí faktor, který vznikl jako přímý výsledek předchozího pochybení. V této práci jsem se zaměřil na přezkoumání období od roku 2000. Překvapením bylo, že v časovém období uplynulých let došlo k nemalému počtu leteckých nehod alespoň částečně způsobených vestibulární iluzí. Tyto tragické nehody měly za následek mnoho obětí. Velkým překvapením, které z komparace vzešlo, bylo tvrzení, že dle závěrečných zpráv nelze korelovat vztah mezi mírou inklinace k vestibulární iluzi a zkušeností velitele letounu. Dle mnohých závěrečných zpráv došlo k navození iluze u nesmírně zkušených pilotů s několikatisícovým náletem stejně jako u nezkušených a teprve začínajících pilotů.



Obrázek 1.7: Počet publikací sdílených zprostředkovatelem

Veškeré informace o leteckých nehodách byly čerpány z veřejně publikovaných zdrojů. Tyto informace byly následně umístěny do tabulky, ze které vychází zmíněné informace. Objektivně vzato má nejvhodněji publikovaný přehled leteckých nehod americký Úřad pro vyšetřování leteckých nehod NTSB [18], který vede veřejně přístupný seznam leteckých nehod, v rámci kterého je možno filtrovat nehody a incidenty dle příčiny či klíčového slova. Dle dostupných informací NTSB mělo veřejně publikovaných 27519 reportů o nehodách, napříč všemi státy a všemi zařízeními, které podléhají zcela jiné certifikaci dimenzionálně odlišné té, které užíváme v Evropě. Objem reportů ze kterých bylo vyhledáváno pomocí klíčových slov je vyobrazen na obrázku 1.7. Umyslně jsou zde zmíněny pouze dva zdroje, jelikož třetí komerční zdroj neuměl hledat podle klíčových slov, tudíž nemohlo být bráno v potaz prohledání celé databáze. Vyhledávání pomocí klíčových slov je schématicky popsáno na obrázku 1.8. Ostatní letecké nehody byly popsány za pomoci

informací nalezených při prohledávání komerčních stránek věnujících se leteckým nehodám [19, 20]. Internetový server The Aviation Herald umožnil také hledání podle klíčového slova. V době tvorby této diplomové práce tento internetový server nabízel 30399 článků o leteckých nehodách. Postup použitý pro tvoření rešerše byl následující: zjištění nehody zapříčiněné somatogravickou iluzí a následné vyhledání závěrečné zprávy, ze které bylo možné čerpat informace.



Obrázek 1.8: Klíč k rešerši leteckých nehod

Největší limitací a zklamáním při tvorbě databáze těchto nehod bylo extrémně malé množství veřejně sdílených informací o leteckých nehodách ze strany velkých leteckých velmocí. Multilaterální sdílení informací o leteckých nehodách je základním předpokladem pro snížení počtu leteckých nehod a zlepšení prevence, zejména u letadel GA, kde piloti musí procházet každoročním jarním školením, při kterém dochází k prezentaci nehod z loňského roku. Toto bezpečnostní opatření je však specifické výhradně pro tuzemsko. Při zpracovávání leteckých nehod pro tuto diplomovou práci v kontextu somatogravické iluze bylo snahou začlenit do analýzy co největší počet leteckých subjektů národní úrovně. Při této snaze se však objevila neideální a nedostačující transparentnost některých úřadů či státních organizací. Jasnou podmínkou bylo vynechání států, které jsou řízeny určitým nedemokratickým režimem. I v případě, že by se tato



data z výše uvedených typů zemí dala dohledat, nebylo by možné brát tyto informace za relevantní a neupravené. Po eliminaci režimových států bylo jasné že je potřeba se zaměřit na letecké velmoci s přehlednou a strukturovanou databází, ke které je veřejný přístup, např. již uvedené USA. Znalec letectví, který neopývá znalostí konkrétního prostředí a daných kulturních specifik by si mohl myslet, že sousední stát jako Kanada bude vlastnit podobnou veřejně dostupnou analýzu. Stát javorového listu s velkou leteckou tradicí, a to zejména v extrémním počasí. Díky své poloze je ovlivněn hustým sněžením a krutou zimou. I z tohoto důvodu byla snaha o získání dat od kanadských úřadů. Kanada si databázi nehod sice dle oficiálních stránek vede, ale dostat se do databáze je pro běžného uživatele nemožné, databázi nelze načíst. Otázkou tedy zůstává, zda byla databáze v údržbě a dočasně nefunkční, nebo zda se jedná o cílenou blokadu neautorizovaného narušitele. Ani snaha o zmatení prohlížeče pomocí kanadské VPN nebyla úspěšná. Kromě velkých států byla snaha i o nasbírání dat od menších států v Evropě. EASA bohužel nevede databázi nehod se závěrečnými zprávami, ale pouze databázi nehod pro statistické účely. Při hledání po jednotlivých evropských státech není nezbytné chodit daleko a lze se zaměřit na publikace UZPL. Český úřad pro zjišťování příčin leteckých nehod má na první pohled hezké stránky, ale v kontextu této diplomové práce naprosto nevhodnou strukturu. Vyhledávání je možné pouze v čase, nelze hledat dle příčiny nehody či klíčového slova. Nelze hledat ani podle předdefinované taxonomie, kterou by mohlo být například použití ATA kapitol. Velkou pomocí pro získání dalších letů byly soukromé organizace, které se zabývají archivací informací o leteckých nehodách včetně závěrečné zprávy, v případě že je vydána. Tyto organizace mají povětšinou přehledné weby, na kterých je možné hledat klíčové slovo. Dále lze vyhledávat pomocí integrovaného rozdělovníku, který navede uživatele do oblasti nehod shodných se zájmem hledání.

Pro tuto práci bylo prověřeno rozsáhlé množství leteckých nehod. Pro potřeby klasifikace bylo zpracováno celkem 45 nehod od roku 2000 do roku 2022; tyto roky byly vybrány jako relevantní vzorek z důvodu srovnatelného vybavení avionického i technického, co se letadel týče. Právě z tohoto důvodu nebyl brán v potaz vzorek nehod, které se udály před rokem 2000. Horní hranicí byl zvolen rok 2022, a to z důvodu časové náročnosti přezkumu leteckých nehod, který trvá v řádech měsíců až let. Závěrečnou zprávu, jejíž součástí je vyhodnocení hlavní a i sekundární příčiny dané nehody, lze získat až po kompletním přezkumu všech aspektů nehody. Proto je posledním rokem, v rámci něhož byly nehody zkoumány rok 2022, kde je možné očekávat již kompletní zpracování všech nehod, které do zmíněné doby vznikly. Pro účely této práce byl následující přehled rozdělen

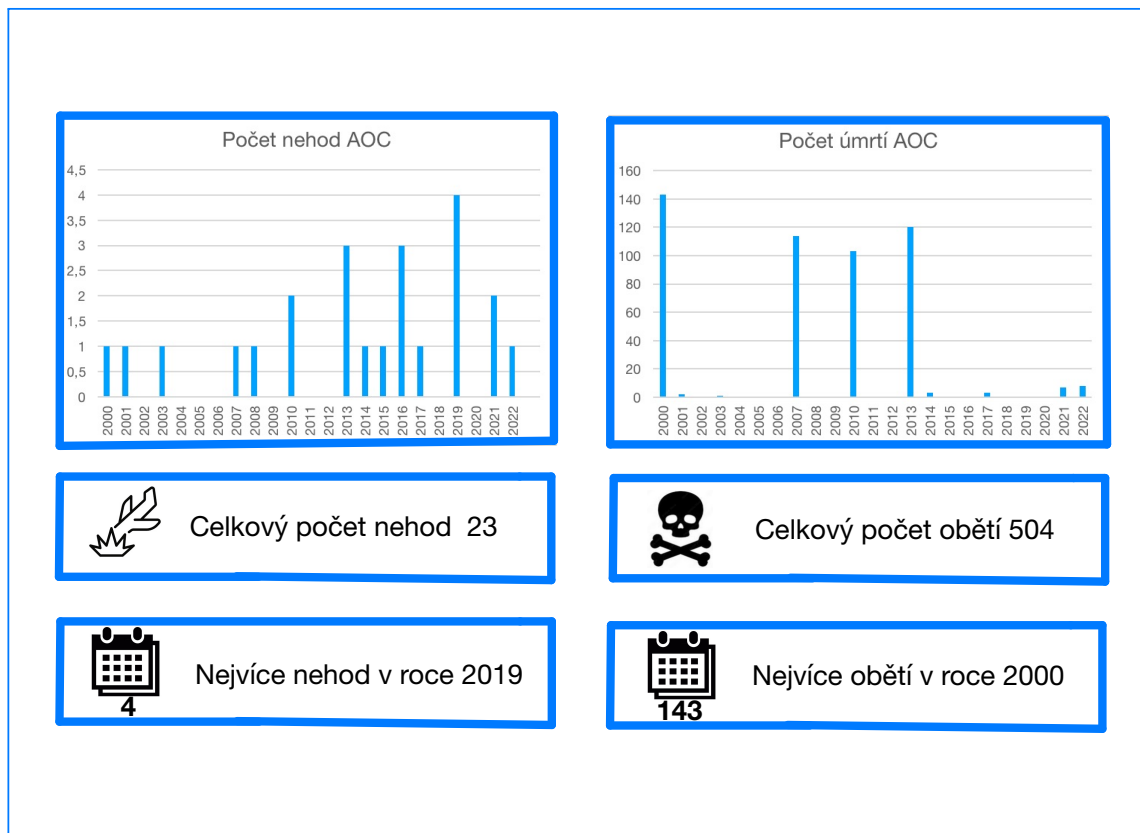


do dvou kategorií. První kategorií, které je věnována tato kapitola, je přehled nehod letadel v komerční letecké dopravě. Druhou kategorií, která je popsána v následující kapitole 1.8, jsou nehody letadel General Aviation, tedy letadel, která neslouží k dopravě za úplatu.

Ke komplexnímu pohledu na již vzniklé nehody bylo potřeba vytvořit databázi nehod se všemi dostupnými informacemi. Na základě poznatků je možné říci, že během sledovaných 22 let došlo v obchodní letecké dopravě ke 23 nehodám, při kterých přišlo o život 504 lidí. Může se to v porovnání s ostatními druhy dopravy zdát jako nízké či zanedbatelné číslo, ovšem na druhou stranu lze na tyto nehody nahlížet prismatem jednoho společného jmenovatele. V takovém případě je poměrně alarmující, že všech 23 nehod, neboli 504 zmařených lidských životů mohlo být do jisté míry zapříčiněno právě vestibulární iluzí.

Právě vestibulární iluze, konkrétně iluze somatogravická, která byla navozena v níže popsáných případech sehrála význačnou roli. Důležitou poznámkou při zpracování této problematiky je i pohled na vyhodnocení, zda piloti mohli prožít somatogravickou iluzi či nikoliv. Somatogravická iluze, na rozdíl od ostatních iluzí, nastává primárně při změně zrychlení, tudíž se dostavuje při změně vektoru tahu. I proto je v takovém případě návodné, pokud se letecká nehoda stala v průběhu procesu nezdařeného přiblížení, při němž došlo k převedení letadla z režimu klesání do režimu TO/GA, přičemž letadlo v plném výkonu přejde do stoupání. Nutno poznamenat, že k navození somatogravické iluze nedochází jen během přechodu do postupu nezdařeného přiblížení. Navození somatogravické iluze může být dosaženo i během přiblížení kdy letoun během plnění pokynů řídicího od kterého obdržel změnu kurzu a příkaz k přechodu do horizontu. Pilot tento úkol předá autopilotovi, který letadlo převede z klesajícího letu do horizontálního a následně zahájí zatáčku do požadovaného kurzu podle kurzového voliče, nebo díky tangenciální spojnicí k dalšímu bodu. Letoun klesal ekonomicky se staženým výkonem a nutnost pokračování v horizontu s následnou zatáčkou zapříčinila výrazné přidání plynu. Toto přidání v kombinaci se zatáčkou uvede pilota do silného pocitu stoupání, nejedná se však o kritickou fázi letu a pilot má lepší situační povědomí o dění, než je tomu v případě postupu nezdařeného přiblížení. Bylo však nutné v kontextu této práce zmínit že somatogravická iluze je navozena pilotům pravidelně v jiné než kritické fázi letu, kde jsou schopni vestibulárnímu zmatení odolat.

Při tvorbě databáze nehod, při kterých došlo k navození somatogravické iluze, bylo nalezeno mnoho závěrečných zpráv, ve kterých byl výskyt somatogravické iluze v nějaké míře zmíněn, ovšem vždy ve finále vyloučen jako důvod nehody. V závěrečné zprávě bylo tedy například



Obrázek 1.9: Statistika leteckých nehod v důsledku somatogravické iluze

poznáno, že podmínky letu mohly pilotům navodit somatogravickou iluzi, záznam z FDR však nenasvědčuje takovému jednání. Nezbyvá tedy než pouze spekulovat, zda piloti podlehli dané iluzi, či nikoliv, nebo zda piloti přes jiné faktory, během posledních chvil letu, iluzi nezaznamenali. Toto jsou však pouhé spekulace, které nelze pomocí dostupných dat doložit či jinak ověřit. Záznamové zařízení, které by pomohlo v objasnění příčin leteckých nehod, by byl vizuální záznam dění v kokpitu, jedná se však o velmi diskutovaný zásah, který si s sebou nese smíšené názory na vhodnost implementace. Z pohledu bezpečnosti by to byl však jasný krok kupředu, minimálně by došlo k usnadnění rozborů leteckých nehod. V kontextu této práce je zpracovaná statistika uvedena v obrázku 1.9

Jak již bylo v této kapitole zmíněno, za posledních 22 let došlo ke 23 nehodám s 504 oběťmi. Z tohoto poměru lze odvodit, že se jedná zhruba o 22 osob ročně, které se stanou oběťmi



somatogravické iluze. Zde do hry vstupuje nerovnoměrná časová distribuce leteckých nehod, neboť v některých letech nedošlo k žádné nehodě a naopak v roce 2019 byly zaznamenány 4 nehody s celkovým počtem 8 obětí. Extrémní hodnotou s opačným poměrem je hned první rok sledovaného období, rok 2000, kdy došlo k jedné letecké nehodě s počtem 140 obětí. Velký rozdíl v počtu obětí je způsoben rozdílným druhem dopravy, jež dopravce provozuje. Ve vzorku nehod jsou totiž uvedena letadla určená pro přepravu osob, ale i letadla nákladní, která v případě nehody snižují konečný počet obětí rozložených v čase.

1.8 Známé nehody GA letadel spojené se somatogravickou iluzí

Ačkoli je letecká doprava považována za nejbezpečnější formu přepravy, v historii došlo k nespočtu leteckých nehod, viz předchozí kapitola. Příčiny byly rozličné, avšak u některých nehod byla prokazatelně příčinou iluze. K takovýmto typům nehod nedocházelo pouze u velkých komerčních letadel, ale i u sportovně létajících zařízení a business jetů.

Tato kapitola obsahuje shrnutí leteckých nehod, které se vyskytly ve sféře general aviation. Pro tuto sféru letectví bylo vybráno stejné období jako pro letadla z komerční letecké dopravy, tedy roky 2000 až 2022. Během těchto 22 let bylo dohledáno 22 nehod, při kterých zemřelo celkem 35 lidí a 8 bylo vážně zraněno. U letadel ze sféry general aviation tak došlo k největšímu počtu nehod v roce 2009, a to konkrétně ke čtyřem nehodám. I v této sféře menší letadla byla několik let bez jediné nehody. U těchto nehod je mnohem těžší určit, zda došlo k navození vestibulární iluze, jelikož se do takto malých letadel nedávají CVR a mnohdy ani FDR. Proto bylo leckdy zkoumání náročnější než v případě komerčních letadel s množstvím záznamových zařízení.

S vestibulární iluzí jsou spojeny zejména dva jevy: řízený let do terénu (CFIT) a vyvedení letadla mimo letovou obálku.

Důležité je si uvědomit, jak široké je spektrum letů a nehod, které se do tohoto výčtu nedostaly. Lze s jistotou tvrdit, že bylo určité množství letů, během kterých piloti pocítili vestibulární iluzi, naštěstí bez fatálního následku. Tyto lety nejsou reflektovány v použitém výčtu, jelikož piloti malých letadel nemají legislativní povinnost takovéto situace oznámit a v současnosti neexistuje dostatečně účinný dozorcí orgán, tudíž je pro piloty jednodušší takové okolnosti zamlčet. Obzvláště pak jedná-li se o majitelské letadlo, nikoliv o letadlo provozované aeroklubem nebo větším provozovatelem, který má pro tyto případy jasně nastavené interní postupy.



2 Metodologie

Metodika této práce byla vytvořena za účelem zjištění vhodnosti dezorientačního simulátoru pro zvýšení odolnosti pilotů vůči somatogravické iluzi. Vzhledem k cíli této práce byl hlavním metodickým postupem vlastní výzkum. V rámci zkoumání byl využit dezorientační simulátor, který měl co nejvěrohodněji navodit iluzi u pilota během letu. V rámci výzkumu bylo letu na simulátoru podrobena 114 pilotů, což je reprezentativní vzorek.

Nastavení použité metodiky bylo důležité pro reálné navození iluze během letu na simulátoru. Při letu na dezorientačním simulátoru docházelo k letu podle několika rozdílných letových profilů, během kterých bylo cílem navodit co nejrealističtější iluzi. Cílem tohoto procesu bylo zjištění reálné a plně autentické reakce pilotů, která mohla být zpracována a následně vyhodnocena. Data shromážděná z jednotlivých měření byla mezi sebou následně porovnána. Motivací pro tvorbu metodiky této práce byla snaha o zvýšení bezpečnosti civilního letectví.

2.1 Vzorek pilotů pro experiment

Experimentu pro potřeby této práce se účastnila široká skupina pilotů rozdělená do předem definovaných skupin. Celkem se výzkumu účastnilo 114 pilotů napříč věkovými skupinami v rozmezí 18 až 59 let a s různým náletem. Piloti byli vybráni a následně zařazeni do skupin dle jejich zkušeností, respektive podle toho, v jaké fázi výcviku letu podle přístrojů se momentálně nachází. Pro účast ve výzkumu byly nutností elementární znalosti o letech IFR. Pilot by bez znalosti postupů letů podle přístrojů nebyl schopen zaletět letový profil dle požadavků, což by mohlo vést ke zkreslení celkových výsledků měření a následně negativně ovlivnit celý experiment. Konkrétně se jednalo o zařazení do čtyř skupin.

Skupina číslo jedna obsahoval vzorek pilotů, kteří právě dokončili simulátorový výcvik, který předchází IFR výcviku na letadle. Jednalo se tak o piloty, kteří jsou stále ve výcviku, i když již v pokročilé fázi. Druhou skupinu tvořili piloti, kteří v nedávné době dokončili IFR výcvik. Jednalo se tedy o skupinu pilotů, kteří jsou certifikováni pro provoz IFR a úspěšně absolvovali let s examinátorem pověřeným UCL. Třetí, předposlední skupinou, byli piloti zkušenější, v kontextu rozumějme skupinu letců s náletem okolo 250 hodin celkového počtu naléтанých hodin podle přístrojů. O zařazení do této skupiny nerozhodoval celkový nálet, ale pouze nálet, který piloti učinili po dosažení přístrojové kvalifikace při letech podle pravidel IFR. Poslední, čtvrtou skupinu,



tvořili nejzkušenější piloti. Do této skupiny byli zařazeni piloti s vyšším náletem než 250 hodin IFR. Většina z testovaných pilotů však disponovala výrazně vyšším náletem než bylo pro zařazení do této skupiny potřeba. Typicky se jednalo o piloty, kteří létali obchodní leteckou dopravu bez rozdílu, zda létali pro aerolinku provozující velké dopravní letadla, nebo menší soukromá letadla ze sféry business aviation. Tento rozdíl v pilotovaném typu nebyl pro výzkum považován za relevantní, jelikož hlavní podmínkou pro experiment byla znalost pravidel letů podle přístrojů a zkušenost s jejich prováděním.

Všichni piloti, kteří byli součástí experimentu, byli držiteli zdravotní způsobilosti první třídy. Splňovali tedy požadavky dle PART-MED, čímž pádem je možné vyloučit zdravotní komplikace, které by přímo ovlivňovaly průběh experimentu. U zkoumaných pilotů nedošlo k ovlivnění výsledků ani v důsledku jakékoliv zrakové vady, jelikož všichni piloti se zdravotním průkazem první třídy mají buď bezchybně zdravý zrak, či jsou zrakovými pomůckami dostatečně kompenzováni, aby bylo možné i tyto respondenty považovat za respondenty bez zrakové vady. Posledním faktorem, na který byl v průběhu výzkumu kladen důraz, bylo ověření, zda piloti nepodstupují experiment pod vlivem alkoholu či jiných návykových látek. Ačkoliv tato podmínka byla vyhodnocena subjektivně a zakládala se na důvěře v testovaného, lze ji ve všech případech považovat za splněnou. U pilotů bylo vyloučeno i dlouhodobé užívání léků na předpis, které by potenciálně mohly mít negativní vliv na pilotáž a znemožňovaly by tak účast na experimentu.

2.2 Plánování měřících letů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, experimentu se zúčastnil poměrně velký počet pilotů. Získání takto velkého vzorku pilotů bylo časově náročné. Piloti totiž byli v mnoha případech zaměstnání na plný úvazek pro aerolinku, či byli vytíženi právě probíhajícím leteckým výcvikem. Nejkomplikovanější z časového hlediska bylo plánování měření pro skupinu pilotů po dokončení IFR výcviku. Tento fakt byl způsoben tím, že většina pilotů již našla uplatnění typicky právě prací pro aerolinku, a podstupovali tak základní výcvik a přidružené lety na simulátorech. Ačkoliv je tento typový výcvik koncipován co nejefektivněji, neboť piloti mají přes den groundschool a v noci, kdy jsou sloty pro simulátorové lety volné, provádějí výcvik letový, lze předpokládat, že se piloti ve volných chvílích snaží věnovat samostudiu. Investice těchto pilotů do samotného výcviku byla již tak nákladná, že jejich motivace pro úspěšné zakončení typového výcviku byla silnější než touha



po účasti na experimentu nezbytném pro tuto diplomovou práci. S mnoha piloty se však povedlo navázat spoluprací, a tak let na dezorientačním simulátoru absolvovali.

Mohlo by se zdát, že nelehkým úkolem bude přilákat již zkušené piloty z aerolinek. Avšak ukázalo se, že tato skupina byla paradoxně úplně nejméně problematická. Mnoho zkušených pilotů se již experimentů v nějaké formě historicky účastnilo a téma vestibulárních iluzí vnímali jako atraktivní. Proto testování ze skupiny nejzkušenějších pilotů participovali na výzkumu vestibulárních iluzí bez váhání a s největším nadšením. Lze se rovněž pouze domnívat, že toto nadšení skupiny nejzkušenějších pilotů mohlo pramenit z vysokého povědomí o míře nebezpečnosti tohoto jevu mezi zkušenými piloty. Motivací pro účast mohla být však i neobvyklá zkušenost už tak velmi zkušených pilotů.

Aby byl získán co největší relevantní vzorek pilotů byly zvoleny rozličné taktiky. Prvním důležitým způsobem bylo oslovení zaměstnanců Katedry letecké dopravy ČVUT, kteří aktivně létají komerční leteckou dopravu. Tyto osoby se buď sami účastnili, či předali kontakty na své zkušené kolegy. Je důležité uvést, že experimentu se účastnili profesionálové napříč celým českým leteckým průmyslem, nejednalo se pouze o piloty hlavního národního dopravce, či akademiky.

Druhým způsobem, který se osvědčil, bylo oslovení leteckých škol komerčního charakteru. Školy mají zpravidla vlastní simulátor, který však není pohyblivý a už vůbec není tak specializovaný jako simulátor ULZ který byl k měření použit. Vzhledem k nízké úrovni takové simulátory byly prakticky nepoužitelné. Oslovené letecké školy však možnost účasti na experimentu rozšířily mezi své klienty a na dobrovolné bázi se piloti mohli přihlásit. Nutno zmínit, že mnoho těchto pilotů bylo aktivními studenty Fakulty dopravní ČVUT z oboru profesionální pilot, tudíž měli zájem participovat na experimentu prováděném pod záštitou domovské univerzity.

Pro získání co nejlepšího a nejrozmanitějšího vzorku pilotů byl nasdílen i příspěvek do několika relevantních skupin na sociálních sítích. Tato metoda však neměla téměř žádný dosah a neosvědčila se jako úspěšná, a to i navzdory faktu, že jednou ze skupin, kde došlo k nasdílení možnosti účasti na experimentu, byla skupina sdružující piloty, kteří absolvují či absolvovali zkoušku na UCL. Tato skupina čítá přes 1300 členů, inzerát však pozornost nepřitáhl a byl téměř bez reakce.

Nezanedbatelnou skupinou pilotů, které se povedlo k experimentu přilákat, byla skupina pilotů participujících v soukromých aeroklubech. Aeroklub tím, že je založen na dobrovolnické bázi, často sdružuje piloty s hlubokým zájmem o letectví, pro které tato zkušenost byla zajímavá. Navíc se



jedná o komunitní uskupení, ve kterém se informace šíří dobře a rychle. Oslovení aeroklubů se ukázala být jednou z nejvhodnějších metod pro získání respondentů pro výzkum.

Velkou limitací, která se projevila hlavně u první skupiny pilotů, kteří dokončili simulátorový výcvik, bylo roční období, ve kterém byl výzkum prováděn. IFR výcvik se nejčastěji zahajuje v části roku, kdy není možné létat tak frekventovaně VFR. To se právě negativně odrazilo i v průběhu hledání pilotů pro výzkum, kdy časová dostupnost pilotů první skupiny byla ovlivněna tím, jak byl zahajován IFR výcvik v návaznosti na vhodnou roční dobu.

Na druhou stranou výhodou bylo, že dezorientační simulátor a let na něm jsou zcela unikátní zkušenosti. Mnoho respondentů se povedlo získat skrze doporučení experiment již podstupivších pilotů. Díky této jedinečné příležitosti zažít let na dezorientačním simulátoru sami absolventi měření šířili možnost účasti i mezi své kolegy.

Výše zmíněnými metodami bylo pro výzkum získáno všech 114 pilotů.

Lety na simulátoru probíhaly poměrně dlouhou dobu. Jak již bylo výše popsáno, jednotlivá měření byla časově náročná, avšak díky ULZ bylo možné vyjít většině pilotům, zejména co se časových možností týče, vstříc. Možnost účasti na měření byla téměř každý den od brzkých ranních hodin až od odpoledních hodin. Simulátor byl pro potřeby ČVUT rezervován a jediným momentem, kdy měření nešlo provádět, bylo, když simulátor využíval ULZ pro výcvik vojenských pilotů či při jiných komerčních událostech ULZ. Na tomto místě je taktéž vhodné ocenit spolupráci s ULZ, která byla naprosto bezproblémová a všichni zaměstnanci, kteří se experimentu účastnili jako operátoři simulátoru, byli nesmírně vstřícní.

Krucialním prvkem plánování celého experimentu byla dobrá a transparentní komunikace. Jelikož byla nezbytná součinnost celého týmu lidí, byl pro tyto potřeby vytvořen sdílený online kalendář, díky kterému měli všichni participující přístup k aktuálnímu plánování časových slotů pro měření. Přístup do plánovacího kalendáře však nebyl umožněn pilotům. S piloty probíhala komunikace primárně telefonická. Taktéž byla všem pilotům odeslána zpráva s informacemi a instrukcemi pro let na simulátoru, ovšem jednalo se o informace pouze informačního charakteru. Podrobnější informace o průběhu letu a samotného měření obdrželi piloti až na místě. Den před měřením obdržel pilot zprávu, která připomínala pilotovu účast na měření. Kvůli vytíženosti některých pilotů bylo potřeba plánovat měření i několik týdnů dopředu a i tak došlo k několika změnám těsně před samotným měřením.

2.3 Provedení měření

Když došlo na samotné měření, piloti se dostavili do areálu Ústřední vojenské nemocnice, konkrétně do budovy simulační medicíny spadající pod ULZ. V rámci jednotlivých měření všech pilotů byl přesně vymezen letový profil určený na míru pro potřeby experimentu. Letové profily byly voleny s ohledem na IFR výcvik. Bylo nutné, aby přístrojový let zvládl jak zkušený pilot, tak pilot, který čerstvě dokončil pouze simulátorový výcvik. Jednalo se tedy o profil se zcela konvenčními a nezákeřnými prvky radionavigace. Cílem nebylo ověřovat schopnosti pilotů z postupů letu IFR, experiment byl zaměřen pouze na vestibulární iluze a na reakce s nimi spjaté. Profily byly situovány na letišti PHNL Honolulu, Havaj jehož VFR chart je zobrazen na obrázku 2.1, tato mapa byla vybrána pro dokreslení situačního povědomí v okolí letiště. V rámci experimentu byly nastaveny dva profily a let byl proveden bez okolního provozu. Před zahájením měření měl každý pilot provést seznamovací let o délce 30 minut. Během tohoto letu si pilot vyzkoušel základní letové charakteristiky, vlet i přistání. Samotné měření bylo unikátní tím, že kromě dat generovaných ze samotného simulátoru byl pokus doplněn o monitorování psychofyziologického stavu pilota, měření posturální stability a následně strukturovaného dotazníku.



Obrázek 2.1: VFR Chart PHNL [21]



2.4 Letové profily experimentu

První scénář letového simulátoru začínal rozjezdem a vzletem z dráhy 08R. V průběhu rozletu došlo k simulaci somatogravické iluze. Následně po úspěšném vzletu bylo úkolem pilotů vystoupat do výšky 1500 stop a zahájit zatáčku na kurz 160. Jakmile bylo tohoto kurzu dosaženo, byli účastníci dále instruováni ke kontinuálnímu stoupání, kde obdrželi pokyn ke změně letového kurzu. V průběhu této změny směru byla navozena Coriolisova iluze.

Následující fází byl let přímo k VOR HNL. Po dosažení VOR HNL následoval pokyn ke změně kurzu na 250 a k následnému sestupu. Po dosažení této výšky byla oznámena instrukce k levé zatáčce na kurz 045, kde byla indukována somatogyrová iluze. Další instrukce vedla piloty k sestupu pod úroveň oblačnosti až na výšku 800 stop. Pilot následně proklesal oblačnost a vizuálně dokončil let přistáním na dráhu. Tento letový profil byl každým pilotem absolvován dvakrát. Poprvé bez navození iluzí a podruhé s nimi, přičemž mezi oběma lety byla pouze malá prodleva v řádu minut, pro účely doplňkového měření a přípravy simulátoru pro další let. Během experimentu byl kromě pilota respondenta přítomen zástupce Katedry letecké dopravy se znalostí práce s měřicími zařízeními a zástupce ULZ, který byl zodpovědný za provoz simulátoru. Díky své zkušenosti s řízením letů na simulátoru suploval zástupce ULZ službu řízení letového provozu a vydával pokyny, na které piloti odpovídali a následně se jimi řídili.

Druhý letový profil začíná odlišně, a to startem z dráhy 04R, během kterého byla opět implementována somatogravická iluze. Pilot následně stoupal a ještě před dosažením cílové výšky byl instruován k levotočivé zatáčce a pokračování ve stoupání do výšky 2000 stop. Po dosažení této výšky měl účastník provést pravou zatáčku v průběhu které došlo k navození Coriolisovy iluze. Následovala instrukce pokračovat v přímém letu na VOR HNL. Po přeletu VOR HNL pilot zahájil sestup a začal točit doleva na kurz 110, následně byl převeden pravou zatáčkou na kurz 315. Během zatáčky byla implementována somatogyrová iluze. Dalším krokem pilot sestoupil pod oblačnost do výšky 800 stop. Tento profil byl účastníkem letěn dvakrát za sebou bez prodlevy či odkladu, přičemž první let proběhl bez indukovaných iluzí a druhý s iluzemi. Před samotným letovým profilem účastník opět absolvoval volný let. Ve srovnání s předchozím profilem byla doba trvání volného letu zkrácena na 10 minut s ohledem na předchozí zkušenosti.



2.4.1 První letový profil

První měřený let, který pilot provede na simulátoru, je let naplánovaný podle prvního profilu, avšak bez implementovaných iluzí. Jedná se pouze o let podle přístrojů po předem naplánované trati za předem definovaných podmínek.

První letový profil začíná verbální confirmací o připravenosti pilota. Pilot operátorovi potvrdí připravenost k letu a sám letový profil spustí stisknutím tlačítka v kokpitu simulátoru. Letadlo je spolu s pilotem umístěno na prahu dráhy 08, není tedy potřeba spojení se službou ground či jakéhokoli pojiždění. Pilot obdrží informaci, že dráha 08R je pro vzlet volná, a instrukce po vzletu je pokračovat v ose dráhy do výšky 1500 stop. Po prostoupaní 1450 stop obdržel pilot instrukci k navození pravé zatáčky na kurz 160. Další instrukcí, která je předána pilotovi, je pokyn stoupat do výšky 2000 stop. V momentě prostoupaní výšky 1950 stop se pilot dostane do pokrytí oblačnosti 8/8 se základnou oblačnosti ve výšce 1000 stop dosahující do výšky 4000 stop. Instrukcí, kterou pilot obdržel jako další, byl příkaz točit levou zatáčkou na kurz 270. Po dotočení této zatáčky má pilot dle pokynu točit přímo na kurz HNL VOR. Pilot pokračuje v letu na HNL VOR a v momentě, kdy se dostane do vzdálenosti menší než 2 NM, sdělí mu řídicí pokyn k levé zatáčce na kurz 250, kterou má zahájit po přeletu HNL VOR, který je pro lepší pochopení obrázen na obrázku 2.2. Následně pilot obdrží informaci o sestupu do 1500 stop a v momentě, kdy přeletí letoun konkrétní zeměpisnou délku $-158^{\circ} 1' 48.00''$, je pilot instruován k levé zatáčce na kurz 045. Pilot tak provede levotočivou zatáčku a jakmile letoun protne azimut 60 stupňů, řídicí povolí klesání do výšky 800 stop. Poslední informací, kterou pilot obdrží po protnutí zeměpisné šířky $21^{\circ} 17' 57.00''$, je pokyn točit do kurzu 080 pravou zatáčkou. Ve stejné zprávě pilot obdrží confirmaci k povolení přistání na dráze 08R. Následně pilot přistane na dráze a po úspěšném zastavení letounu je profil ukončen. Opět jako při vzletu není potřeba s letadlem pojiždět na stojánku, provádět úkony po přistání či vypínat motor.

Druhý let, který pilot na simulátoru provede, je opět první letový profil, ovšem nyní již s implementací postupně tří rozdílných vestibulárních iluzí. Tento navazující let je opět připraven a letěn po předem definované trati a za předem definovaných podmínek. První iluze, která byla během druhého letu s užitím prvního profilu navozena, byla iluze somatogravická, druhou iluzí byla iluze Coriolisova a následně poslední iluzí, která byla vložena do letového profilu, byla iluze somatogyrová. Pro potřeby této práce došlo ke zaměření a následnému vyhodnocování první



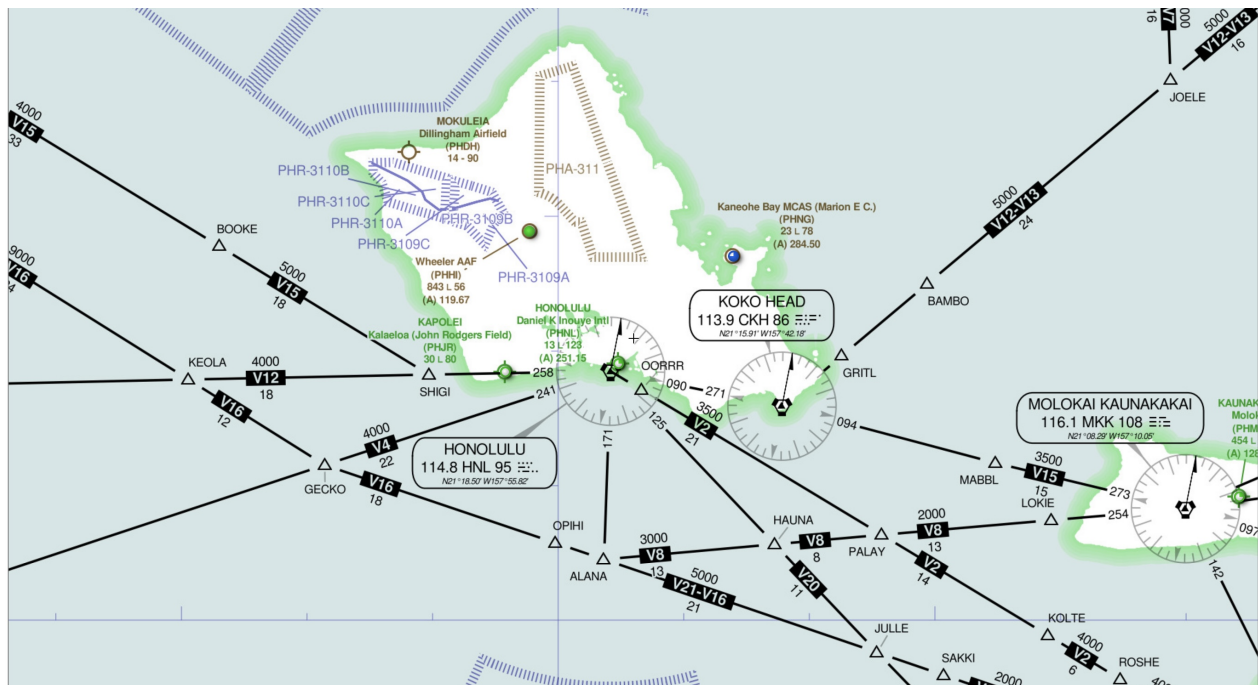
zmíněné somatogravické iluze, která v tomto experimentu byla navozena hned po vzletu. Pro zjištění odolnosti vůči somatogravické iluzi, což byl hlavní cíl experimentu, nebylo nutné přikládat důraz ostatním dvěma iluzím, které během obou profilů byly navozeny.

2.4.2 Druhý letový profil

Druhý letový profil byl, stejně jako první, přesně definován. Pilotovým úkolem bylo zaletět předem naplánovanou trať dle instrukcí simulovaného řídicího provozu. Piloti byli k letu druhého letového profilu přizváni s týdenní prodlevou od měření prvního. Až na výjimky byl tento interval dodržen.

Druhý profil začíná stejně jako první; letoun je již na prahu dráhy a po souhlasu se zahájením simulovaného letu mezi pilotem a operátorem simulátoru sám pilot simulaci následně spustí. První informací, kterou pilot po spuštění simulace obdrží, je povolení ke vzletu, tentokrát z dráhy 04R, s přidruženou instrukcí stoupat po vzletu v ose dráhy do výšky 1500 ft. Když letadlo během stoupaní přeletí zeměpisnou šířku $21^{\circ} 19' 50.00''$, předá operátor simulátoru, suplující řízení letového provozu, pilotovi další instrukci, konkrétně instrukci točit levou zatáčkou na kurz 300 a pokračovat ve stoupaní do výšky 2000 stop. U druhého profilu je také pokrytí oblačnosti 8/8 se základnou oblačnosti ve výšce 1000 stop, která dosahuje stejného rozsahu jako oblačnost v prvním letovém profilu. Když pilot nastoupá do výšky vyšší než 1950 stop a zároveň je na zeměpisné délce nižší než $-157^{\circ} 56' 60.00''$, obdrží informaci o provedení pravé zatáčky na kurz 190, ve kterém následně v letu pokračuje po dobu přibližně sto sekund. Následně je pilot instruován k pokračování letu přímo na HNL VOR, který je zobrazen v mapce na obrázku 2.2. Pilotovi přibližujícímu se k HNL VOR, je při protnutí vzdálenosti 2 NM vyslána instrukce, aby po přeletu HNL VOR točil levou zatáčkou na kurz 110. V průběhu zatáčky obdrží pilot povolení ke klesání do výšky 1500 stop. V klesání pokračuje, dokud nedosáhne zeměpisné délky větší než $-157^{\circ} 56' 60.00''$. V tento moment je pilot instruován provést pravou zatáčku na kurz 315. Jelikož se pilot v tuto chvíli nachází již poměrně blízko letiště, obdrží v další zprávě pokyn ke klesání do 800 stop a následně při přeletu zeměpisné šířky $21^{\circ} 17' 57.00''$ obdrží pilot povolení k přistání, kterému předchází ještě pokyn pro levou zatáčku na kurz 260. Konečné přiblížení a přistání u druhého profilu je provedeno na dráze 26R.

Druhý letový profil, který piloti letěli, byl opět použit dvakrát, nejprve bez implementovaných iluzí a následně při opakovaném letu s aplikovanými iluzemi. V druhém letu tohoto letového profilu



Obrázek 2.2: IFR Chart PHNL [21]

byly iluze aplikované ve stejném pořadí jako u prvního profilu. Začínalo se somatogravickou iluzí hned po vzletu, na kterou navazovala iluze Coriolisova a v neposlední řadě došlo k navození iluze somatogyrové.

2.5 Navození iluze

První iluzí kterou mohl pilot při obou letových profilech pocítit byla iluze somatogravická. V kontextu této práce se jednalo o nejdůležitější část letu s navozením té nejdůležitější iluze. Tato iluze byla navozena hned po vzletu. Vzlet měl drobné specifikace oproti vzletu v reálném letounu z lín Z142. Hlavním rozdílem bylo vynechání standartních úkonů Samotné navození iluze probíhalo následovně, pilot se rozjede po dráze a po odlepení a rozletu dojde k navození iluze. Zahájení iluze bylo naprogramováno při stoupání letounu pod úhlem $+5^\circ$. Následně došlo k náklonu simulátoru o dalších $+12^\circ$, což navodilo pilotovi požadovanou iluzi. Pro dosažení iluze se simulátor pohyboval úhlovým zrychlením $1,3 \text{ %s}^2$ a zároveň s maximální rotační rychlostí 4 %s^2 . Po navození iluze byl simulátor opět vrácen do polohy $+0^\circ$, jednalo se tedy o návrat do původní trajektorie. K tomuto návratu došlo rychlostí $0,3 \text{ %s}$ úhlového zpomalení v kombinaci s rotační



rychlostí $1 \text{ } \%/s^2$. Navození této iluze bylo okamžité a záhy odeznělo. Z následného dotazníkového řízení nevyplývalo, že by někteří piloti pociťovali nevolnost během navozování této iluze. Během letového profilu docházelo k navození dvou dalších iluzí, které byly vhodně implementovány do letového profilu. První další iluzí byla iluze coriolisova, která byla navozena v obou případech při točení do kurzu přes odlehlou stranu. Jednalo se tedy v obou případech o zatáčku přes 180° . Tato iluze byla navozována v obou letových profilech s jediným rozdílem, že ve druhém letovém profilu byla iluze navozována v pravotočivé zatáčce, narozdíl od levotočivé z prvního profilu. Opět tedy došlo k otočení hlavy ve směru rotace. Druhou další navozovanou iluzí byla iluze somatogyrální, tato iluze byla opět navozována v zatáčce a stejně jako u Coriolisovy iluze se jednalo o zatáčky přesahující 180° . Kritickým faktorem pro navození této iluze je postupné zrychlení simulátoru okolo své osy prostřednictvím rotačního pohybu tak, aby dosáhl vysoké rotační rychlosti. Spuštění rotace simulátoru bylo shodné s momentem, kdy se letadlo usadilo do stabilní zatáčky a simulátor udržoval rotační rychlost $60 \%/s$, dokud manévř nebyl dokončen, tj. dokud letadlo nezačalo zarovnávat se zamýšleným kurzem. Jemné počáteční zrychlení a konzistentní rotační rychlost hrají klíčovou roli v rychlé stabilizaci tekutiny uvnitř polokruhových kanálků vestibulárního aparátu. V důsledku této změny došlo u pilotů k vyvolání somatogyrální iluze.

Jak již bylo zmíněno, tato práce se zabývá primárně somatogravickou iluzí a odolností vůči ní, dvě další iluze jsou zde zmíněny pouze pro dobarvení celého experimentu, ze kterého byly čerpány podklady pro tuto diplomovou práci. Veškerý další výzkum je proto soustředěn výhradně na iluzi somatogravickou.

2.6 Měření fyziologických aktivit

Fyziologická data byla další možností jak zaznamenat informace o průběhu letu.

Mezi zaznamenávané fyziologické aktivity patřila kardiální aktivita. Tato aktivita byla měřena prostřednictvím dvou datových setů. Prvním byla informace o tepové frekvenci pilota v čase a druhým datovým setem byl elektrokardiogram, který zaznamenával změnu elektrického potenciálu v důsledku srdeční aktivity. Toto měření je zcela neinvazivní a provádělo se díky elektrodám umístěným na těle respondenta. Kvůli kompaktním rozměrům měřicího přístroje pro EKG však docházelo k ovlivňování měření během pohybu pilota. Neovlivněná data byla pouze ta, při jejichž



měření byl pilot v klidu, například při letu v simulátoru nebo v klidovém stavu před letem na simulátoru. Ostatní měření byla nadměrně ovlivněna pohybem pilota a tudíž nepoužitelná.

Další přidruženou skupinou dat, která byla do výzkumu zařazena, byla data z měření mozkové aktivity neboly EEG. Tato data byla měřena pomocí speciální kukly, která disponovala měřicími sondami. Měření mozkové aktivity bylo provázeno velkým množstvím komplikací. Měření bylo negativně ovlivňováno jak pohybem při každém měření, tak vibracemi. Kvůli těmto komplikacím došlo k přerušení měření EEG u pilotů.

Mezi lety byla u pilotů provedena stabilometrie, u které bylo cílem ověřit vliv vystavení vestibulárního systému iluzi. Toto měření však nebylo relevantní vzhledem k cíli této práce.

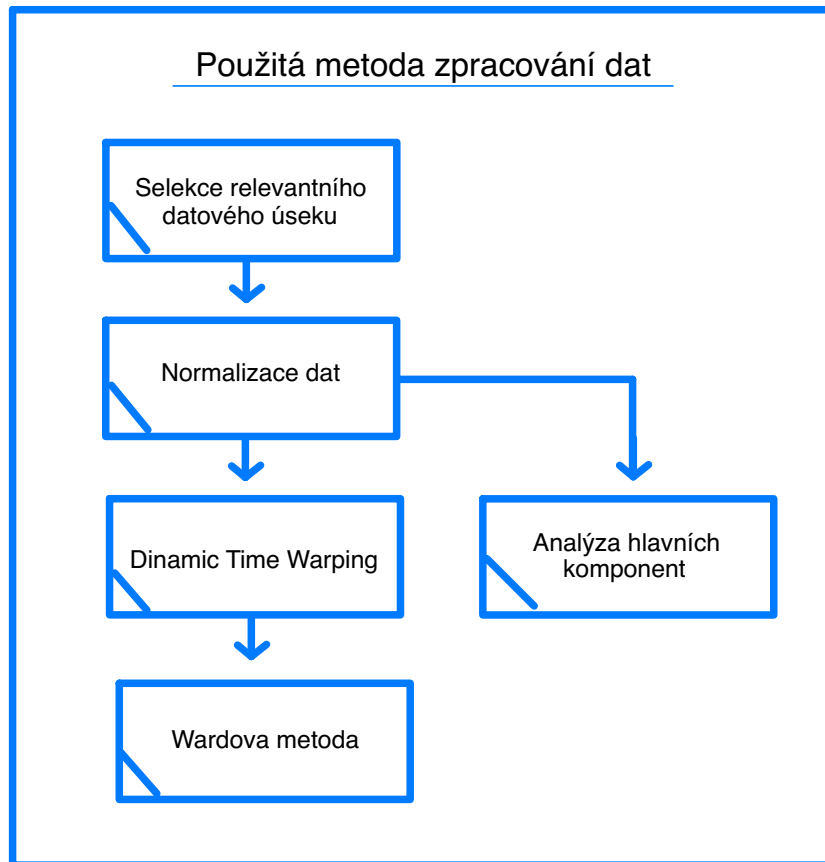
Poslední zaznamenávací metodou byl motion tracking, kdy během měření bylo na tělo pilota umístěno 7 senzorů. Při ověření funkčního spojení bylo zjištěno že přenos není dokonalý ani ve chvílích kdy je senzor umístěn v klidovém stavu přímo vedle řídicí jednotky, navíc pro potřeby této diplomové práce byl dostatečný datový výnos ze simulátoru, který sám zaznamenal výchylku řídicí páky.

Nejen dvě další navozené iluze ale i měření fyziologických aktivit nebylo použito pro zpracování dat v této práci. Primární soustředění této práce je na somatogravickou iluzi a odolnosti vůči ní, proto jsou tu měření fyziologických aktivit zmíněny pouze pro dobarvení celého experimentu.

2.7 Zpracování dat

Během projektu se povedlo nasbírat velký objem dat, které bylo nutné následně zpracovat. Blokované schéma zpracování je vyobrazeno na obrázku 2.3. S přihlédnutím k finálnímu počtu participantů, přesahující sto osob, a znásobením celkovým počtem letů vychází velkoobjemové datasey. U každého pilota došlo celkově k vytvoření čtyř měření ve shodném počtu dvou měření pro každý profil. Data jsou u každého profilu vytvořena pro let bez iluze a zároveň i pro let s iluzí. Simulátor dokázal zaznamenat širokou škálu informací podstatných pro řešení této práce a získání informací o probíhajícím letu. Mezi simulátorem získané informace lze zařadit reálné polohy v čase, včetně úhlů náklonu, klopení či bočení, ale i zeměpisné souřadnice, díky čemuž bylo možné využívat určitou zeměpisnou šířku jako referenční pro scénář jednotlivých profilů viz kapitoly 2.4.1 a 2.4.2. Simulátor byl navíc schopen přenášet informace o tahu motoru v podobě výkonostních charakteristik a navigačních informací. Tyto informace byly zaznamenávány

se vzorkovací frekvencí 125 Hz a některé byly v reálném čase přeneseny na stanoviště operátora simulátoru, jenž díky nim mohl provést pilota konkrétním profilem.

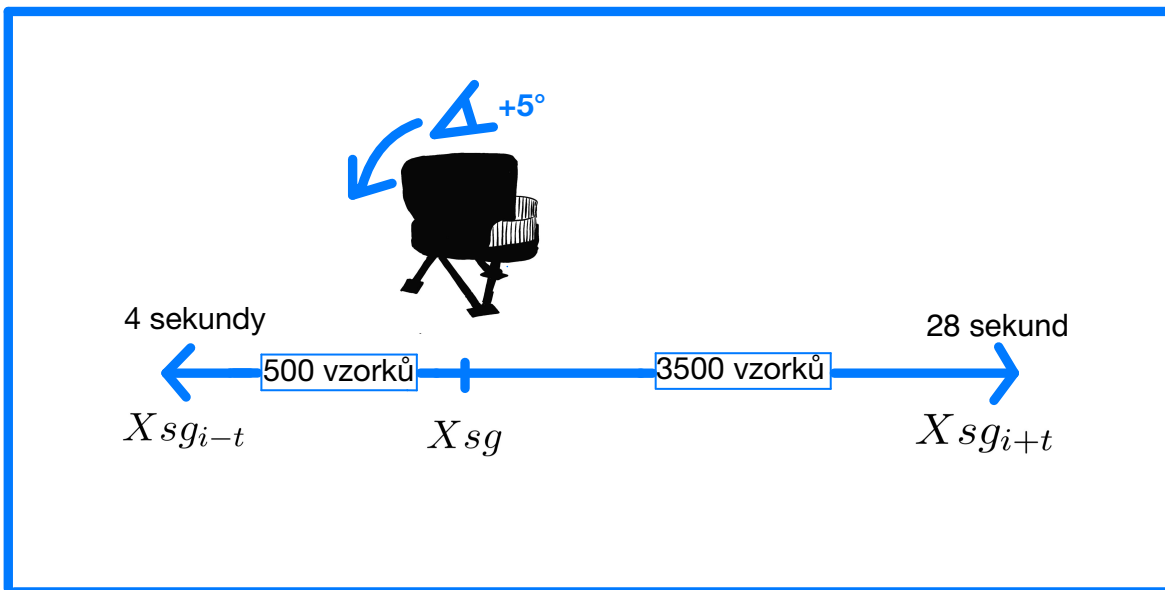


Obrázek 2.3: Použitá metoda zpracování dat

Při sběru dat bylo nejdůležitější prvotní zpracování dat. Následně došlo k izolaci exaktních dat pro potřeby této diplomové práce. Během tohoto kroku bylo nutné data pečlivě roztřídit a definovat pouze ta data, která měla relevantní vztah k navození somatogravické iluze. Data se zároveň rozlišovala podle profilu a faktu, zda se jednalo o let s iluzí či bez iluze. Pro specifický pohled na somatogravickou iluzi bylo potřeba zpracovat data části letu s iluzí, v podobě datového segmentu s ohledem na konkrétní část letu. Tyto segmentace bylo nutné vytvořit v závislosti na části letu, ve které došlo k navození. Pro zkoumání somatogravické iluze byl zvolen bod, ve kterém došlo k náklonu simulátoru o 5 stupňů, následně se od tohoto bodu vytvořil časový výsek na obě

strany časové osy. Poté bylo možné data sesynchronizovat a porovnat. Tato prvotní synchronizace byla v kontextu celé práce nezbytná.

Kromě této metody bylo možné k segmentaci použít i jiná data, například čas od jednotlivých bodů, dosažení určité zeměpisné šířky nebo délky, případně i vztah k nějakému radionavigačnímu majáku, či například dosažení konkrétního výkonu a letových parametrů, tato data se však neukázala jako vhodná pro zkoumání somatogravické iluze, z důvodu velké variability. Pro výzkum somatogravické iluze a práce s daty ohledně této konkrétní události byl tedy definován přesný bod letu, ve kterém došlo k náklonu o zmíněných 5 stupňů. Definice tohoto bodu byla podstatná, jelikož k navození iluze mohlo dojít i v jiných časech simulace v závislosti na letových parametrech. Pilot, který provedl vzlet s pozvolnějším přidáním plynu, pocítil navození později, než pilot, který akceleroval rychleji. Tento rozdíl se tedy povedlo potlačit a zároveň sesynchronizovat lety jednotlivých pilotů pro pozdější úpravu a přezkoumání. Pokud je začátek iluze na časové ose definován jako bod Xsg_i , tak datový set bude z období od Xsg_{i-t} do bodu Xsg_{i+t} . Ve skutečnosti se jedná o časový úsek 4 sekund před a 28 sekund po bodu navození iluze. Tato časová osa je popsána v obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Časová osa vzorkování



Díky definovaným časovým úsekům bylo možné odvodit i ostatní údaje ze simulátoru, dále bylo možné přiřadit jak data letová, tak data výkonová. Díky spárování času navození iluzí se všemi daty, bylo možné analyzovat vliv iluze na pilota a jeho reakce.

Při přípravě dat naměřených v době navození somatogravické iluze, a to hlavně dat výšky, úhlu klonění, klopení a bočení z přesné části letového profilu v dezorientačním simulátoru, bylo hlavním cílem vytvoření normalizace dat. Díky tomuto postupu bylo možné učinit spravedlivé srovnání mezi různorodými piloty. Řešením bylo zmírnění rozdílu v absolutních hodnotách jednotlivých datasetů. Pro zvýšení přesnosti všech dat bylo zapotřebí před další analýzou odstranit veškeré naměřené záznamy s chybějícími hodnotami. Tyto chyby se mohly objevit v důsledku chybějícího měření pro danou část profilu.

Pro normalizaci měření byla využita normalizace L2, díky které došlo ke škálování dat tak, že součet čtverců hodnot v každé časové řadě byl roven 1. Normalizace začínala vydělením každého prvku vektoru jeho L2 normou. L2 norma vektoru je definována jako druhá odmocnina součtu čtverců jeho prvků. Díky volbě této normalizace bylo možné přímé srovnání dat od různých pilotů a zároveň porovnání mezi všemi měřenými sekvencemi odpovídajících somatogravické iluzi.

Dalším krokem, který byl po normalizaci dat proveden, bylo použití Dynamic Time Warping (DTW) pro vyhodnocení podobností, jež by jednotlivé letové profily mohly skýtat, a to bez ohledu na pilota, který daný profil zaleťel. Ke zvolení DTW došlo hlavně díky vhodnosti metody pro zpracovávání časových sekvencí, a to i s případnou odlišností v podobě rozdílných letových výkonů, tudíž i odlišné rychlosti a odlišného pohybu v čase simulace [22]. Díky této metodě bylo možné vytvořit vzdálenostní matice, které zahrnují párové DTW vzdálenosti mezi časovými řadami jednotlivých pilotů. Výsledkem metody je přehled o tom, jak jsou si dvě časové řady podobné, a umožňuje jejich efektivní porovnání, i přes skutečnost, že mají různé délky nebo jsou zaznamenány v různém tempu.

Po výpočtu DTW vzdáleností byla aplikovaná metoda hierarchického shlukování pomocí Wardovy metody. Takovéto shlukování si lze představit jako statistickou metodu, která byla použita ke generaci skupin objektů. Výše zmíněné skupiny byly klastrovány do shluků na základě jejich podobnosti. V těchto jednotlivých shlucích jsou objekty definovány jako datový bod nebo skupina datových bodů. Wardova metoda je zvláště účinná pro analýzu a pochopení struktury dat, umožňuje správnou identifikaci homogenních skupin v datech a přispívá k hlubšímu porozumění vzorců a vztahů v různých datových sadách [23]. Uvedená metoda spočívá v definici datových řad,

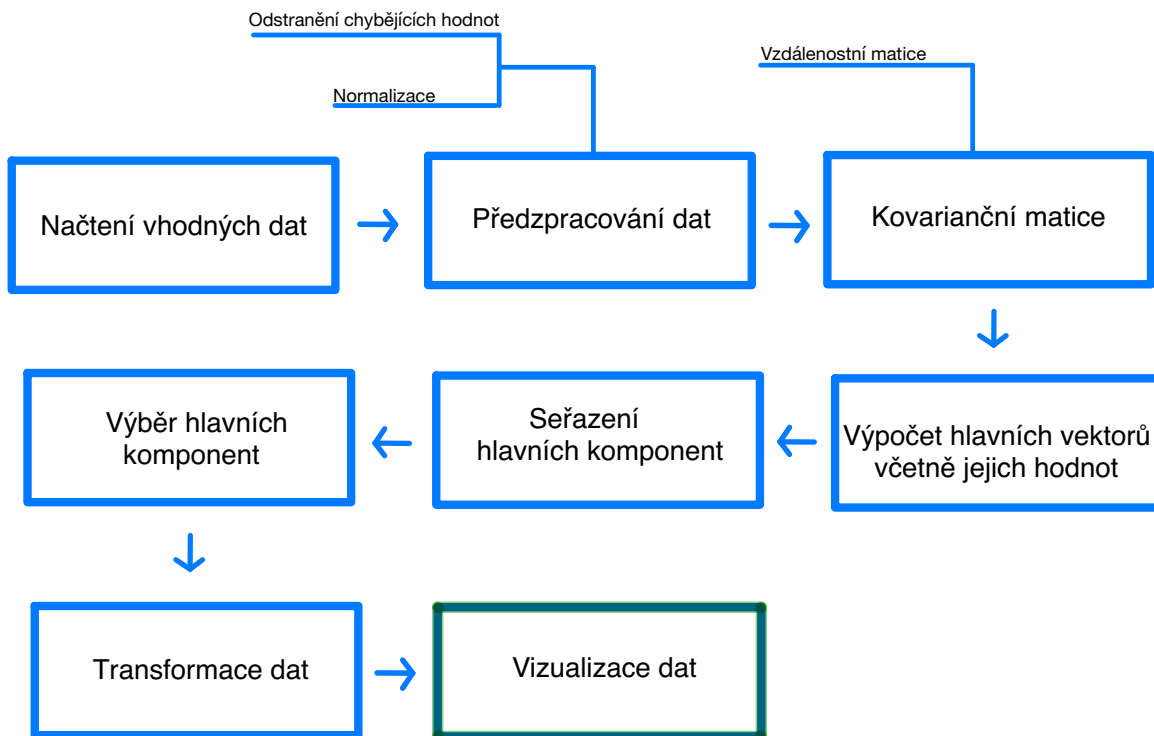


například nadmořské výšky, kterou jde považovat za samostatný shluk. V každém kroku algoritmu je kombinován pár shluků, který vede k minimálnímu nárůstu celkové vnitroshlukové variance po sloučení. Tímto postupem dochází k postupnému sloučení shluků. Každý krok sníží celkový počet shluků a metoda se ukončí při splynutí do jediného koncového shluku nebo při dosažení cílového počtu shluků. Podstatnou snahou Wardovy metody je minimalizovat vnitroshlukový rozptyl. Pro zabezpečení co nejmenší variance dochází k výpočtu pomocí čtvercové Euklidovské vzdálenosti mezi shluky.

K prezentaci datových shluků lze použít několik různých metod a vizualizačních technik. Každá z metod má své výhody a je vhodná pro různé typy dat a analýz. Pro potřeby dat vázaných na navození somatogravické iluze bylo využito prezentace pomocí dendrogramu. Dendrogram je efektivní pro vysvětlení a vizualizaci sortace a následného sloučení a může nám poskytnout komplexní pohled na hierarchické vztahy mezi shluky. Proto byl použit pro potřeby této diplomové práce jako nástroj výsledné analýzy výsledků shlukování.

Kromě hierarchického shlukování byla pro potřeby této práce využita také analýza hlavních komponent (PCA). Tato statistická metoda, principiálně vyobrazena na obrázku 2.5 byla použita ke snížení dimenzionality datové sady, klade však důraz na zachování co největší variability [24]. Metoda (PCA) pomohla určit, zda pozorované letové parametry tvoří charakteristické shluky odpovídající části profilu s navozením somatogravické iluze nebo spíše části profilu bez jejího navození. Toho bylo dosaženo transformací původních proměnných do nové sady proměnných, hlavních komponent, které jsou na sebe kolmé a zachycují maximální rozptyl v datech. Tato metoda dovoluje širší pochopení struktury dat a vhodně identifikuje klíčové proměnné, jež tvoří rozdíly mezi lety s navozenou somatogravickou iluzí a lety bez navozené iluze. V podstatě se tato metoda dá považovat za doplňkovou analýzu k již zmíněnému hierarchickému shlukování.

Kromě dat naměřených během experimentu bylo nutné zpracovat i data z dotazníkového řízení v podobě subjektivního hodnocení navození somatogravické iluze. Piloti měli za úkol ohodnotit navozenou iluzi pomocí dotazníku, jehož účelem bylo zjistit, jak hodnotí iluzi na stupnici od 0 do 10. Toto škálování se pro potřeby zpracování dále dělilo na podkategorie. Celkově bylo definováno 5 skupin, do nichž se data rozdělila. První kategorií byla možnost, že pilot iluzi necítil vůbec, tudíž hodnotil čísla od nuly do dvou. Pokud pilot navozenou iluzi zaznamenal, ale jen lehce, šlo očekávat udělení známky v rozsahu od tří do čtyř, tato škála byla označena číslem dva. Třetí střední intenzita iluze byla hodnocena piloty v podobě stupně pět nebo šest. Pro pozdější zpracování tato skupina

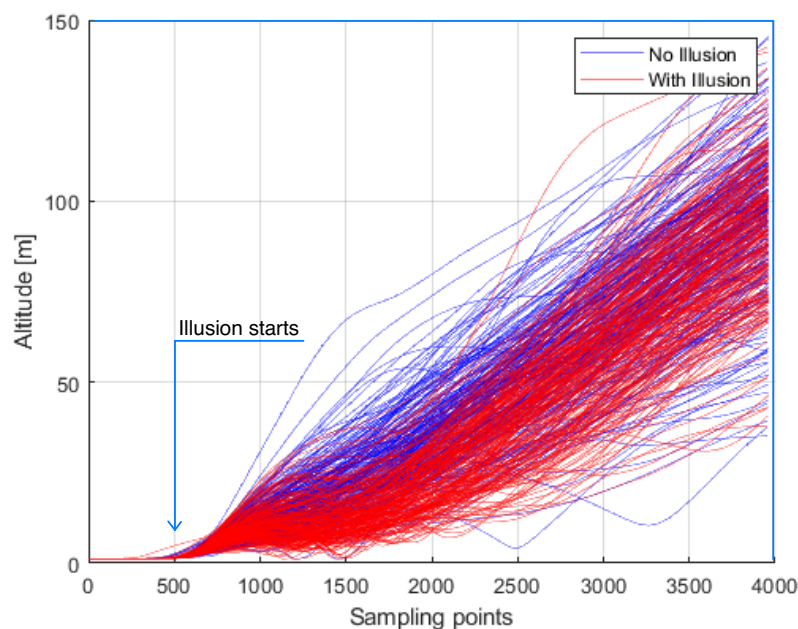


Obrázek 2.5: Schéma metody PCA

nesla označení s číslem tři. Pokud pilot působení iluze považoval za silné, mohl ohodnotit vnímání iluze známkou sedm nebo osm, tato intenzita byla pro pozdější zpracování označena číslem čtyři. Poslední nejsilnější kategorii, která při zpracování dat nesla číslo pět, bylo vnímání iluze ohodnocené čísly devět a deset, kdy se jednalo opravdu o nejintenzivnější vjemový prožitek. Došlo tedy k pomyslné normalizaci dat pro potřeby dalšího zpracování. Následně byla data vložena do reprezentativních grafů a porovnána. Kromě subjektivního vnímání iluze byla součástí dotazníku i otázka, zda pilot pociťuje zlepšení oproti prvnímu měření a zda by byl pro implementaci letu na dezorientačním simulátoru do konvenčního výcviku.

3 Prezentace výsledků

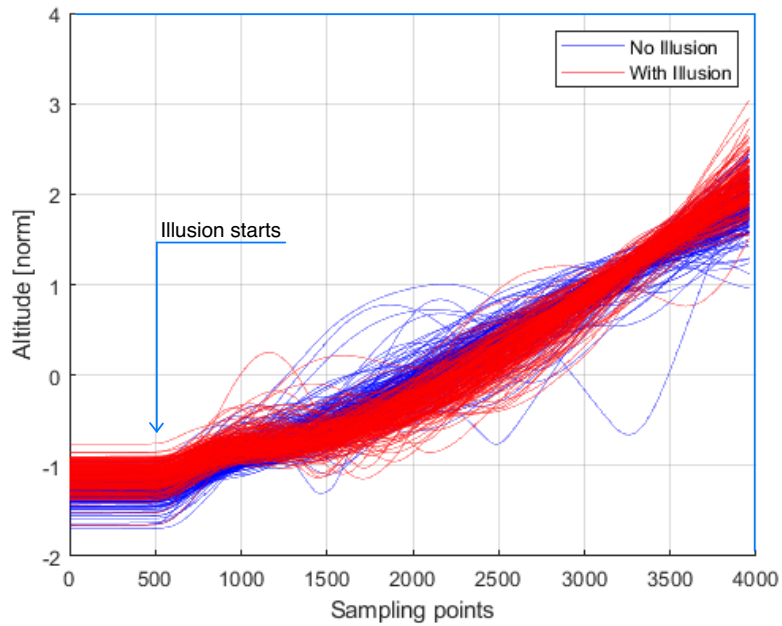
Za účelem zjištění, zda by hodinový let na dezorientačním simulátoru mohl zlepšit odolnost vůči somatogravické iluzi, byla zvolena akcentace dvou parametrů. Konkrétněji se jednalo o polohovou informaci v podobě výšky a o informaci generovanou samotným simulátorem, tedy o úhel výchylky řídicí páky. Z pohledu somatogravické iluze se jedná o dva nejdůležitější parametry, jelikož dokáží odhalit objektivní reakci na navozenou iluzi pilota, a tedy efekt, který je následkem vestibulární dysbalance.



Obrázek 3.1: Data obou letových profilů

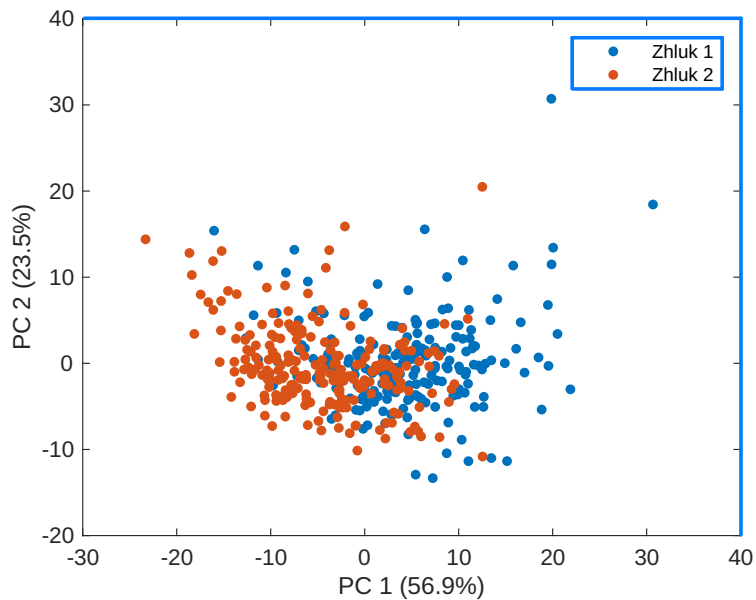
Pro potřeby zpracování somatogravické iluze a jejího vlivu na pilota byla provedena analýza hlavních komponent (PCA). Tato analýza probíhala na normalizovaných datech, tak jak je zmíněno v kapitole 2.7 Zpracování dat. Na obrázku 3.1 je možné vidět data z obou letových profilů před normalizací, zatímco na obrázku 3.2 jsou vyobrazena data po provedené normalizaci. Na vyobrazených datech je zdůrazněný bod počáteční fáze navození iluze.

Rozdělení pravděpodobnosti, neboli variabilita, byla zpracována pro komponenty v podobě charakterizace výšky za předpokladu pilotáže odlišnými piloty. Toto zpracování pro oba letové profily je graficky znázorněno na obrázku 3.3. Hlavní komponent 1 zobrazuje přibližně 56,9 % variability a Hlavní komponent 2 zobrazuje dalších 23,5 % variability. Dohromady první dva hlavní



Obrázek 3.2: Normalizovaná data obou profilů

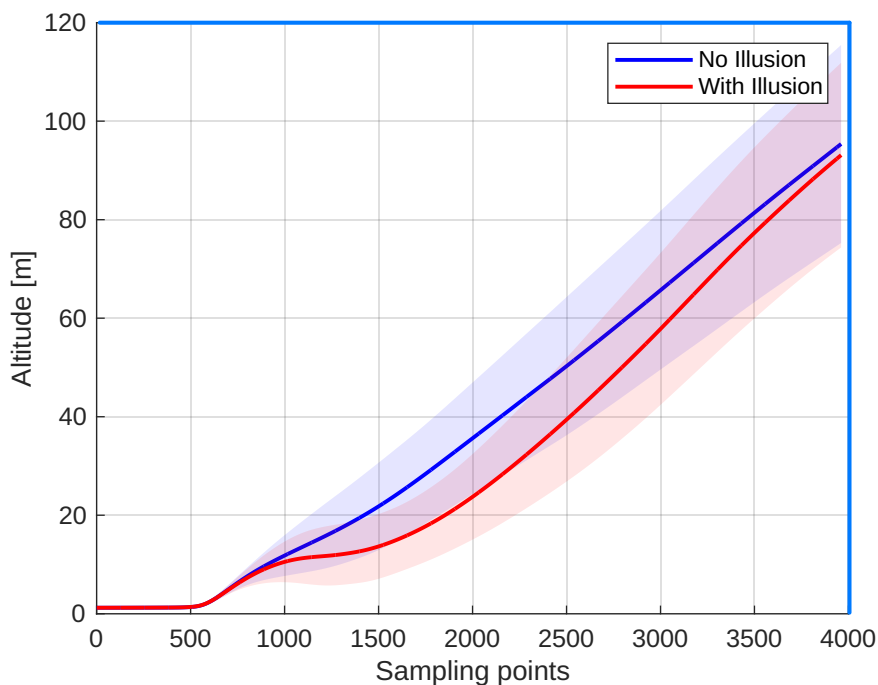
komponenty vysvětlují asi 84,17 % celkové variability v normalizovaných časových řadách dat o výšce.



Obrázek 3.3: Globální Principal Component Analysis

Výslednou variabilitu, která vyšla u těchto komponent, lze vnímat jako důkaz o adekvátní reprezentaci informací. Právě díky těmto komponentám je možné popsat a pozorovat odlišnosti v jednotlivých vzletových trajektoriích v průběhu, pro tuto práci nejdůležitějších, fázích celého profilu. Dále bylo možné složitá více dimenzionální data převést do dvourozměrné podoby, která se dala následně vhodně porovnat a vyhodnotit. Díky této snížené dimenzionalitě lze rozlišit lety, během kterých byla iluze navozena a během kterých nikoli.

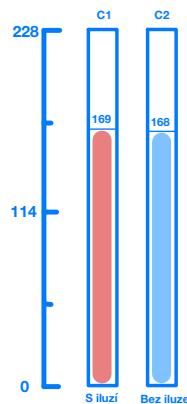
Během zpracování dat bylo prokázáno, jaká část vzorku nejvíce ovlivňuje tvorbu samotných shluků. Bylo prokázáno, že k největšímu ovlivnění dochází v rozmezí od 1500 do 2000 vzorků. Na základě těchto hodnot došlo k ovlivnění komponenty PC1, která definovala osu, podle které byla data shlukována.



Obrázek 3.4: Zprůměrovaná celková letová data

Vliv iluze je možné ověřit i pohledem na obrázek 3.4, na kterém je zobrazený graf závislosti výškových trajektorií během prováděného vzletu. Na obrázku je vidět jasný rozdíl mezi trajektorií letu, během kterého iluze byla navozena, a mezi trajektorií standardní - bez navozené iluze. Porovnání obou zprůměrovaných křivek v grafu v obrázku 3.4 navíc zřetelně reprezentuje ztrátu výšky, která v důsledku navození iluze nastala. Jedná se o očekávanou reakci, jež dokazuje

úspěšnost navození somatogravické iluze během letového profilu. Rozdíl je patrný hlavně při porovnání s trajektorií grafu letu, během kterého nebyla navozena iluze, takový graf je v podstatě lineární, bez větších zásahů do řízení.

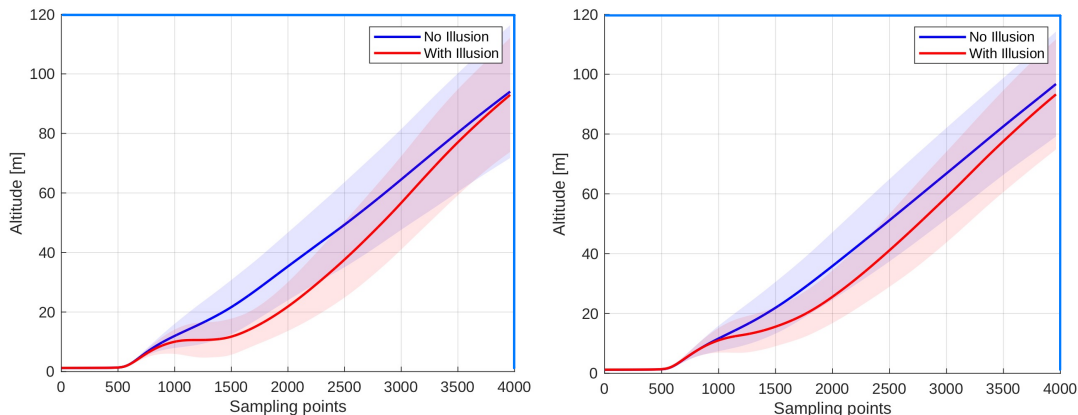


Obrázek 3.5: Cluster obou letových profilů

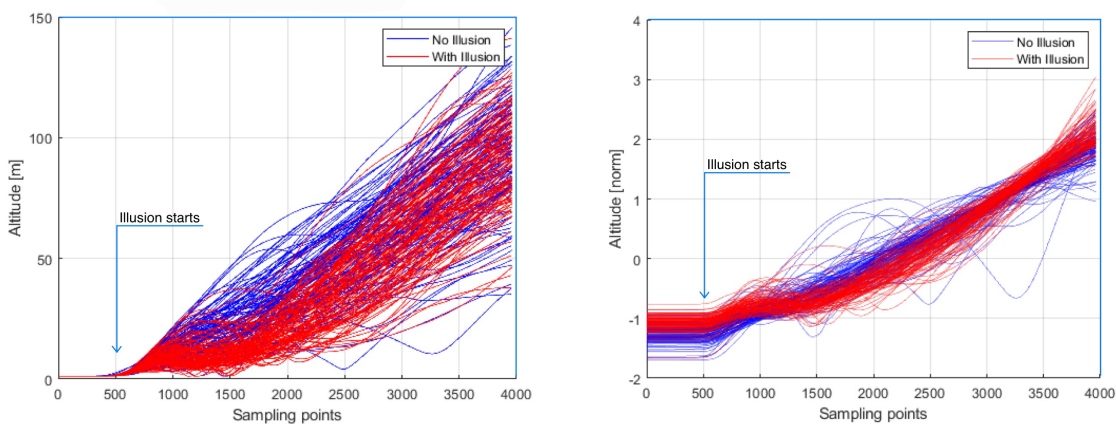
Aby bylo možné hodnocení efektu somatogravické iluze zpřesnit, byla použita metoda DTW Dynamic Time Warping, po které následovala klasifikace pomocí hierarchického shlukování. Zkoumání efektu iluze na daném vzorku pilotů pomocí této metody prokázalo, že 169 případů ze 228 bylo správně klasifikováno jako vzlety ovlivněné iluzí a 168 případů ze 228 bylo klasifikováno jako vzlety neovlivněné iluzí. Jedná se tedy o další jasný důkaz ovlivnění trajektorie letu v důsledku navození somatogravické iluze, který je patrný z obrázku 3.5. Zároveň se jedná o ovlivnění nepříznivé a tedy nežádoucí, jelikož nutí pilota změnit svou trajektorii směrem k terénu.

V kontextu této práce bylo nutné učinit porovnání obou letových profilů a zkoumat odolnost pilotů vůči navozené iluzi. Došlo opět ke stejnému zpracování dat, včetně zprůměrování letových dat se směrodatnou odchylkou, toto porovnání je vyobrazené na obrázku 3.6. Stručně shrnuto byla tato data normalizována a následně navazovala Analýza hlavních komponent (PCA), poté byla data zpracována pomocí metody Dynamic time Warping s návazností na klasifikaci pomocí hierarchického shlukování dat. V okamžiku rozdělení dat do prvního a druhého profilu bylo možné pozorovat rozdílnou trajektorii během vzletu u letů s navozenou iluzí. Tento rozdíl je vyobrazený na obrázcích 3.7 a 3.8 jedná se sice o rozdíl mírný, ale zaznamatelný.

Parciální výsledky pro první profil jsou podobné celkovému hodnocení, které mu předcházelo. Metoda PCA, díky které došlo k redukci dimenzionality, umožnila rozdělení datové sady do dvou



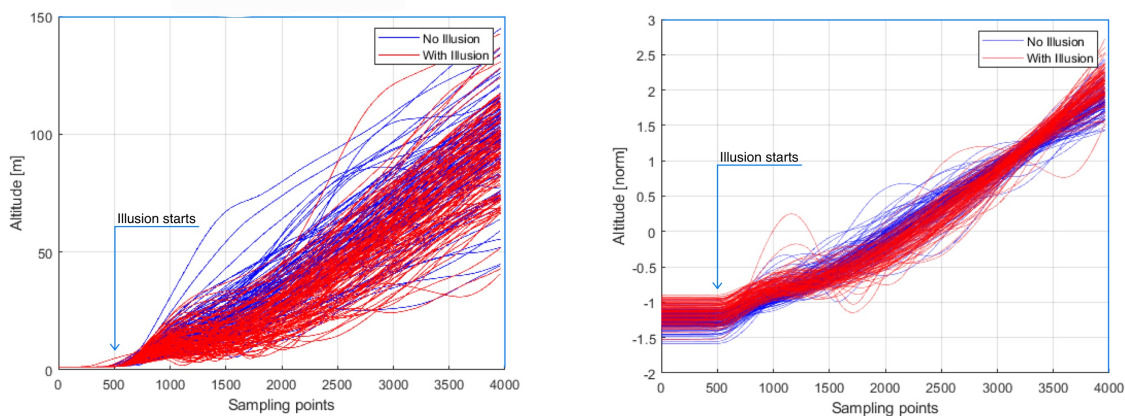
Obrázek 3.6: Zprůměrovaná letová data prvního a druhého profilu



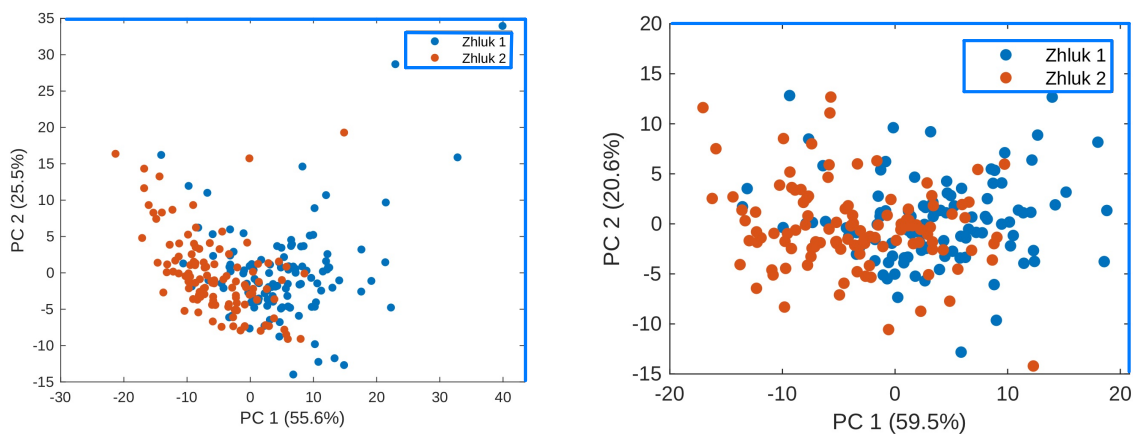
Obrázek 3.7: Data z prvního letového profilu

typických shluků, popsanych dvěma hlavními komponenty. Variabilita v obou komponentách vyšla podobně s předchozím případem, jednalo se tedy o variabilitu 55,6 % v případě komponent 1 a o variabilitu 25,5 % v případě komponenty 2. Charakteristické shlukování dat opět dokazuje přítomnost somatogravické iluze. Je opět patrné, že k největšímu ovlivnění došlo, stejně jako v předchozím případě, v rozmezí od 1500 do 2000 vzorků. Variabilita prvního a druhého profilu je porovnána v obrázku 3.9.

V klasifikaci zobrazené na obrázku 3.10 je pozorovatelný rozdíl mezi lety s navozenou iluzí a bez navozené iluze, zároveň je zde patrné, že 90 ze 114 trajektorií vzletu bylo správně statisticky identifikováno jako let bez navozené iluze. Naopak shluk C1 přesně identifikuje 83 ze 114 vzletů,



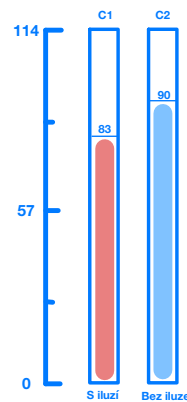
Obrázek 3.8: Data z druhého letového profilu



Obrázek 3.9: Principal Component Analysis prvního a druhého profilu

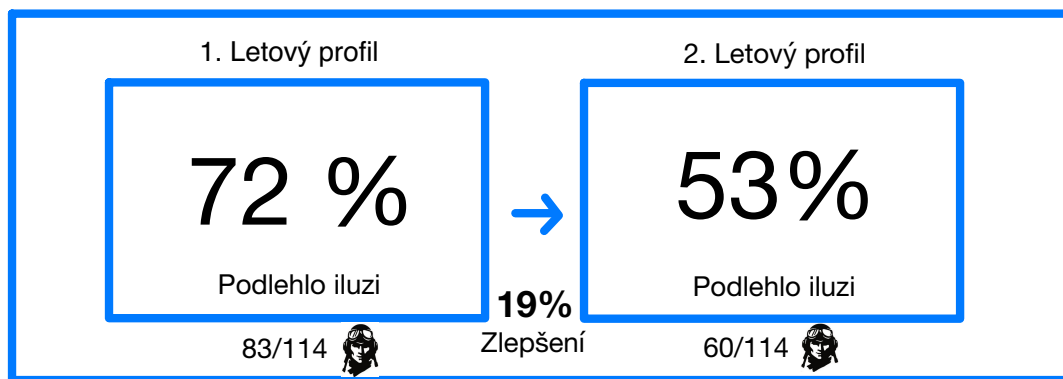
během kterých byla somatogravická iluze navozena. Výsledné letové profily v čase opět dokládají razantní změnu výchylky kormidla a následný pokles letounu v důsledku navozené iluze.

Významného zjištění v kontextu této diplomové práce bylo dosaženo při rozboru druhého letového profilu. Bylo zde prokázáno zlepšení v porovnání s prvním letovým profilem, tento rozdíl je patrný na obrázku 3.6.



Obrázek 3.10: Cluster prvního letového profilu

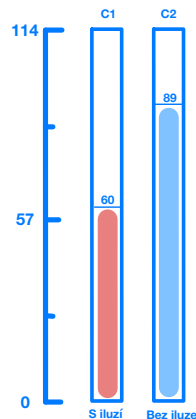
U druhého letového profilu byl zaznamenán rozdíl ve vykreslené trajektorii výškového profilu. Druhý letový profil prokázal snížení rozdílu mezi průměrným vzletem bez navozené iluze a letem s navozenou iluzí. Z druhého letového profilu je tedy patrné, že Euklidovská vzdálenost je menší mezi jednotlivými časovými řadami.



Obrázek 3.11: Porovnání identifikačního vyhodnocení letů

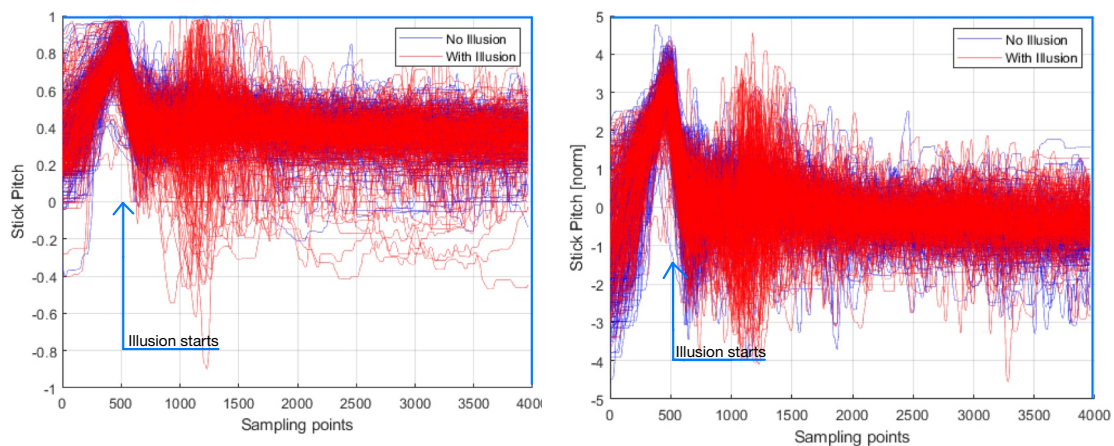
Toto zjištění vedlo k ovlivnění hierarchického shlukování a následně k odlišným výsledkům než doposud. V případě druhého letového profilu došlo k nárůstu falešných identifikací. To znamená, že docházelo ke kategorizaci vzletů s navozenou iluzí shodně s lety bez navozené iluze. K tomuto jevu docházelo v důsledku přesnější pilotáže a menší chyby ve vyvolané výchylce v důsledku navozené somatogravické iluze. Výsledky této nepřesnosti jsou zobrazeny na obrázku 3.12, zde

došlo k ovlivnění natolik, že pouze 60 ze 114 charakteristických vzletů bylo identifikováno jako ty s iluzí. Zároveň bylo 89 ze 114 letů bez iluze správně zařazeno do shluku C2. Statistika porovnání prvního a druhého profilu je shrnuta na obrázku 3.11.



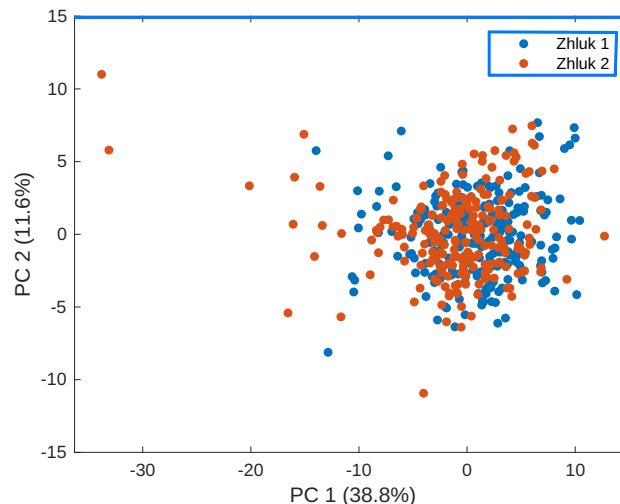
Obrázek 3.12: Cluster druhého letového profilu

Popsaná analýza zkoumala konečný efekt navození iluze. Závěrečným krokem zkoumání vlivu somatogravické iluze na pilotáž bylo ověření, zda reakce na navozenou iluzi je provedena reflexně pouze v podobě potlačení řídicí páky nebo je přidružena i nějaká sekundární reakce. Data reflektující pohyb řídicí páky jsou vyobrazena na obrázku 3.13.



Obrázek 3.13: Záznam pohybu řídicí páky bez a následně s normalizací

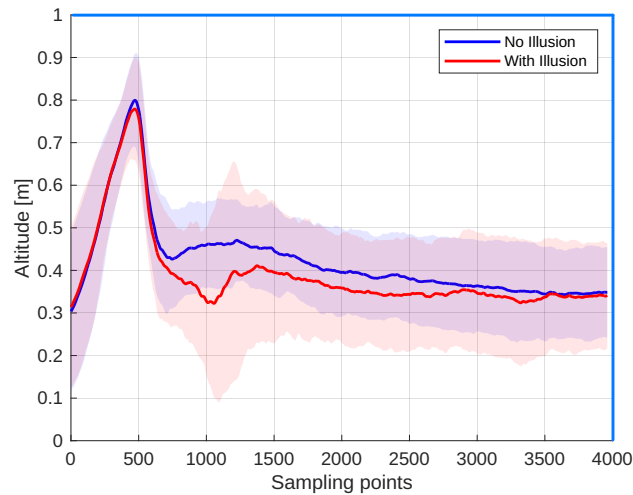
Jak bylo výše uvedeno, vzorkování bylo vázáno na bod, ve kterém došlo k zaklonění kabiny. To byl moment, kdy došlo k potlačení řídicí páky a ke kompenzaci záklonu kabiny. U pilotů byla tato reakce vynucena pouze díky umělému pohybu simulátoru, avionické přístroje v kokpitu ukazovaly stále neovlivněná letová data. Navíc kromě potlačení řídicí páky byla patrná i následná snaha zabránit této nestandardní výchylce. Pilot si tedy svůj razantní manévr uvědomil a následně opět přitáhl, aby se vrátil do původní trajektorie stoupání. Lze tedy říci, že po potlačení došlo k instantní kompenzaci adekvátním protipohybem. Zpracování dat bylo provedeno obdobným způsobem jako u předchozích. Nicméně redukce dimenzionality nepotvrdila existenci rozdílu, mezi lety s a bez navozené iluze, který by výrazně rozdělil datovou sadu, jako tomu bylo v případě výšky. Celková variabilita popsaná prvními dvěma komponentami je okolo 50 % a je vyobrazena na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Principal Component Analysis pohybu řídicí páky

Z výsledné trajektorie na obrázku 3.15 je patrné, že výchylka řídicí páky byla proměnlivá napříč celým spektrem testovaných pilotů. Nebyl zde nalezen opakující se patern nebo jakákoli podobnost, což bude pravděpodobně hlavní příčina, kvůli které nevyšla metoda PCA jednoznačně. Při zkoumání klasifikace na základě matice vzdáleností se prokázalo, že charakteristický shluk C2 byl schopen správně klasifikovat 159 ze 228 vzletů, během kterých byla iluze indukována. S velkou pravděpodobností existuje značná variabilita v pohybu řídicí páky, což mělo za následek velký počet falešných klasifikací. A to pozitivních i negativních.

Jasný výsledek, jenž je možný po zpracování letových dat odprezentovat, je skutečnost, že lze pomocí dezorientačního simulátoru s jistotou navodit iluzi. Test prokázal, že piloti byli



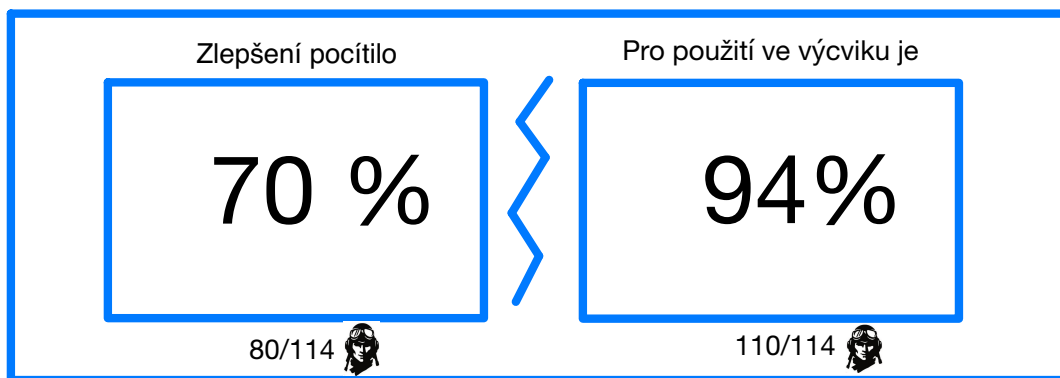
Obrázek 3.15: Zprůměrovaná data výchylky řídicí páky

náchylní na navozenou iluzi a reagovali pudově. Tento zásah do řízení byl zpravidla kompenzován zpětným protipohybem v podobě přitažení řídicí páky. Při pohledu na výsledky lze zaregistrovat, že pilot získal větší odolnost vůči somatogravické iluzi již při druhém letovém profilu, v rámci druhého měřicího termínu. Prokázala se tedy pozitivní změna vnímání somatogravické iluze u pilotů. Zároveň lze konstatovat, že pilot absolvující let na dezorientačním simulátoru získá zkušenosti, jež vedou k jeho pilotnímu rozvoji a celkově zvyšují bezpečnost jeho letů a odolnost vůči somatogravické iluzi.



Obrázek 3.16: Subjektivní hodnocení iluze z prvního a druhého letového profilu

Během experimentu byl piloty vyplňován i dotazník, který byl vytvořen pro subjektivní zhodnocení vnímání iluze. Pilotům byly po každém letu kladeny otázky, které se zaznamenávaly do papírových archů. Cílem dotazníku bylo od pilotů zjistit, jak iluzi hodnotí, toto hodnocení je podrobně popsáno v kapitole 2.7. Výsledky subjektivního hodnocení jsou znázorněny na obrázku 3.16. Je zde patrné, že došlo k subjektivnímu zlepšení. Podstatným výsledkem je zjištění, že během hodnocení druhého profilu žádný pilot neohodnotil somatogravickou iluzi jako velmi silnou, tudíž lze říci, že díky posunutí hodnot do nižších maxim došlo ke zvýšení odolnosti vůči somatogravické iluzi i z pohledu pilotů, pouze na základě jejich poznatků. Největší nárůst byl při druhém měření u pilotů, kteří hodnotili iluzi známkou tři a čtyři. Dílčím výsledkem dotazníkového řízení byla i skutečnost, že piloti jsou většinou pro implementaci letu na dezorientačním simulátoru do výcviku a sami potvrzují, že pocítili zlepšení, tato statistika je zobrazena na obrázku 3.17.



Obrázek 3.17: Statistika dotazníkového řízení



4 Diskuze výsledků

Na základě výsledků zpracovaných dat lze konstatovat fakt, že se povedlo prokazatelně navodit somatogravickou iluzi u pilotů, kteří se účastnili experimentálních letů na dezorientačním simulátoru ULZ. Úsek letu, během kterého došlo k navození iluze byl dále zkoumán a porovnáván multilaterálně mezi letovými profily. Výsledkem byla reakce na navozenou iluzi v podobě kompenzace navozeného dojmu potlačením řídicí páky. Při porovnání jednotlivých profilů bylo zjištěno, že piloti během druhého měření reagovali na navozenou iluzi citlivěji a s menší celkovou výchylkou.

Díky dosaženým výsledkům je adekvátní v kontextu této diplomové práce uvažovat o globálním rozšíření letů na dezorientačním simulátoru. Toto rozšíření by bylo nejmýsluplnější v podobě implementace do výcviku, a to ať už v podobě rozšíření osnovy nebo lépe jako substituční možnost již užívané osnovy. Přidání výcviku odolnosti vůči vestibulárním iluzím by mohlo být vloženo do výcviku přístrojového letu a postupů podle radionavigačního majáku NDB.

Na základě dosaženým výsledkům se časová dotace tohoto letu v předpokládané délce 60 minut jeví jako plně dostačující. Navíc se dle aktuálních směrnic EASA s konvenční navigací v budoucnu nepočítá a zamezuje se její podpoře, na úkor upřednostnění prostorové navigace v podobě GNSS s různou augmentační podporou. Z toho důvodu by osnova výcviku mohla jít kupředu a snížit tak nároky na výcvik konvenční navigace. Rozhodně není však možné tuto část výcviku úplně vynechat, jednalo by se pouze o snížení hodinové dotace, která by byla uvolněna na výcvik odolnosti vůči vestibulární iluzi.

EASA navíc nahrává této implementaci díky již schválené možnosti absolvovat část výcviku na certifikovaném simulátoru, místo reálného letadla. Například v integrovaném výcviku ATP pro piloty letadel, který je upraven nařízením komise (EU) č. 1178/2011, konkrétně dodatkem číslo 3, ve kterém jsou zmíněny Výcvikové kurzy, které je nutné absolvovat pro získání průkazu CPL (A) a ATPL (A). Zde je explicitně zmíněno, že 40 hodin výcviku může být absolvováno na simulátoru certifikovaného podle FNPT II, FTD 2 nebo FFS, je zde jediná limitace, a to omezení sdělující, že pouze 10 hodin může být provedeno na simulátoru nižší třídy a to konkrétně kategorie FNPT I.

Trochu odlišný postup by byl zaveden v případě implementace letu na dezorientačním simulátoru do výcviku pouze přístrojové kvalifikace IR pro jednomotorové letouny. Pro tyto druhy výcviku je opět umožněn let na simulátoru za účelem výcviku. Tento rozsah je snížen na 35



hodin. Limitace je opět upřesněna na použití simulátorů certifikovaných podle FNPT II, FTD 2 nebo FFS, s publikovaným omezením, že pouze 10 hodin může být provedeno na simulátoru kategorie FNPT I. V případě výcviku pro získání této kvalifikace pro vícemotorový letoun je osnova publikována v rozsahu 40 hodin se stejnými adicónálními podmínkami jako v případě kvalifikace IR pro jednomotorové letouny.

Pro správné zařazení letu na dezorientačním simulátoru do výcviku by bylo potřebné definovat přesné podmínky, které pilot musí splňovat. Tyto podmínky by měly být nejlépe definovány ve třech oblastech a vzájemně se prolínat. Pilot by před absolvováním výcvikového letu pro zvýšení odolnosti vůči vestibulárním iluzím měl dosahovat určité úrovně teoretických znalostí v oblasti human factor, konkrétněji mít alespoň základní informace o možných vestibulárních iluzích a jejich možnostech navození. Druhou podmínkou by měla být praktická znalost základního přístrojového vybavení a vědomost stran letu dle přístrojů. A v neposlední řadě by měl být pilot způsobilý zdravotně. Všechny tyto tři podmínky by nemělo být problematické splnit, jelikož jsou již nyní zařazeny do požadavků výcviku.

Pilot musí mít pro lety IR buď splněný medical class I nebo projít doplňujícím vyšetřením nad rámec medical class II včetně akustické komory. Praktická znalost je zabezpečena díky groundschoolu, který předchází praktickému výcviku na simulátoru. Zároveň by let na dezorientačním simulátoru nebyl první simulátorový let ve výcviku, pilot by měl již znalosti s letem na simulátoru, v podobě zahajovací části provedené nejčastěji na simulátoru FNTP II. Díky těmto třem atributům teoretické, praktické a fyzické připravenosti získá pilot dostatečné znalosti a kompetence pro efektivní absolvování letu na dezorientačním simulátoru za účelem zvýšení jeho odolnosti vůči vestibulární iluzi.

Je k diskuzi, zda by se takovéto lety za účelem zvýšení odolnosti vůči vestibulární iluzi měly provádět pouze během výcviku nebo zda by bylo vhodné dát tuto možnost i pilotům, kteří jsou již plně vycvičeni a létají již leteckou dopravu. V těchto případech a v podstatě i v návaznosti na výcvik začínajících pilotů se nabízí otázka, zda by bylo vhodné provádět tento výcvik jako výcvik opakovací, v letectví označovaný jako recurrent training. Případně by se pro zkušené piloty mohl takovýto výcvik vložit do LPC/OPC tréninku, tím pádem by pilot tento výcvik obdržel pokaždé s přechodem k novému dopravci.

V neposlední řadě se nabízí i alternativa povinného absolvování letu na dezorientačním simulátoru za účelem zvýšení odolnosti vůči vestibulárním iluzím, jako vstupní požadavek ze



strany zaměstnavatele v podobě letecké společnosti. Tento požadavek by mohl být použit též jako marketingový prvek prezentace letecké společnosti, ve smyslu nadstandardního tréninku pro své piloty, a tedy i zvýšení maximální bezpečnosti. V současné době nelze říci, jak často by pilot měl takové školení absolvovat. Zda bude stačit vstupní výcvik jednorázový nebo bude muset docházet k pravidelnému opakování letů na dezorientačním simulátoru, aby si každý pilot mohl udržet schopnost správně reagovat v situacích se zvýšeným rizikem vystavení se vestibulární iluzi.

Návrhem, který by přispěl k maximální bezpečnosti v letectví, by byla možnost, aby tento typ výcviku absolvoval pilot minimálně jednou ročně, zároveň by se upevnila důvěra v přístroje a celkově se zlepšila schopnost rozpoznávat a řešit situace spojené s vestibulárními iluzemi, jako je například somatogravická iluze. Praktickým doplňkem by bylo poskytnutí pilotům i opakovacích teoretických školení, například v podobě seminářů nebo e-learningu, stejně tak by ale bylo možné teoretickou část implementovat do briefingové fáze samotného letu na dezorientačním simulátoru.

Výsledky dosažené v rámci této diplomové práce jsou v kontextu současného poznání unikátní. Sice bylo již publikováno několik prací zabývajících se somatogravickou iluzí, jak bylo zmíněno v kapitole 1.1, žádná z nich však neměla možnost tak širokého a rozmanitého vzorku respondentů. Pro toto měření bylo použito 114 unikátních pilotů, kteří byli monitorováni. Další odlišností experimentu je uskupení pilotů, které je dělilo do 4 skupin. Toto rozdělení bylo pro validní výsledek velmi podstatné, nemohlo se tedy stát, že by se měření účastnili pouze zkušení piloti nebo naopak pouze piloti bez zkušeností, těsně po výcviku. Lze tedy říci, že se jednalo o reprezentativní vzorek napříč celou leteckou komunitou.

Dalším přínosem, který je odlišný od předešlých výzkumů, je potvrzení úspěšného navození somatogravické iluze. Nyní je nám již známa skutečnost, v jakých fázích letu může somatogravická iluze pilota zastihnout. Jedná se hlavně o kritické fáze letu. Pro účely tohoto experimentu byla iluze navozena během vzletu, což bylo odlišné oproti experimentu zmíněném v kapitole 1.1, kde docházelo k navození somatogravické iluze v odlišné fázi letu. To však nepřineslo relevantní výsledek. Ve zmiňovaném experimentu piloti při subjektivním dotazníkovém řízení nepociťovali iluzi, v experimentu v kontextu této diplomové práce došlo ke zcela opačnému výsledku. Piloti pocíťovali navození iluze vesměs všichni a u těch pár jedinců, kteří iluzi popřeli, zpracování dat ukázalo, že jejich podvědomá reakce iluzí ovlivněna byla. Reagovali tak zcela srovnatelně s piloty, kteří přítomnost iluze uznali.



5 Závěr

Tato diplomová práce se zaměřila na analýzu efektu somatogravické iluze u pilotů a zkoumala potenciální přínosy využití dezorientačních simulátorů pro zvýšení odolnosti pilotů vůči této iluzi. Práce prokázala, že somatogravická iluze má významný vliv na výkon pilotů.

V teoretické části byly představeny základní koncepty týkající se vestibulárního systému a jeho reakce na navození somatogravické iluze. Tyto koncepty byly následně aplikovány v praktické části práce. Experimentální studie provedená s využitím simulovaných letových profilů umožnila detailně pozorovat reakce pilotů a efektivitu zmíněného profilu v kontextu redukce negativních dopadů iluze.

Z výzkumu vyplývá, že systematický trénink na speciálně upravených simulátorech, které indukují somatogravickou iluzi, vede k významnému zlepšení schopnosti pilotů rozpoznávat a efektivně reagovat na tuto iluzi. Tento poznatek má významný praktický přínos pro leteckou praxi, kde může být využit pro návrh a implementaci specifických výcvikových programů, které zvýší bezpečnost letů.

Práce nicméně přiznává určité limity. V současné době by implementace letu na dezorientačním simulátoru do standardní výcvikové osnovy narazila na značné praktické obtíže. Hlavním omezením je skutečnost, že v České republice existuje pouze jeden takový simulátor. Tato situace výrazně komplikuje možnost rozšíření výcviku na dezorientačním simulátoru na širší skupinu pilotů. Absence dostupných zařízení by vedla k výrazným časovým prodlevám a logistickým překážkám, jelikož by všichni piloti museli absolvovat výcvik na jednom konkrétním simulátoru v jednom konkrétním městě. To by nejen ztížilo koordinaci a plánování postupu výcvikovou osnovou, ale také by se zvýšily náklady spojené s výcvikem. Efektivní začlenění dezorientačních simulátorů do výcvikových programů by tedy vyžadovalo značné investice do dalších simulátorů a ostatní infrastruktury, aby bylo možné uspokojit výcvikové potřeby širokého spektra pilotů.

Na nedostatek simulátorů navazuje i certifikační limitace, jelikož dezorientační simulátor byl původně vyvinut pro potřeby armády, tudíž se nepočítalo s implementací do civilního sektoru. K umožnění začlenění simulátoru do běžného výcviku by bylo nutné simulátor certifikovat dle požadavků dané legislativy, nebo případně upravit legislativní rámec tak, aby dezorientační simulátor mohl být pro potřeby výcviku použit. To, zda by bylo možné simulátor certifikovat, nebo



jakým způsobem prosadit změnu legislativy, by mohlo být předmětem další práce s důrazem na prosazení nových trendů ve výcviku v letecké dopravě.

Kromě nedostatku simulátorů pro využití v komerční sféře, by bylo přínosné zvolit simulátor, který bude vybaven modernější avionikou. Dezorientační simulátor ULZ je uzpůsoben jako letoun Zlín 142, což je pro potřeby ULZ s napojením na Letecké centrum Čáslav naprosto ideální. Při komerčním použití by bylo příhodné použít simulátor s avionikou, se kterou se piloti nejčastěji setkávají v leteckých školách, například by se mohlo jednat o avionické vybavení shodné s letounem Cessna 172 nebo s menší verzí 150. Alternativou by byl i glasskokpit, který se často na FNTP II simulátorech využívá, tudíž by šlo předpokládat jednoduchou návaznost ovladatelnosti při přechodu ze simulátoru na simulátor. S jistotou lze konstatovat, že vytvářet nové simulátory s avionikou letounu Zlín 142 nemá ekonomický ani praktický smysl. Letoun byl v tehdejších dobách unikátní a na konci minulého století se těšil velké popularitě, zároveň dokázal létat i akrobatické prvky, v současné době se bohužel jedná o zastaralý letoun bez obecně rozšířeného nástupce.

Jako doporučení pro navazující výzkum by bylo vhodné zaměřit se na dlouhodobější sledování vlivu letu na dezorientačním simulátoru a na odolnost pilotů vůči somatogravické iluzi. Tento navazující výzkum by mohl být proveden formou komparativní studie pilotů, kteří let na dezorientačním simulátoru absolvovali v rámci tohoto výzkumu, s piloty, kteří nemají žádnou zkušenost se somatogravickou iluzí. Takové studie by mohly přinést ještě hlubší pochopení mechanismů odolnosti vůči somatogravické iluzi a nastínit podrobnější informace o udržení odolnosti vůči somatogravické iluzi. Výsledky této diplomové práce potvrzují pozitivní vliv letu na dezorientačním simulátoru. Co se však v rámci této diplomové práce nepodařilo potvrdit ani vyvrátit, je trvanlivost takto nabitě odolnosti vůči somatogravické iluzi. Proto by bylo vhodné na experiment navázat dalším výzkumem, který by získal další cenné informace pro maximální podložení snahy o implementaci letu na dezorientačním simulátoru do běžné praxe pilotů, napříč celým leteckým světem.

Zpracování dat a prezentací výsledků byla potvrzena možnost zvýšení odolnosti vůči somatogravické iluzi. Toto zjištění můžeme brát jako přínosné pro zvýšení bezpečnosti v letecké dopravě.



Seznam použité literatury

1. CLÉMENT, Gilles; MOORE, Steven T; RAPHAN, Theodore; COHEN, Bernard. Perception of tilt (somatogravic illusion) in response to sustained linear acceleration during space flight. *Experimental brain research*. 2001, roč. 138, s. 410–418.
2. GROEN, Eric L; CLARK, Torin K; HOUBEN, Mark MJ; BOS, Jelte E; MUMAW, Randall J. Objective evaluation of the somatogravic illusion from flight data of an airplane accident. *Safety*. 2022, roč. 8, č. 4, s. 85.
3. SÁNCHEZ-TENA, Miguel Ángel; ALVAREZ-PEREGRINA, Cristina; VALBUENA-IGLESIAS, M^a Carolina; PALOMERA, Pablo Ruisoto. Optical illusions and spatial disorientation in aviation pilots. *Journal of medical systems*. 2018, roč. 42, s. 1–5.
4. ERIKSSON, Lars; HOFSTEN, Claes von; TRIBUKAIT, Arne; EIKEN, Ola; ANDERSSON, Peter; HEDSTRÖM, Johan. Visual flow scene effects on the somatogravic illusion in non-pilots. *Aviation, space, and environmental medicine*. 2008, roč. 79, č. 9, s. 860–866.
5. KARAPETJAN, Liana; SOCHA, Vladimír; MATYÁŠ, Roman; HANÁKOVÁ, Lenka; PETŘÍČEK, Jan; ONIŠČENKO, Boris; SOCHA, Luboš; DOŠEL, Petr. Implementation of a vestibular illusion simulator into IR training. *Transportation Research Procedia*. 2022, roč. 65, s. 222–229. ISSN 2352-1465. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.11.026>. 11th International Conference on Air Transport – INAIR 2022, Returning to the Skies.
6. LUDLOW, Simon. 2016. Dostupné také z: <https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2016/11/Ludlow.pdf>.
7. HANZLOVÁ, Jitka; HEMZA, Jan. Čivy. [B.r.]. Dostupné také z: https://is.muni.cz/do/fsps/e-learning/zaklady_anatomie/zakl_anatomie_IV/pages/civy.html.
8. FOSTER, Jacinta. *What is the vestibular system and why does it need physio?* 2023. Dostupné také z: <https://www.avcphysio.com.au/what-is-the-vestibular-system-and-why-does-it-need-physio/>.
9. KARAPETJAN, Liana. *Kvantifikace vestibulárních a vizuálních iluzí U pilotů*. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2019. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10467/85321>.



10. *EASA Easy access rules*. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy_Access_Rules_for_Medical_Requirements-Jun20.pdf.
11. *Flight Simulation Training Devices (FSTD)*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/aircrew-and-medical/flight-simulation-training-devices-fstd>.
12. *Get that Instrument Rating. 2022*. Dostupné také z: <https://www.aviationseminars.com/quick-tips-get-that-instrument-rating/>.
13. WEBCONTENTMANAGEMENTSYSTEM: MACRON
SOFTWARE — WEBTODATE, www.webtodate.cz. *V ústavu leteckého Zdravotnictví Otevřeli nový simulátor letových iluzí, Zlepší Výcvik Armádních pilotů*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://mocr.army.cz/informacni-servis/zpravodajstvi/v-ulz-otevrel-novy-simulator-letovych-iluzi--zlepsi-vycvik-armadnich-pilotu-211040/>.
14. *IPT-II Spatial Disorientation Trainer - ETC Aircrew Training*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.etcaircrewtraining.com/gyro-ipt-ii-spatial-disorientation.html>.
15. SYSTEMS, ETC Aircrew Training. *GH-200 spatial disorientation trainer*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.etcaircrewtraining.com/GH-200-spatial-disorientation-trainer.html>.
16. *EASA Certificaton specificatons*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-23-normal-utility-aerobatic-and-commuter-aeroplanes>.
17. SCHRIVER, Angela T; MORROW, Daniel G; WICKENS, Christopher D; TALLEUR, Donald A. Expertise differences in attentional strategies related to pilot decision making. In: *Decision making in aviation*. Routledge, 2017, s. 371–386.
18. *Aviation Investigation Search*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.nts.gov/Pages/AviationQueryV2.aspx>.
19. HARRO RANTER, Aviation Safety Network. [B.r.]. Dostupné také z: <https://aviation-safety.net/>.
20. *Air crash investigaton*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://avherald.com/>.



21. *SkyVector Map Publications*. 2014. Dostupné také z: <https://skyvector.com/airport/HNL/Daniel-K-Inouye-International-Airport>.
22. SENIN, Pavel. Dynamic time warping algorithm review. *Information and Computer Science Department University of Hawaii at Manoa Honolulu, USA*. 2008, roč. 855, č. 1-23, s. 40.
23. DAI, Zhuang; CHEN, Weinan; HUANG, Xinghong; LI, Birong; ZHU, Lei; HE, Li; GUAN, Yisheng; ZHANG, Hong. Cnn descriptor improvement based on l2-normalization and feature pooling for patch classification. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2018, s. 144–149.
24. ABDI, Hervé; WILLIAMS, Lynne J. Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*. 2010, roč. 2, č. 4, s. 433–459.