



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Vliv hluku na přesnost pilotáže
Influence of Noise on Piloting Precision

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Lenka Hanáková, Ph.D.

Tomáš Hofírek

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Tomáš Hofírek

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Vliv hluku na přesnost pilotáže**

Název tématu (anglicky): Influence of Noise on Piloting Precision

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zhodnotit vliv hluku na přesnost pilotáže v průběhu simulovaných letů. Práce vychází z předpokladu, že zvýšená intenzita hluku bude mít negativní vliv na výkonnost.
- Vykonejte analýzu současného stavu zaměřenou na problematiku hluku a jeho vlivu na výkonnost člověka, přičemž hlavní zaměření by mělo být na oblast letectví. Dále vykonejte analýzu možností hodnocení přesnosti pilotáže.
- Na základě analýzy současného stavu navrhnete experiment, prostřednictvím něhož bude možné zhodnotit vliv hluku na přesnost pilotáže. Experiment realizujte.
- Získaná data vyhodnoťte prostřednictvím vhodných metod.
- Výsledky interpretujte a diskutujte.
- Formulujte závěry a limitace práce.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího závěrečné práce

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

Seznam odborné literatury: Socha, Vladimír, et al. "Pilots' performance and workload assessment: Transition from analogue to glass-cockpit." Applied Sciences 10.15 (2020).
Ozcan, H. Kurtulus, and Semih Nemlioglu. "In-cabin noise levels during commercial aircraft flights". Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne (2006).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Hanáková**

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **7. srpna 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Tomáš Hofírek
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 7. října 2022

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na výzkum vlivu hluku v kokpitu dopravního letadla na výkonnost posádky. Experiment byl navržen tak, aby napravil limitace z předešlých studií a byl založen na reálných podmínkách. Bylo zjištěno, že určité hladiny akustického tlaku mohou negativně ovlivnit výkonnost posádky, zejména při hlasitosti 70 dB(A). Dále práce ukázala nevhodnost sluchátek s aktivním tlumením pro krátké lety (do 30 minut). Ačkoliv byl počet subjektů výzkumu limitován, tato práce překonala většinu předešlých prací v počtu subjektů, a poskytla tak důležité poznatky pro leteckou bezpečnost. Budoucí výzkum by měl zohlednit lety delší než 30 minut a větší množství subjektů.

Klíčová slova: hluk, efekt, přesnost, výkonnost, chyby



Abstract

This thesis focuses on the impact of cockpit noise on crew performance in commercial aircraft. The experiment was designed to address shortcomings in previous studies and was based on real-world conditions. It was found that certain noise acoustic pressure levels can negatively affect crew performance, especially at 70 dB(A). Furthermore, the study revealed the inappropriateness of active noise-cancelling headphones for short flights (up to 30 minutes). Although the number of subjects was limited, this study surpassed most previous research in subject count, offering crucial insights for aviation safety. Future research should consider flights longer than 30 minutes and a larger subject pool.

Keywords: noise, effect, precision, performance, errors



Poděkování

Děkuji Ing. Lence Hanákové, Ph.D. za odborné připomínky týkající se bakalářské práce, její dohled, čas, který v rámci konzultačních hodin neváhala obětovat. Ing. Danielu Urbanovi děkuji za nastavení letového simulátoru, bez kterého by nebyla realizace bakalářské práce možná. Za přínosné rady ohledně psaní bakalářské práce a její struktury děkuji Ing. Jakubu Steinerovi. Rovněž nesmím opomenout svého partnera a rodinu za jejich láskyplnou podporu. Taktéž děkuji svému kolegovi Martinu Ungrovi za pomoc při sestavení a realizaci experimentu.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Vliv hluku na přesnost pilotáže vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

V Praze dne 6.8.2023

Podpis



Obsah

Úvod	1
1 Přehled současného stavu	3
1.1 Teoretický základ.....	3
1.1.1 Fyziologická akustika.....	3
1.1.2 Vnímání zvuku	4
1.1.3 Vliv hluku na lidský organismus.....	4
1.1.4 Mechanismy pohlcování hluku	5
1.1.5 Měření hluku	6
1.2 Zkoumání hluku	6
1.3 Současné studie se zaměřením na letectví	6
1.4 Shrnutí kapitoly.....	8
2 Cíle a hypotézy.....	9
2.1 Cíle a částečné cíle.....	9
2.2 Otázky	9
2.3 Hypotézy	10
3 Metodika	11
3.1 Měření vstupních dat.....	11
3.1.1 Spolupráce s leteckou společností.....	11
3.1.2 Příprava praktického měření	11
3.1.3 Průběh praktického měření.....	12
3.1.4 Vyhodnocení měření	13
3.2 Sestavení experimentu	14
3.2.1 Letecký simulátor.....	14
3.2.2 Návrh tratě simulovaného letu	16
3.2.3 Subjekty.....	18
3.2.4 Průběh experimentu.....	18
3.3 Sběr a zpracování dat	19



3.3.1	Letová data	19
3.3.2	Programové vyhodnocení.....	21
3.4	Statistické vyhodnocení	22
3.4.1	Friedmanův test.....	22
3.4.2	Post hoc-analýza.....	23
4	Výsledky	24
4.1	Všeobecné výsledky.....	24
4.1.1	Friedmanův test.....	24
4.1.2	Post hoc.analýza	24
4.1.3	Grafické znázornění výsledků.....	26
4.2	Vyhodnocení deviačních chyb.....	27
4.2.1	Grafický výstup deviačních chyb.....	28
5	Diskuse výsledků	33
6	Závěr.....	35
7	Seznam použité literatury.....	37



Seznam obrázků

Obrázek 3.1: A: Kontrolní měření hladiny akustického tlaku, B – usazení subjektu	15
Obrázek 3.2: Horizontální situace tratí	17
Obrázek 3.3: Konstrukce deviačních chyb	20
Obrázek 4.1: Grafické znázornění plošných odchylek	26
Obrázek 4.2: Grafické znázornění směrodatných odchylek	27
Obrázek 4.3: Grafické vyhodnocení chyb – typ 1	28
Obrázek 4.4: Grafické vyhodnocení chyb – typ 2	28
Obrázek 4.5: Grafické vyhodnocení chyb – typ 3	29
Obrázek 4.6: Grafické vyhodnocení chyb – typ 4	29
Obrázek 4.7: Grafické vyhodnocení chyb – typ 5	30
Obrázek 4.8: Grafické vyhodnocení chyb – typ 6	30
Obrázek 4.9: Grafické vyhodnocení chyb – typ 7	31
Obrázek 4.10: Grafické vyhodnocení chyb – typ 8 (typ X).....	31



Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Data z měření v kokpitu.....	13
Tabulka 3.2: Kategorizace deviačních chyb	20
Tabulka 4.1: Výsledné p-hodnoty průměrných odchylek.....	25
Tabulka 4.2: Výsledné p-hodnoty směrodatných odchylek.....	25



Seznam symbolů a zkratk

GPS = Global Positioning System

RNP = Required Navigation Performance

SPL = Sound pressure level



Úvod

Letectví se řadí mezi obory s nejvíce rozvinutým vztahem k bezpečnosti. Už od samého počátku převzalo iniciativu ve vývoji a aplikaci bezpečnostních inovací, kam se investovaly nemalé finanční prostředky. Přes všechno toto úsilí však stále nejvíce neznámých generuje lidský faktor. Lidská posádka je v aktuálním stadiu vývoje stále nenahraditelnou součástí provozu letecké dopravy. Ač se vedou četné diskuse na téma nahraditelnosti, dokud bude člověk součástí prostředí v kokpitu, je nutné dále rozvíjet a zkoumat způsoby zvýšení bezpečnosti.

Pilot je živý organismus, a tudíž ho nelze naprogramovat. Lidský mozek je velmi individuální a nelze spoléhat na předepsané vzorce a postupy. Vždy nastane situace, kdy se lidská individualita projeví. Takováto individualita je velmi ovlivněna osobností pilota a jeho aktuálním psychofyzilogickým stavem. Na toto téma se již provádělo nespočetné množství studií a výzkumů, avšak stále zůstává mnoho neprobádaných a neznámých částí. Jako příklad lze uvést hluk, který je v kokpitu dopravního letadla všudypřítomný. Výrobci letecké techniky již dlouhá desetiletí vyvíjí a zdokonalují konstrukce letounů tak, aby byl hluk co nejnižší, ale pouze pro pohodlí pasažérů a obyvatelstva na zemi. Nikdy nebyl hluk v kokpitu dopravního letadla prioritou ve vztahu k výkonnosti posádky. Ač lze vést diskusi, zda je řešení v podobě maximální snahy snížit úroveň hluku v kokpitu, stále ekonomicky výhodné, je nutné dále rozvíjet vědecké poznání a snažit se pochopit úplný efekt tohoto hluku na výkonnost pilotů. I přestože bychom došli k závěru, že nápravné řešení není konstrukčně nebo ekonomicky možné, je třeba plně pochopit alespoň míru rizika v tomto ohledu.

Výzkum na téma hluku v kokpitu dopravního letadla a jeho vlivu na posádku je velmi upozaděn a několik málo studií a výsledků nepřineslo jednoznačnou shodu. Tato problematika je velmi komplexní, a pokud má tato práce za cíl obohatit aktuální stav vědeckého bádání, musí se poučit z limitací studií již existujících. Práce je zaměřena na vliv hluku na výkonnost pilota při hladinovém letu pod expozicí tří různých intenzit hluku. Přestože byly kritéria přesnosti pro účely experimentu v jistém ohledu zpřísněny, stále je cílem práce zjistit reálné dopady na výkonnost posádky. Taktéž došlo k rozdělení na lety dlouhodobé, tedy trvající déle než 30 minut, a krátkodobé, kratší než 30 minut. Různě dlouhé lety mohou totiž působit zcela odlišně na výkonnost, zvláště ve vztahu k době, po kterou je pilot vystaven expozici hluku. Pokud by byl zkoumán pouze let o délce několika hodin, nemuselo by vůbec dojít ke zjištění různého vlivu hluku v závislosti na délce letu. Krátkodobý let bude předmětem této práce s cílem publikovat výsledky vlivu hluku na výkonnost pilotů.



Sdílený experiment, z jehož výstupních dat vycházely celkem dvě studie, pomohl pochopit vliv hluku na posádku dopravního letounu. Vstupní data taktéž pocházela z linkového letu obchodní letecké dopravy. Výsledkem je experiment, který simuluje konkrétní reálné podmínky, kterým jsou piloti při výkonu svého povolání denně vystaveni.



1 Přehled současného stavu

Problematika nadměrného hluku v kabině dopravních letounů je aktuálně stále velmi vědecky neprobádané téma. Ačkoli se několik málo vědeckých prací zabývalo touto problematikou, nedospěly k jednotnému výsledku, a naopak se velmi rozcházel. Pro práci s hlukem však musíme definovat určité termíny.

1.1 Teoretický základ

Zvuk je jakékoliv chvění pevného, kapalného nebo plynného prostředí v rozmezí pro člověka slyšitelných frekvencí. Konkrétně se udává spodní hranice 16 Hz a horní hranice 20 kHz. Zde je potřeba podotknout, že schopnost vnímání zvuku je velmi individuální a liší se i v rámci osob stejného věku, pohlaví a demografické příslušnosti. Zvukové vlny se v prostředí s částicemi šíří podélnými vlnami. Pro účely této práce je uvažováno šíření pouze v prostředí vzduchu. V tomto prostředí dochází při průběhu zvukové vlny ke kmitání částic vzduchu ve směru šíření vlny. V důsledku toho dochází ke střídavému zhuštění a zředění vzduchu. Tyto změny mohou být periodické a neperiodické. Tlak v nějakém bodě zvukového pole je dán součtem barometrického a akustického tlaku [3] [27].

Střídavá rychlost neboli akustická rychlost, kterou částice kmitají, bývá definována rychlostí a směrem. Akustický tlak vyvolává změny hustoty a teploty. Z hlediska termodynamiky se jedná o děj adiabatický, zejména z důvodu špatné vodivosti vzduchu, který je považován spíše za izolant, a z důvodu rychlosti změny, která je i při nízkých kmitočtech vysoká. Frekvence zvuku je definována jako počet vln, které se zopakují za dobu jedné sekundy. Další nezbytný pojem je hladina akustické intenzity, která je přímo úměrná druhé mocnině akustického tlaku s jednotkou jeden decibel (dB) [3].

1.1.1 Fyziologická akustika

Popisuje způsob zpracování a převod zvukového signálu – tedy podnětu – sluchovým orgánem. Ten je nervy spojen s mozkem, který má na starosti konečné zpracování vjemu. Je důležité podotknout, že se jedná o subjektivní vjem a interpretaci podnětu, jelikož může být velmi individuálně ovlivněna jeho výsledná podoba.

Sluchový orgán je prvek, který zprostředkovává převod mechanického vlnění, jímž zvuk je, na elektrické signály. Skládá se ze zevního, středního a vnitřního ucha.

Zevní ucho se skládá z boltce a zvukovodu. Směrovou charakteristiku má na starosti boltce. Ve zvukovodu dochází k rezonanci dopadajícího zvuku, čímž je ovlivněna frekvenční charakteristika sluchového orgánu. Standardně tedy dochází ke zvýšení akustického tlaku



před bubínkem až o 10 dB při určitých frekvencích zvuku. Střední ucho je rozděleno na jeho vnějším okraji bubínkem, který tak vymezuje jeho fyziologickou hranici. K bubínku je shora přirostlá rukojeť kladívka. Následují kovadlinka a třmínek. Tyto tři kůstky umožňují přenos kmitavého pohybu ze stěny bubínku až do vnitřního ucha. To se nachází v kanálcích ve skalní kosti, které se nazývají labyrint. V kostěném labyrintu je umístěn blanitý labyrint. Zde se nachází vestibulární ústrojí. Sluchová část vnitřního ucha se nachází v hlemýždi. Ten je rozdělen na dvě patra: horní (scala vestibuli) a dolní (scala tympani). Cortiho orgán slouží jako převodník mechanických vibrací na elektrické signály, které jsou následně převedeny do mozku [1] [2].

1.1.2 Vnímání zvuku

Zvukový orgán tedy teoreticky slouží jako snímač tlaku. Jeho náhlé změny jsou přenášeny formou kmitů. Aby byl zvuk slyšitelný, musí jeho intenzita, resp. akustický tlak překročit určitou hodnotu. Tuto hodnotu nazýváme práh slyšitelnosti. Ten není závislý pouze na frekvenci, mezi další faktory se řadí čistota tónu, směru, odkud přichází, zda je vnímán oboustranně. Pokud však podnět přesáhne určitou intenzitu, může být vnímán i hmatovými receptory (cca 120 dB). Na samotném vrcholu slyšitelnosti se nachází práh bolesti, po jehož překročení dochází k velmi rychlé a trvalé degradaci sluchového aparátu (cca 140 dB) [1].

Biologické účinky zvuku na člověka mohou být velmi ovlivněny způsobem, jakým je akustická informace zpracována. Jako účinnější se označují zvuky silnější, přerušované, s impulzy nebo rázy. Naopak zvuky tlumené, pravidelné, monotónní jsou méně účinné. Ucho je nejcitlivější na frekvenci 1 000–4 000 Hz. Při stejné intenzitě vyvolávají zvuky odlišný sluchový vjem. Jinak řečeno subjektivní vnímání je různé [2].

Výška tónu je jedna ze základních subjektivních charakteristik sluchového vjemu. Výška tónu úzce souvisí s frekvencí, avšak není s ní totožná. Subjektivní testy dokázaly, že velice záleží také na jeho intenzitě ve smyslu hladiny akustického tlaku [3]. Důležitý není jen aspekt hluku obecně, ale také to, jak působí na lidský organismus a jaké reakce v něm vyvolává.

1.1.3 Vliv hluku na lidský organismus

V tomto případě se bude uvažovat pouze negativní vliv zvuku na organismus, jelikož pozitivní vliv není předmětem této práce. Nebudou zde tedy zmiňovány největší přínosy sluchu, například komunikace, ale především jeho vedlejší efekty ve smyslu efektu působení negativních vlivů. Pojem hluk označuje zvuk, který je vnímán jako škodlivý, nepříjemný nebo rušivý [25]. Hluk rozdělujeme na habituální a emoční. Habituální hluk je pro organismus známý, běžný a normální. Byl mu již vystaven v minulosti a jeho výskyt člověk ani nemusí



vědomě zaznamenat. Naopak emoční hluk je pro organismus nový, varující. Expozice zvuků, které člověku připomínají nepříjemnou událost či vzpomínku, se taktéž řadí mezi emoční hluk. Pokud nový, neznámý hluk nevykazuje známky nebezpečí ani ohrožení, velmi rychle se mění na habituální. Oba typy hluku mají vliv na vzestup krevního tlaku, avšak mechanismy tohoto procesu jsou rozdílné. Habituální hluk působí na zvýšení krevního tlaku od hranice přibližně 65 dB, tato hranice se nazývá práh účinku. Emoční hluk však může působit budícím efektem už na prahu slyšitelnosti. I zde je však nutné podotknout, že se jedná o přibližné hranice a jejich zvýšení či snížení je čistě subjektivní záležitost [2][3]. Dalším krokem pro pochopení hluku je definice jeho šíření a pohlcování v prostoru.

1.1.4 Mechanismy pohlcování hluku

Práce se bude věnovat i případným protiopatřením a způsobům vedoucím ke snížení hluku v kabině dopravního letadla. V následujících řádcích budou popisovány čistě pasivní prvky pohlcování hluku. Porézní látky pohlcují zvukové energie na základě přeměny zvukové energie na jiný druh energie. Mezi nejčastější lze zařadit přeměnu třením vzduchu v pórech látky. Dále také přeměny relaxační, při kterých dochází k využití adiabatického děje uvnitř látky. V místě zvýšeného akustického tlaku, tedy zvukové vlny, dojde vlivem vodivosti okolní látky k odvedení tepla, a tedy ke snížení akustického tlaku.

Rezonanční princip využívají obklady, které vycházejí z teorie tlumených kmitů. Pokud na akustický rezonátor dopadne zvuková vlna, rozkmitá ho, a způsobí tedy přenos energie. Podle konstrukce je lze rozdělit na kmitající membrány, kmitající desky a Helmholtzovy rezonátory. Ve všech případech je velmi důležitým aspektem doznívání, tedy schopnost kmitat po zániku budivé vlny [1].

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk se charakterizuje hodnotou činitele zvukové pohltivosti, který je bezrozměrným číslem. Jeho velikost se může pohybovat od 0 do 1. Materiál dosahující hodnoty 1 je schopen zcela pohltit zvukovou vlnu. Analogicky hodnoty 0 nabývá materiál, který zvuk dokonale odráží [3]. Tyto aspekty jsou velmi důležité při vývoji a aplikaci materiálů v interiéru moderního dopravního letounu.



1.1.5 Měření hluku

Hladina akustického tlaku je určena vztahem:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ (dB)} \quad (1.1),$$

kde p představuje efektivní hodnotu zvukového tlaku měřenou v Pa a p_0 je referenční hodnota pro tento tlak. V anglické literatuře se často používá termín označený zkratkou SPL k popisu hladiny zvukového tlaku. Jednotky hladiny akustického tlaku se mohou objevit s označením SPL jako dolní index nebo v závorce. Z daného vztahu je zřejmé, že při kombinaci dvou zdrojů zvuku s identickou hladinou akustického tlaku se celková hladina zvýší o 3 dB, zatímco pro N identických zdrojů je zvýšení o $10 \log N$. Hluk dosahující nebo překračující 85 dB se obvykle považuje za škodlivý. Na úrovni 120 dB může člověk pociťovat bolest v uších a při 160 dB může dojít k poškození bubínku. Nicméně nepohodlí může nastat i při mnohem nižších úrovních tlaku, zatímco pohodlné podmínky obvykle začínají okolo 30 dB [27].

1.2 Zkoumání hluku

Problematice hluku v kokpitu se věnovalo relativně málo vědeckých prací. V rámci budování hypotéz pro tuto práci byly vyhledány práce, které se zabývaly vlivem hluku i na zvířata. Bylo zjištěno, že dokonce střední hladina akustického tlaku bez vlivu na stres u zvířete – konkrétně se jednalo o myši – významně ovlivnila paměť a schopnost učení u zvířat [6]. Další studie prokázala, že okolní hluk má přechodné a trvalé negativní efekty na centra zpracování řeči. V případě, kdy byly subjekty exponovány hluku, se dominance levé hemisféry mění na dominanci pravé hemisféry mozku. Obzvláště tedy dlouhotrvající hluk má přetrvávající vliv na reorganizaci centra zpracování řeči a distribuce pozornosti [7]. Při zaměření se na výskyt chyb v rámci studie provedené na 146 subjektech bylo zjištěno významné zvýšení výskytu chyb zásahu a chyb vynechání při porovnání prostředí bez hlukové zátěže a s hlukovou zátěží. Dále byl také potvrzen nárůst v reakčním čase a schopnost zaznamenat kritické signály i reagovat na ně. Z této studie tedy vyplývá výrazný negativní efekt na výkonnost člověka [8].

1.3 Současné studie se zaměřením na letectví

Předešlé studie byly bez vazby na letectví a pomáhaly pouze propojit problematiku do kontextu lidského organismu a jeho reakcí na hluk. Následující studie zkoumala efekt hluku na výkonnost pilotů. Měření probíhalo po dobu 60 minut na letovém simulátoru. Celkem se ho zúčastnilo 32 subjektů po čtyřech skupinách. Výsledkem této práce byl nevýznamný rozdíl mezi výkonností pilotů s hlukovou zátěží a bez ní. Zde je však nutné poznamenat, že hluková



zátěž sestávala z expozice hlukem o hlasitosti 60 dB, což je podle měření v rámci této práce hladina akustického tlaku výrazně pod úrovní skutečně se vyskytující v kokpitu dopravního letadla. Můžeme tedy uvažovat, že takto nízko nastavená hladina měla výrazný efekt na celkové výsledky výkonnosti pilotů [9].

Dále bylo zjištěno, že ačkoliv hluk nemá významný vliv na výkonnost během letu, existují určité indikátory, které poukazují na ovlivnění schopnosti letu obecně a schopnosti navigovat. Výsledky však nebyly zcela průkazné a autoři sami na závěr práce dodávají, že jejich práce by měla být ověřena a rozšířena. V této práci najdeme i limitace, kam náleží převážně malý počet subjektů, přesněji tedy 14, a zároveň velký rozptyl celkového počtu nalétaných hodin, konkrétně se rozsah pohyboval od 160 do 350 hodin [10].

Další studie vykazovala podobné limitace jako předešlá. I zde se vyskytl poměrně malý počet (10) subjektů. Tento fakt vyvolává otázky ohledně relevantnosti výsledků, avšak lze je brát jako další náznak pro správnou tvorbu hypotézy stanovené v této práci. Výsledek odhalil značné zvýšení narušení pozornosti a vizuálních pohybů při zvyšujícím se výskytu hluku. Konkrétně byly jednotlivé hladiny akustického tlaku nastaveny na 45, 55, 65, a 75 dB. Což však stále není hodnota, která byla zjištěna a ověřena při praktickém měření této práce. Dále bylo také odhaleno zvýšené množství potřebné energie pro držení pozornosti a situačního povědomí během letu, což ve výsledku také zvyšuje reakční čas a celkovou únavu pilota [11].

Poslední studie se soustředila převážně na výskyt subjektivních symptomů u subjektů, a také na pozorování a měření zdravotních symptomů. Hodnotu výsledků zvyšuje velký počet subjektů, tedy 160. Byl prokázán nárůst výskytu degradace kognitivních schopností v subjektivním měřítku. Dále byly prokázány tělesná slabost, bolest hlavy a svalová bolest. Všechny tyto aspekty a jejich vliv na organismus se pak exponenciálně zvyšovaly v závislosti na době, po kterou byly subjekty hluku vystaveny. Hluková zátěž sestávala ze 70, 74 a 78 dB, což lze považovat za největší přiblížení se hodnotám naměřeným v této práci. Dále vyplývá významný psychofyziologický vliv na organismus pilota, který se zvyšuje v závislosti na čase [12].



1.4 Shrnutí kapitoly

V rámci této kapitoly bylo představeno několik studií se zaměřením na letectví i mimo něj, které se věnovaly problematice hluku a jeho působení na lidský organismus. Lze identifikovat několik limitací těchto prací, které pravděpodobně způsobily nesoulad výsledků v nich uvedených. Hlavním úkolem této práce je naměření reálných dat hladiny akustického tlaku z prostředí kokpitu dopravního letadla. Tato data budou sloužit jako vstupní zdroj pro nastavení experimentu. Dalším důležitým úkolem je dostatečný počet subjektů tak, aby byl vzorek statisticky validní. Nezbytné je taktéž výběr subjektů více sjednotit v celkovém náletu hodin a zkušeností s určitým vybavením experimentu.



2 Cíle a hypotézy

Současný stav zkoumání problematiky nadměrného hluku v kokpitu nepřinesl jednoznačný výsledek. Přestože výkonnost pilotů je v posledních desítkách let velmi sledované téma, byl přijat úzus, že hluk v kokpitu nelze ovlivnit, a je tedy bez možnosti eliminace v případě letecké dopravy. Cílem práce je zaměřením se na všechny limitace prací, které se danému tématu věnovaly v minulosti, a snahy o jejich odstranění. Zároveň půjde o sestavení kvalitního experimentu, který bude mít na vstupu relevantní a ověřitelná data. Důležitým úkolem je také navrhnout experiment tak, aby co nejvíce odrážel skutečné provozní podmínky, kterým jsou piloti během letu vystaveni.

2.1 Cíle a částečné cíle

Cílem této práce je zhodnotit vliv hluku na přesnost pilotáže v průběh simulovaných letů. Pro naplnění cíle byly definovány částečné cíle. Prvním částečným cílem bylo vypracovat kvalitní rešerši a utřídit dosud zjištěné poznatky ve vztahu k výkonnosti pilota pod vlivem nadlimitního hluku. Zároveň identifikovat a popsat případné chyby, které se při zkoumání objevily, a pokusit se o zdůvodnění, proč se výsledky studií tak výrazně rozcházejí. Druhý částečný cíl zahrnoval snahu o eliminaci identifikované limitace a implementaci nápravných opatření do návrhu experimentu a vyhodnocení výsledků. Třetím částečným cílem bylo vytvořit programové vyhodnocení a zvolit vhodnou statistickou metodu, která ob stojí při zpracování a vyhodnocení jednotlivých odchylek každého z experimentálních letů. Čtvrtým částečným cílem bylo interpretovat dosažené výsledky a formulovat smysl a výstup práce tak, aby byl užitečný při tvorbě nápravných opatření v praxi a byl zajištěn i reálný přínos této práce. Veškeré tyto částečné cíle celkově tvoří jádro mé práce.

2.2 Otázky

Na základě vyjádřených cílů této práce je snaha najít odpovědi na následující otázky:

1. Je efekt vlivu hluku v hodnotách z reálného prostředí na výkonnost posádky negativní?
2. Je možné snížit případný negativní dopad na výkonnost snížením hladiny intenzity?
3. Jsou nějaké možnosti, jak snížit hlukovou expozici posádky?



2.3 Hypotézy

Do tvorby této práce se vstupuje s následujícími hypotézami:

1. Vliv hluku na výkonnost posádky má negativní charakter.
2. Snížení hladiny akustického tlaku má pozitivní vliv na výkonnost.
3. Určitá hladina akustického tlaku může působit pozitivním efektem na výkonnost.

V rámci stanovených hypotéz je třeba podotknout, že výsledky dřívějších studií ukazují, že efekt hluku na výkonnost posádky má negativní i pozitivní charakter. Následující protichůdnost tvrzení je dána nesouladem výsledků studií. Pokud se však vezmou v potaz práce, které si vyloženě neodporují, bude získán podklad pro všechny stanovené hypotézy, se kterými se do experimentu vstupuje.



3 Metodika

3.1 Měření vstupních dat

Experiment byl sdílen s kolegou Martinem Ungrem, který z experimentu využil data pro sledování reakčního času. Výzkumy a experimenty předešlé poukázaly na několik limitací měření. V rámci této práce bylo rozhodnuto napravit zmíněné vady a vyjít ve svém měření z reálných a ověřitelných dat. Tato data byla následně využita jako vstupní parametry tohoto experimentu. Jeho cílem bylo nastavit praktické měření na základě co nejpřesnějších podmínek, které odpovídají skutečnosti, a tedy prostředí, kde piloti dopravních letadel vykonávají svou pilotáž.

3.1.1 Spolupráce s leteckou společností

Student vysoké školy nemá mnoho možností naměření reálných dat. Proto byla v rámci přípravy uvedených experimentů kontaktována letecká společnost, která provozuje síť linkových (pravidelných), ale i charterových (nepravidelných) letů. Tato společnost působí na leteckém trhu po několik let a má flotilu velmi oblíbených letadel ve smyslu počtu vyrobených kusů. V rámci konzultace se zástupcem leteckého oddělení bylo přijato rozhodnutí, že měření se uskuteční na letounu typu Boeing 737 verze 700 (B737-7). Volba tohoto typu byla výhodná v několika aspektech. Tento typ letounu se řadí mezi nejpočetnější v leteckém světě [5]. Zároveň je velmi početný i ve společnosti, se kterou byla vedena spolupráce. Bylo tedy mnohem jednodušší zorganizovat měření.

3.1.2 Příprava praktického měření

V rámci přípravy byl vybrán let s letounem B737-7 a standardní linkový let z letiště Praha-Ruzyně v České republice na letiště Costa del Sol Airport ve Španělsku. Tento let byl vhodný svou přiměřenou délkou tři hodiny a 15 minut. Leteckou společností byla odsouhlasena osobní přítomnost v kokpitu letounu po celou dobu letu tak, aby bylo měření co nejrelevantnější. Pro měření byl zakoupen hlukoměr značky PDEME 130 A1 (PARKSIDE, Neckarsulm, Německo) s odchylkou až ± 3 dB(A). Jedná se o ruční a komerčně nejdostupnější přístroj pro měření hluku. Ve zbytku práce se bude vyskytovat hladina akustického tlaku pouze s jednotkou dB(A). Jelikož dB(A) je vážený měřicí systém, který se snaží napodobit citlivost lidského ucha na různé frekvence. Je založen na křivkách A-váhy, které odrážejí citlivost lidského ucha v rozsahu slyšitelných frekvencí. Užití jednotky dB(A) je často používáno v kontextu hlučnosti a výzkumů ohledně hluku, protože poskytuje hodnotu, která je pro lidské vnímání relevantnější než pouhé měření v dB [29]. Taktéž přístroj pro měření hluku na výstupu využívá jednotky



dB(A). V rámci bezpečnosti je třeba zmínit osobní účast na předletovém briefingu společně s posádkou. Bylo velmi důležité se s posádkou domluvit na charakteru měření tak, aby se mohlo uskutečnit za asistence jejích členů. Kokpit dopravního letounu je poměrně stísněné místo a veškerý výzkumníkův pohyb po kokpitu byl omezen na usazení se na sedačku za kapitána a prvního důstojníka. Nikterak nemohl omezit nebo ohrozit práci pilotů svým pohybem po kokpitu. Posádka souhlasila s kooperací při měření, kdy v určitých fázích letu bylo provedeno měření předáním ručního přístroje do rukou posádky. Posádka byla instruována a seznámena s obsluhou přístroje podle přiloženého návodu.

3.1.3 Průběh praktického měření

Samotné měření bylo zaměřeno na let v cestovní hladině, jelikož cílem výzkumu nebylo měřit výkonnost posádky v rámci této práce při stoupání nebo klesání v terminologii letu obchodní letecké dopravy. Celková doba od prvního dílčího měření po poslední byla 120 minut. Celkem bylo provedeno deset dílčích měření. V každém dílčím měření se měřilo na osmi místech, konkrétně na pozici kapitána, prvního důstojníka, třetího pilota a u čelního skla. Pravidlem bylo provést měření na levé i pravé straně. Důvod tohoto postupu byl jednoznačný. Z teoretického základu vyplývá, že šíření zvukové vlny je velmi ovlivněno prostorem a vzdáleností k přijímači, v tomto případě k hlukoměru. Pilot tedy může vnímat jinou úroveň hlasitosti levým a pravým uchem. Tento rozdíl je vytvořen odlišnou vzdáleností levého a pravého ucha, dosahující svých maximálních hodnot v případě zdroje 90 stupňů vlevo nebo vpravo od osy hlavy. Samotný záznam hodnot byl proveden metodou maximální hodnoty po dobu 10 sekund. Touto funkcí byl přístroj vybaven. Po záznamu naměřené hodnoty byl hlukoměr ihned přiložen na opačnou stranu měřeného místa. Celkem bylo tedy v každém dílčím měření provedeno osm záznamů hlasitosti. Při pohledu na celkový záznam hodnot lze najít mírné kolísání hodnot hluku. Tento efekt je způsoben škálou rychlostí, na které se letoun v cestovní fázi letu pohybuje. Jelikož je hluk v kabině tvořen převážně hlukem aerodynamickým, vliv rychlosti letu je tedy významný. Výstup z toho měření je uveden v tabulce 3.1.



3.1.4 Vyhodnocení měření

Měření tedy sestávalo z celkem 10 dílčích měření. Hodnoty všech dílčích měření z každé pozice byly následně zprůměrovány. Důvodem tohoto postupu je zjistit přibližnou hodnotu, jaké jsou piloti dopravních letadel vystaveni. Hodnoty hluku v kabině se odlišují i u stejných typů letounů. Důležitá kritéria, která se podílí na výsledném hluku, jsou typ letounu, zde lze zařadit konstrukci a použité materiály, dále stáří letounu a celkový stav letounu, v tomto kritériu se na výsledném hluku podílí i vibrace letounu – například opotřebení a celková historie provozu a údržby. Důležité pro tento experiment tedy bylo najít přibližnou hodnotu v rozmezí ± 3 dB(A) (což je i garantovaná odchylka přístroje), která se reálně v provozu vyskytuje. Podle této zprůměrované hodnoty, jež odpovídá rozsahu pozic, ve kterých se pilot dopravního letounu běžně v rámci výkonu práce vyskytuje, byla následně nastavena maximální hodnota hluku daného experimentu. Je potřeba zdůraznit, že aktuálně se v provozu vyskytuje nespočet typů dopravních letounů a nastavit experiment podle jedné úrovně hlasitosti tak, aby odpovídal všem typům, je nemožné. V rámci selekce byla tedy snaha vybrat typ provozně nejvíce zastoupený a hodnoty hluku, které se vyskytují nejčastěji v běžných provozních podmínkách. Cílem nebylo vytvořit a následně simulovat extrémní a vzácné podmínky provozu letecké dopravy.

Tabulka 3.1: Data z měření v kokpitu

Měření hlukové zátěže (dB(A))									
Pozice měření v kokpitu	Kapitán		První důstojník		Jump seat		Čelní sklo		
	Strana:	Levá – okno	Pravá	Levá	Pravá – okno	Levá	Pravá	Levá	Pravá
Měření:	1.	91,3	90,1	90,3	92,1	87,9	87,8	97,9	97,9
	2.	92,7	90,9	91,1	93,2	88,1	88,2	98,8	98,6
	3.	92,9	91,2	91,5	93,2	88,8	89,1	98,8	98,8
	4.	93,4	91,6	91,4	94,1	89,9	89,7	98,7	98,9
	5.	93,9	92,0	91,9	94,4	88,4	88,3	99,2	99,3
	6.	94,5	92,8	92,0	94,7	87,5	87,3	100,1	100,2
	7.	94,2	92,3	92,1	94,5	87,9	87,6	97,7	97,1
	8.	93,7	92,1	91,9	94,2	85,3	85,1	97,8	97,9
	9.	93,4	91,6	91,4	93,5	85,1	85,2	97,1	97,3
	10.	92,8	90,9	91,1	92,8	85,0	84,9	96,8	96,5
Průměr:		93,28	91,55	91,47	93,67	87,39	87,32	98,29	98,25
		92,415		92,57		87,355		98,27	
	92,6525								



3.2 Sestavení experimentu

V rámci procesu odstranění limitací byly vytvořeny priority, které musí definovat experiment. Z důvodu orientace této práce na piloty méně zkušené, tedy s úplným minimem nalétaných hodin nebo pod minimem toho, co pilot dopravního letadla může mít. Cílem bylo nasimulovat reálné podmínky dopravního letadla a jejich vliv na velmi málo zkušené piloty s nízkým náletem hodin. Simulovaný let se tedy uskutečnil na statickém simulátoru B737-7, herní rozhraní však bylo nastaveno na letoun typu Cessna 172. Důvody byly obtížnost a finanční zátěž, kterou by způsobilo případné využití full-motion (simulátor pohybující se kolem tří os) letového simulátoru pro typ B737-7. Zároveň takovéto řešení nabízí spoustu prostoru pro úpravy, jelikož takový simulátor vlastní Ústav letecké dopravy Fakulty dopravní ČVUT.

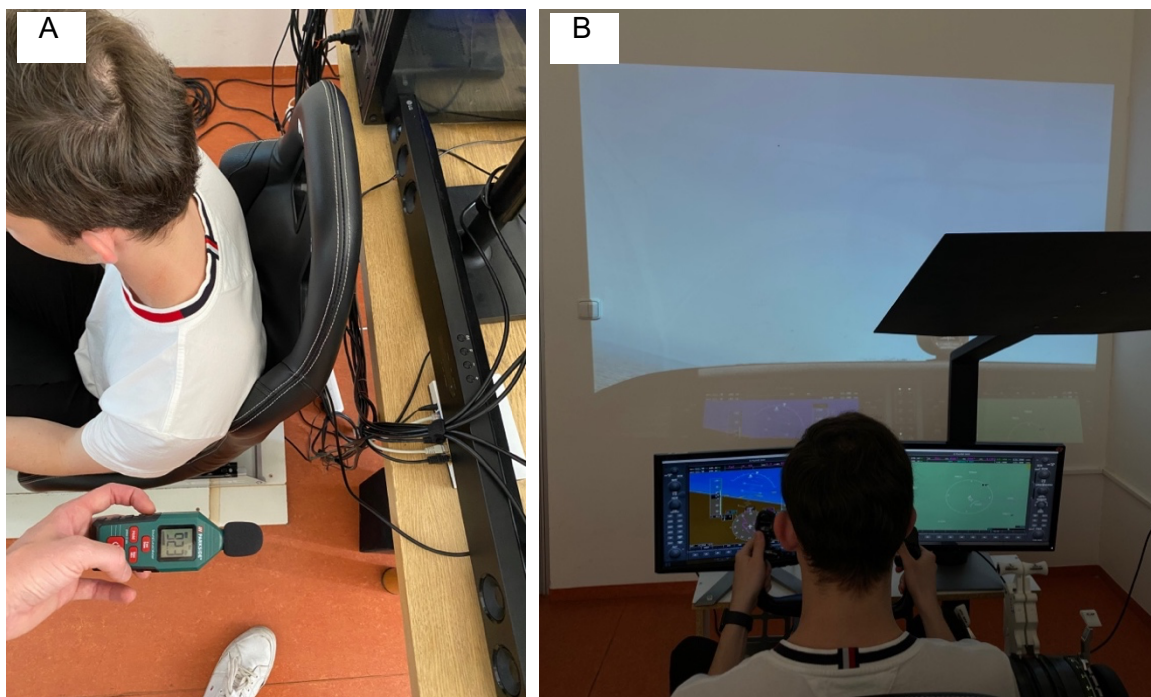
3.2.1 Letecký simulátor

Pro experiment byl využit letový simulátor, který využívá prostředí komerčně dostupné hry X-Plane. Tato hra je velmi oblíbená převážně pro velmi realistické zachycení fyzikálního prostředí a jeho působení na letadlo. Zároveň umožňuje obsáhlou extrakci dat ze simulovaného letu. Taktéž podporuje reálné zobrazení zeměkoule, včetně GPS-souřadnic. Tohoto faktu bylo využito při vkládání traťových bodů, ze kterých sestávala referenční trať. Prostředí hry X-Plane 11 poskytuje i další výhodu, a to libovolnou selekci typu letounu, jehož let se bude simulovat. Pro experiment byl zvolen letoun C172 SP – G1000. Tento typ letounu se řadí mezi nejrozšířenější výcvikové letouny na světě. Jeho ovládání je tedy přizpůsobeno zkušenostem pilotů s takto nízkým počtem nalétaných hodin. Dalším důvodem pro výběr tohoto typu byla potřeba co nejvíce izolovat subjekty od rušivých vlivů, které by se mohly negativně projevit na výsledku této studie. Pilot – student s celkovým náletem do 200 hodin – má nulové nebo minimální zkušenosti na vícemotorových letounech. Pilotáž takovýchto typů je velmi náročná a existuje důvodné podezření, že subjekt poprvé pilotující vícemotorový letoun během experimentu by byl pod velkým vlivem stresu z neznámého. Konkrétně tedy pilotáže nového typu letounu. Zároveň by se jeho pozornost silně upírala ke zvládnutí techniky pilotáže. Jednomotorový letoun C-172 představoval tedy volbu, která v nejvyšší míře odstranila všechny potenciální rušivé vlivy.

Letoun byl ve variantě G1000, což znamená výbavu glass-cocpit (integrované displeje zastupující většinu letových přístrojů s analogovým výstupem). Na tuto výbavu byl každý ze subjektů zvyklý, nebo s ní alespoň část výcviku absolvoval. Jedná se tedy o další krok ke standardizaci mezi subjekty a snahu o odstranění případných nechtěných vstupů do výsledku měření.

Simulátor byl umístěn v izolované místnosti bez jiných zdrojů hluku. Pro vizuální výstup z prostředí hry X-Plane byl nainstalován projektor, který promítal na stěnu ve vzdálenosti dva metry od očí subjektů tak, aby simulovaný výhled co nejvíce odpovídal reálnému letu. Pilot před sebou měl dále dva monitory, které byly využity pro výstup PFD (Primary Flight Display, systém zobrazující výstupy aerometrických přístrojů) a ND (Navigation Display, systém zobrazující navigační vedení). Tím byly zaručeny ostrost a kvalita obrazu tak, aby nevedly při letu k nadměrnému soustředění při odečítání hodnot letu.

Pro samotnou expozici hluku byly za hlavu pilota umístěny reproduktory (viz obrázek 3.1. A), které simulovaly vliv a distribuci hluku v kabině dopravního letounu. Jejich nastavení a hlasitost byly před každým simulovaným letem ověřeny pomocí ručního hlukoměru tak, aby každý subjekt byl vystaven stejné expozici. Za tímto stanovištěm se nacházel prostor pro práci dozorujícího pracovníka. Měl zde zdvojený výstup tak, aby mohl po celou dobu simulovaného letu kontrolovat hodnoty hluku a stav letu subjektu (viz obrázek 3.1. B).

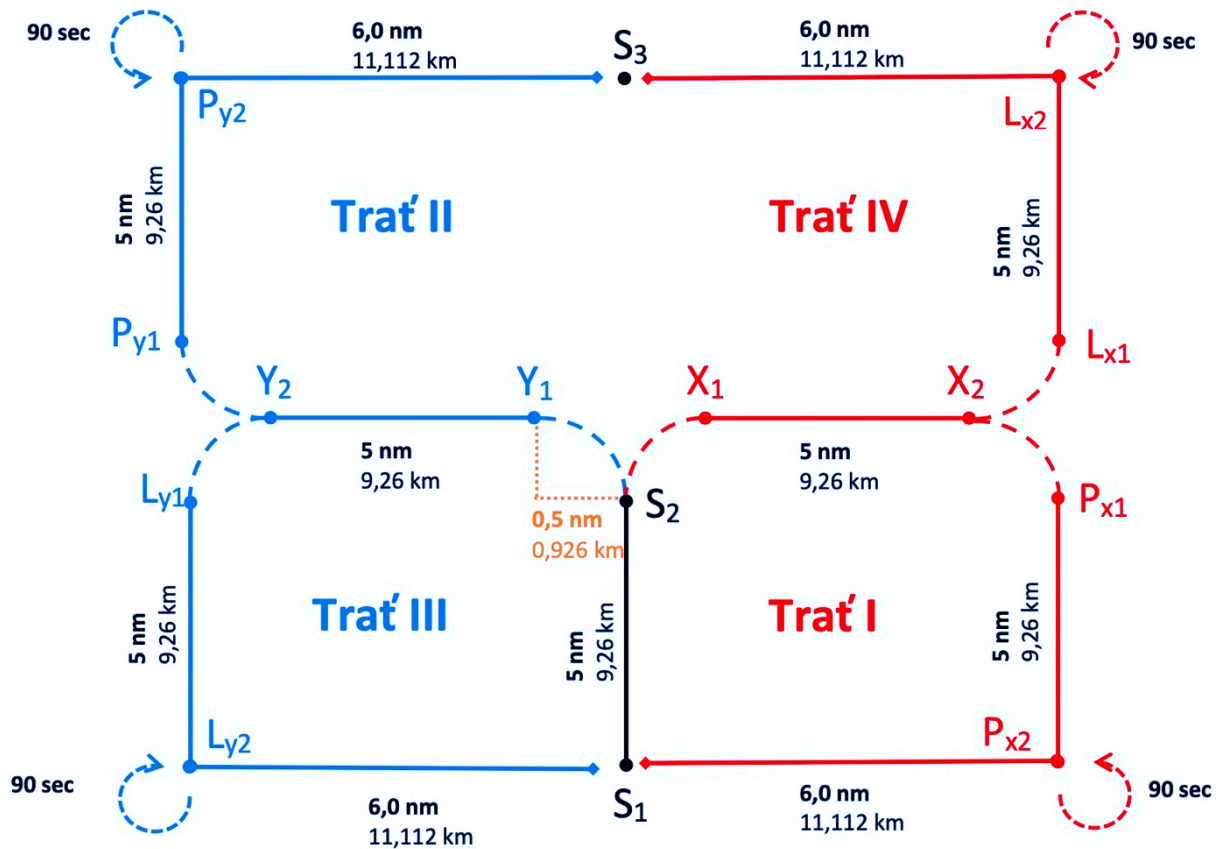


Obrázek 3.1: A: Kontrolní měření hladiny akustického tlaku, B – usazení subjektu



3.2.2 Návrh tratě simulovaného letu

Prostředí hry X-Plane umožňovalo vytvoření vlastních tratí na základě GPS-souřadnic. Celkem byly vytvořeny čtyři tratě. Důležitým úkolem bylo vytvořit tratě tak, aby každá obsahovala stejný počet letěných prvků, avšak v různém pořadí. Výsledkem je fakt, že subjekt uletí stejnou vzdálenost, stoupání/klesání stejného výškového rozdílu a stejný počet zatáček, avšak stále tak, aby neměl dost prostoru na odhalení vzorce a zvyknutí si na trať. Každé rameno jedné tratě, která byla tvořena v pravouhlé soustavě souřadnic, bylo dlouhé 5 námořních mil. Zároveň bylo rameno měřeným úsekem. Tato skutečnost byla oznámena i subjektům před samotným letem. Zatáčky mezi jednotlivými rameny nebyly měřeny. Každá trať obsahovala stejný počet klesacích a stoupacích úseků, zatáček a pokaždé vždy jednu procedurální zatáčku. Zde je důležité poznamenat, že se nejedná o termín používaný při letu podle přístrojů, ale ve smyslu točení na opačnou stranu o 270 stupňů místo 90 stupňů nejkratší vzdáleností. Druhá trať byla zamýšlena pro hlukovou expozici v nejvyšší hladině, tedy 92 dB(A). Třetí trať pak obsahovala hladinu akustického tlaku 70 dB(A). Čtvrtá trať tvořil náhradní pokus v případě výskytu situace, která by natolik znehodnotila výsledek měření, že by se nesměla použít. Mezi takovéto situace můžeme zahrnout náhlou nevolnost, vyrušení při experimentu třetí osobou nebo jiné nahodilosti. Horizontální situace experimentu je uvedena na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Horizontální situace tratí

Detailní trasování experimentu bylo následující:

Trať I: $S_1 - S_2 - X_1 - X_2 - P_{X1} - P_{X2} - S_1$ (bez hlukové zátěže).

Trať II: $S_1 - S_2 - Y_1 - Y_2 - P_{Y1} - P_{Y2} - S_3$ (maximální hluková zátěž 92 dB(A)).

Trať III: $S_1 - S_2 - Y_1 - Y_2 - L_{Y1} - L_{Y2} - S_1$ (střední hluková zátěž 70 dB(A)).

Trať IV: $S_1 - S_2 - X_1 - X_2 - L_{X1} - L_{X2} - S_3$ (variabilní záložní trať).



3.2.3 Subjekty

Celkový počet subjektů byl 20. Cílem práce bylo odstranit nedostatky předešlého výzkumu, včetně poměrně nízkého počtu subjektů v určitých případech. Věk subjektů se pohyboval od 20 do 25 let a zastoupena byla obě pohlaví. Celkový nálet se pohyboval od 80 do 170 hodin. Všechny subjekty byly součástí pilotního integrovaného výcviku dvou leteckých škol. Důležitou podmínkou pro zařazení do experimentu a studie byla znalost systému G1000. Koncept tohoto vybavení je velmi specifický a případná neznalost systému by mohla negativně ovlivnit měřená data. Cílem bylo vyhledat subjekty v pilotním výcviku s relativně malým náletem hodin reprezentující nezkušeného a praxí nezátíženého pilota tak, aby byl ověřen vliv hluku na výkonnost. Každý subjekt byl podroben dotazníkovému šetření, které bylo následně anonymizováno. Dotazník byl zaměřen na věk, pohlaví, celkový nálet hodin a zkušenost s potřebnými systémy a přístroji.

3.2.4 Průběh experimentu

V úvodu celého experimentu byl subjekt seznámen s detailním průběhem měření. Pro tento účel byla vytvořena krátká prezentace, kde byla popsána celá sekvence měření, včetně jednotlivých letů. Byl kladen důraz na vysvětlení předávání pokynů od dozorcující osoby. Na závěr úvodního seznámení subjekt podepsal informovaný souhlas s průběhem experimentu i souhlas se zpracováním osobních údajů. Experiment se uskutečnil podle platných zásad, předpisů a mezinárodních směrnic pro provádění výzkumu zahrnujícího lidské účastníky, přičemž byl schválen Komisí pro etiku ve výzkumu na Českém vysokém učení technickém v Praze pod jednacím číslem 0001-01/23/51903/EKČVUT. Během samotného letu byly vždy před další částí tratě předány instrukce verbálně. Pro názornost zde uvedu konkrétní příklad:

Dozorující osoba: „*Po dotočení zatáčky následuje stoupání z altitude (výšky) 4 000 ft (stop) do altitude 5 000 ft. Doporučená IAS je 104 kt a vertical speed (vertikální rychlost) 300 až 400 ft/min.*“

Subjekt: „*Rozumím.*“

Cílem bylo poskytnout subjektům určitý nástroj pomoci orientace a navigace. Jelikož však účelem bylo zkoumání schopnosti a přesnosti pilotáže, bylo nutné nechat veškeré opravy na vůli subjektu. Výsledkem tedy bylo vytvoření jakéhosi koridoru ideálních hodnot pro co nej přesnější let podle referenční tratě. Již během úvodní prezentace však bylo upřesněno, že



se jedná pouze o doporučené hodnoty a jejich využití/nevyužití je plně na svobodném rozhodnutí subjektu. Výsledkem tedy bylo nastavení absolutní standardizace, včetně předávání pokynů subjektům v průběhu experimentu tak, aby všichni měli stejné podmínky a nepromítaly se do výsledků rušivé vlivy jiných osob. Po každém letu byl subjekt podroben pauze pěti minut, sloužící k neovlivňování jednotlivých letů navzájem. Po prvním letu následovalo nastavení zvukového aparátu a fyzického ověření dodávané hladiny akustického tlaku ručním hlukoměrem. Tento krok byl velmi důležitý, jelikož bylo nutné zaručit přesnou dávku hluku na úrovni ušního aparátu subjektu. Pozice zvukového systému se tedy musela pokaždé upravovat podle výšky a usazení subjektu pro zaručení co nejvíce ideálních a standardizovaných podmínek.

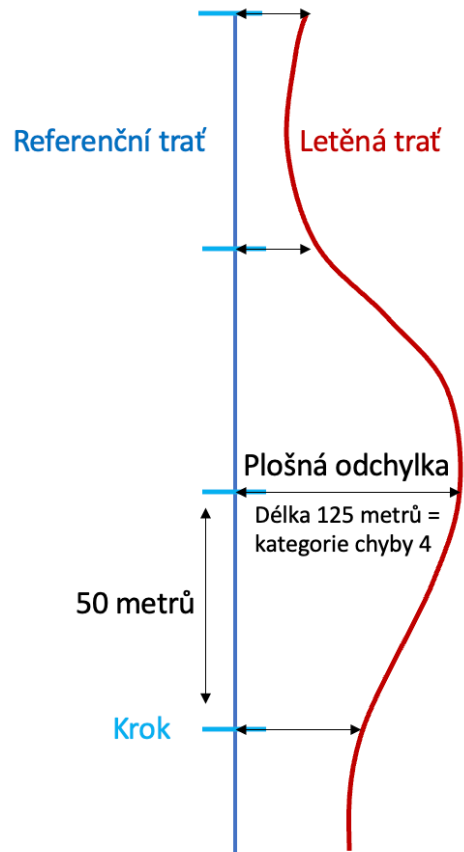
3.3 Sběr a zpracování dat

Ke sběru potřebných dat sloužila integrovaná schopnost prostředí X-Plane 11, která nabízí možnost extrahovat početné množství sledovaných parametrů letu. Pro naše účely byly však důležité jen zeměpisná šířka, zeměpisná délka a nadmořská výška.

3.3.1 Letová data

Letová data byla extrahována v textovém souboru přímo po každém letu. Vzorkovací frekvence byla přibližně 5 Hz. Důvodem pro extrakci po každém letu bylo zjednodušení programového ošetření vyhodnocování naměřených dat. Jelikož jednotlivé tratě byly pravoúhlého charakteru a obzvláště úsek $S_1 - S_2$ byl pro každou trať stejný, programové ošetření dat pouze z jednoho letu by bylo náročné. K potlačení procesu učení byly provedeny seznamovací lety. Tato data nebyla součástí vyhodnocení.

Programové ošetření vyhodnocení experimentu probíhalo v programu Matlab (MATLAB R2022a, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA). V rámci konstrukce celé bakalářské práce byly nadefinovány deviační chyby. Každý taková deviační chyba je přesná hodnota, o kterou se zvýšila plošná odchylka od referenční tratě během letu (viz obrázek 3.3). V rámci této práce bylo definováno osm kategorií deviačních chyb. Kategorizace je označena čísly 1 až 7 a poslední kategorie je označena jako X. Nad hodnotu odchylky 300 metrů už nebylo nutné dále vyhodnocovat, jelikož tato hodnota je hraniční pro požadovanou přesnost letu. Jednotlivé hodnoty plošné odchylky byly přiřazeny vzestupně (viz tabulku 3.2).



Obrázek 3.3: Konstrukce deviačních chyb

Tabulka 3.2: Kategorizace deviačních chyb

Kategorie chyb	Do vzdálenosti (m)
1	25
2	50
3	100
4	150
5	200
6	250
7	300
8 (X)	více než 300



Jako deviační chyba se počítala nejvyšší hodnota, kterou v určitém bodě trati dosáhla odchylka od referenční tratě. Tedy pokud byla odchylka pro uvedení příkladu 226 metrů, byla přičtena hodnota 1 do celkové počtu chyb kategorie 6 (viz obrázek 3.3). Mimo tento systém deviačních chyb byl pro každý ze čtyř úseků letěné tratě vyhodnocena průměrná plošná odchylka. S touto odchylkou bylo následně počítáno a tato hodnota byla statisticky zhodnocena. Jelikož kategorie a počty deviačních chyb přímo souvisí s plošnou odchylkou, nebylo nutné je taktéž statisticky analyzovat. Tyto deviační chyby sloužily pouze jako další způsob sledování a popisu letěné tratě.

3.3.2 Programové vyhodnocení

Na úvod programu byl vyvolán textový soubor s daty z letěné tratě. Následně byla vygenerována letěná trať s využitím zeměpisné šířky, zeměpisné délky a nadmořské výšky. Pro definici referenční tratě byly použity GPS (Global Positioning System) souřadnice spolu s výškou. V následujícím kroku byl proveden převod referenčních bodů a letové trasy na systém ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed).

ECEF-systém bývá využíván globálními satelitními navigačními systémy pro určování pozice vůči zemi a řadí se mezi kartézské systémy. Výhoda toho systému spočívá v tom, že rotuje společně se zemí, a není tedy inerciální. Střed systému je v těžišti země a osy jsou dány následovně – osa z směřuje na sever, osa x směřuje do průsečíku nultého poledního a rovníku a osa y tento systém doplňuje v pravoúhlé soustavě směrem na východ [13] [14].

Dále byl vytvořen referenční vektor. V rámci tohoto kroku se počítala i přesná délka úseku referenční tratě. Hned v úvodu bylo nutné vytvořit dostatečně široký koridor, který zabrání uvažování dat z protilehlých datových bodů. Takovýto koridor byl vytvořen o šířce 2 námořní míle se středem na referenční trati. Hodnota 2 námořní míle nemá konkrétní opodstatnění, jedná se pouze o hodnotu takovou, aby bylo zaručeno přiřazování hodnot z aktuální části trati, nikoliv protilehlé. Tato hodnota musela být nižší než 2,5 námořní míle, avšak vyšší než jakákoliv nejzazší hodnota letěné tratě. V rámci grafického ověření bylo prokázáno, že žádný subjekt se neodchýlil více než 2 námořní míle od referenční trati. Podél této tratě byl vytvořen systém kroků přesně po 50 metrech, ve kterých probíhalo vyhodnocení deviačních chyb. Pokud byl poslední krok kratší než 50 metrů, nezahrnul se do vyhodnocení. Hodnota 50 metrů byla nastavena jako vzorkovací frekvence pro přesnější grafické vyhodnocení než v případě 100 metrů. Vyšší frekvence by však vedla k příliš velkému množství dat s přihlédnutím k rychlosti letu a ke schopnosti měnit dráhu letu. Následovala iterace přes kroky pro výpočet a rozřazení deviačních chyb. V každém tomto bodě se hledala nejkratší vzdálenost k letové



trase subjektu. Stejným principem se vyhodnocovala plošná odchylka, avšak v opačném pořadí. Důvod takového ošetření je dán možným různým počtem záznamů. Pro každý záznam se tedy našla nejkratší cesta k referenční trati. Tato hodnota byla uložena a následně na konci programu byly všechny hodnoty tohoto úseku zprůměrovány. Tímto krokem se vyloučil jakýkoliv nesoulad v počtu záznamů v rámci letů, ale i subjektů.

Na závěr došlo k textovému vyhodnocení plošné odchylky a deviačních chyb. Taktéž bylo ošetřeno automatické vygenerování matice s hodnotami plošných odchylek a deviačních chyb pro budoucí použití jak textového, tak statistického vyhodnocení měření. Celý tento program byl čtyřikrát pod sebou reprodukován v podobném provedení, avšak pokaždé s jinými vstupními daty, jež definovala dva body, ze kterých se počítala referenční trať.

3.4 Statistické vyhodnocení

V rámci programového ošetření byly pro každý subjekt vytvořeny tři matice hodnot. Každá z těchto matic měla rozměr 9×4 . V prvním řádku byly vypsány čtyři hodnoty průměrných plošných odchylek (pro každý leg trati jedna). V dalších osmi řádcích byly vypsány hodnoty všech skupin deviačních chyb. Celkem tedy bylo vygenerováno 60 matic s hodnotami plošných odchylek a deviačních chyb. Tyto matice sloužily jako vstupní data pro statistickou analýzu dat.

3.4.1 Friedmanův test

Použití statistických testů je klíčovým nástrojem pro vyhodnocování dat a testování hypotéz ve vědeckém výzkumu. Nicméně někdy není možné použít konkrétní parametrické testy, které předpokládají normální rozložení dat. Když data nevykazují normální rozložení, může to mít vliv na výsledky testu a vést ke špatné interpretaci [16]. Za účelem ověření normality dat byl proveden Shapiro–Wilkův test, který nepotvrdil normalitu dat [23] [24]. Existuje několik důvodů, proč nemůžeme použít parametrické testy u dat, která nemají normální rozdělení. Prvním důvodem může být malý počet pozorování, což může způsobit, že testy ztrácejí na síle a spolehlivosti. Dalším důležitým důvodem může být nehomogenita rozptylu mezi skupinami, což narušuje předpoklady parametrických testů [15]. V takových případech, kdy není možné splnit předpoklady parametrických testů, je vhodné použít nějaký neparametrický test. Jedním z nejpoužívanějších neparametrických testů je Friedmanův test. Tento test se používá v případě, kdy máme více než dvě skupiny opakovaných měření (opakované vzorky u stejných subjektů v rámci jiných vstupních podmínek) a chceme zjistit, zda existuje signifikantní rozdíl mezi skupinami [17].



Friedmanův test je založen na pořadí dat, což znamená, že není závislý na předpokladech o rozložení dat. Tento test vyhodnocuje fakt, zda jsou rozdíly mezi hodnotami v různých skupinách statisticky významné. Výběr Friedmanova testu místo parametrických testů je tedy rozumným rozhodnutím, pokud máme důvodné podezření, že naše data nemají normální rozložení, anebo když nejsme schopni splnit předpoklady parametrických testů. Friedmanův test nám umožňuje objektivně posoudit statistickou významnost rozdílů mezi skupinami bez závislosti na podmínce normality dat [17].

Pro každou trať byly tedy celkem čtyři hodnoty plošných odchylek. Aby se dospělo pouze ke třem hodnotám pro každý subjekt, bylo potřeba původní čtyři hodnoty plošné odchylky pro každý let zprůměrovat. Tento postup byl dán omezením Friedmanova testu.

Průměr je užitečným ukazatelem střední hodnoty datové sady, ale sám o sobě neposkytuje informaci o rozptylu nebo variabilitě dat. Směrodatná odchylka poskytuje představu o míře, jakou se hodnoty v datové sadě odlišují od průměru. Pokud jsou hodnoty blízko průměru, bude směrodatná odchylka malá, což ukazuje menší variabilitu. Naopak velká směrodatná odchylka naznačuje, že hodnoty mají větší rozptyl. Při používání statistických testů, jako jsou například test normality dat nebo test rozdílů mezi skupinami, je důležité, abychom uvažovali směrodatnou odchylku. Tyto testy zohledňují rozptyl dat a mohou poskytnout další informace o distribuci datové sady. Dále je důležité při prezentaci výsledků uvést nejen průměr, ale i směrodatnou odchylku. To poskytne informaci o míře variability dat a spolehlivosti průměru. Celkově lze uvést, že uvažování o směrodatné odchylce je klíčové pro lepší porozumění datům, identifikaci odlehlých hodnot, statistické vyhodnocení a interpretaci výsledků. Kombinace průměru a směrodatné odchylky poskytuje ucelenější pohled na charakteristiky datové sady.

3.4.2 Post hoc-analýza

Pokud Friedmanův test potvrdí alternativní hypotézu, tedy zamítne nulovou hypotézu, výstupem je prokázání závislosti v rámci různých vstupních podmínek [28]. V tomto případě tedy potvrdí, že existuje statisticky významná závislost mezi úrovní hluku a plošnou odchylkou. Tento fakt je sám o sobě bez větší výpovědní hodnoty. Další logický krok tedy představuje post hoc-analýza. Pro tuto analýzu jsem využil funkci *multcompare*, která vrátí matici výsledků z testu vícenásobného porovnání s použitím informací obsažených ve *stats-struktuře* předešlého Friedmanova testu. Každý průměr skupiny je reprezentován symbolem a interval je reprezentován čarou vyčnívající ze symbolu. Průměry dvou skupin jsou výrazně odlišné, pokud jsou jejich intervaly disjunktní (nemající společné hodnoty, tedy jejich množiny se neprotínají) [18].



4 Výsledky

V rámci prezentace výsledků bude kromě výsledných hodnot Friedmanova testu a post-hoc analýzy hojně využíván tzv. krabicový graf (dále „box plot“). Box plot je grafická vizualizace statistických dat, která zobrazuje distribuci a rozptyl hodnot v datové množině. V programu Matlab je tento typ grafu snadno vytvořitelný pomocí funkce *boxplot*. Při popisu tohoto grafu definujeme na červenou úsečku, která zobrazuje medián prezentovaných hodnot. Modrý obdélník nebo čtverec svou horní a dolní stranou reprezentuje horní a dolní kvartil hodnot. Černá úsečka představuje maximum (horní vnitřní hrabdu) nebo minimum (dolní vnitřní hrabdu). Pokud se v grafu vyskytnou červené kříže mimo tuto oblast, jedná se o odlehlé nebo extrémní hodnoty [19].

4.1 Všeobecné výsledky

Výsledky Friedmanova testu se ukázaly průkazné pro potvrzení alternativní hypotézy, tedy že hluk má vliv na výkonnost pilota během letu, konkrétně tedy na přesnost pilotáže. Následná post hoc-analýza prokázala statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými úrovněmi hlasitosti ve dvou porovnáních ze tří.

4.1.1 Friedmanův test

Friedmanův test měl na vstupních datech matici hodnot o rozměru 20×3 . V této matici byly v každém řádku, reprezentujícím jeden subjekt, tři hodnoty plošných odchylek, pro každý let jedna. Výsledky Friedmanova testu prokázaly hodnotu $p \approx 0,00016$, což je hodnota mnohem menší než zvolená úroveň statistické významnosti (0,05). Je tedy nutné zamítnout nulovou hypotézu, že úroveň hlasitosti nemá statistický vliv na výkonnost pilota během letu. Automaticky se tedy přijímá alternativní hypotéza o statistickém vlivu hluku na výkonnost pilota. V případě Friedmanova testu směrodatné odchylky bude získána hodnota $p \approx 0,0005$. Na zvolené hladině statistické významnosti (0,05) bude tedy opět zamítnuta nulová hypotéza ve prospěch alternativní hypotézy. V obou případech byla prokázána závislost hluku na výkonnosti pilota.

4.1.2 Post - hoc analýza

Friedmanovým testem se prokáže/neprokáže určitá závislost. Pokud je však záměrem zjistit, která konkrétní podmínka má vliv, a porovnat tak jednotlivé lety mezi sebou, je nezbytné využít post hoc-analýzu. Tato analýza porovná jednotlivé hladiny akustického tlaku mezi sebou (celkem tedy tři porovnání a tři výsledky) a definuje konkrétní hladiny, které mají statistický vliv.



V rámci této analýzy se porovnávání týkalo (1) nulové (referenční) hladiny, (2) maximální hladiny a (3) střední hladiny akustického tlaku. Výsledky pro průměrné plošné odchylky jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Výsledné p-hodnoty průměrných odchylek

p-hodnota	2 - maximální hladina akustického tlaku	3 - střední hladina akustického tlaku
1 - nulova (referenční) hladina akustického tlaku	1,0000	0,0047
2 - maximální hladina akustického tlaku	-	0,0002

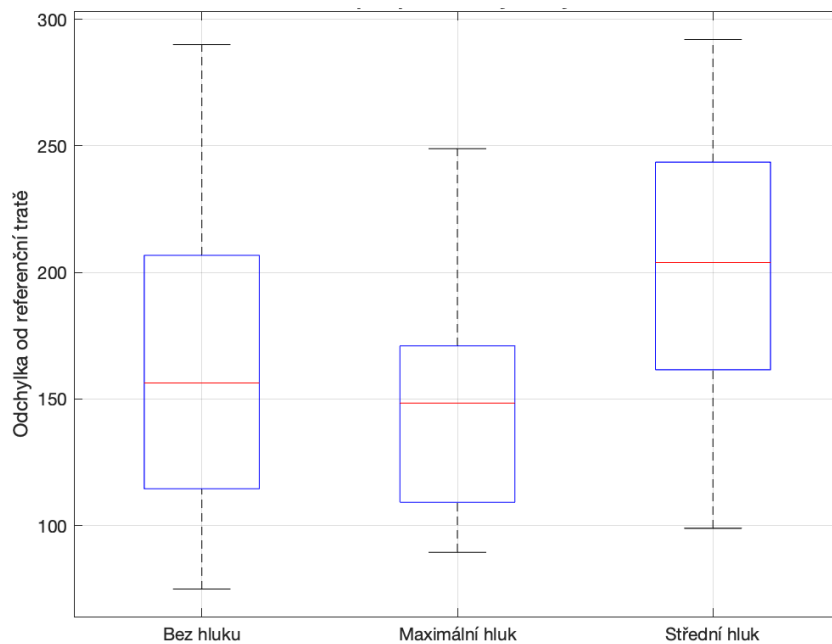
Výsledné p-hodnoty post hoc-analýzy pro průměrné plošné odchylky prokázaly vliv hlasitosti na přesnost pilotáže při porovnání mezi nulovou a střední hladinou akustického tlaku a mezi maximální a střední hladinou akustického tlaku. Následovala post hoc-analýza směrodatných odchylek s hodnotami (viz tabulku 4.2).

Tabulka 4.2: Výsledné p-hodnoty směrodatných odchylek

p-hodnota	2 - maximální hladina akustického tlaku	3 - střední hladina akustického tlaku
1 - nulova (referenční) hladina akustického tlaku	1,0000	0,0080
2 - maximální hladina akustického tlaku	-	0,0008

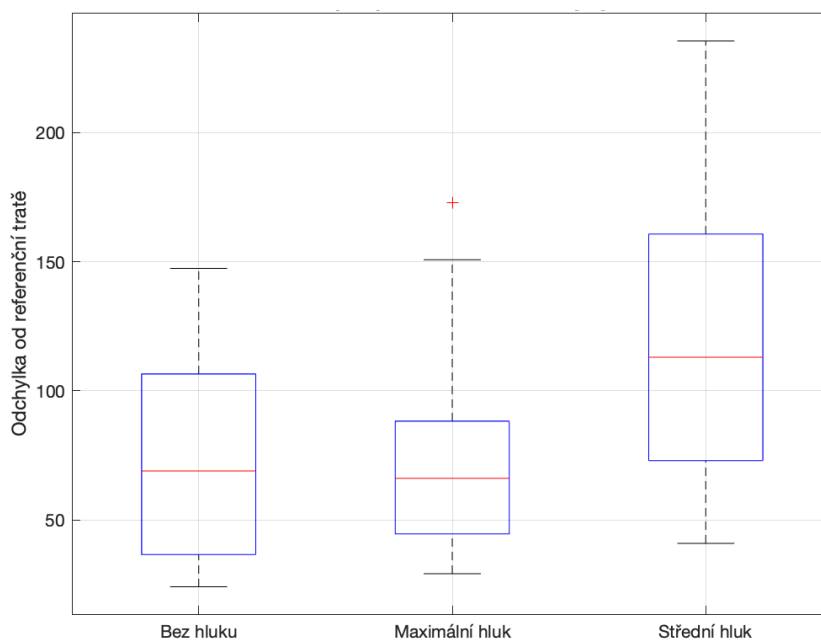
4.1.3 Grafické znázornění výsledků

Pro grafické znázornění výsledků byl zvolen tzv. box plot (krabicový graf). Grafické znázornění je velmi důležitá část prezentace výsledků, jelikož ani post hoc-analýza nedokáže určit, zda prokázaný vliv má negativní, nebo pozitivní smysl. To znamená, že bez grafické nebo jiné další interpretace nelze určit, zda došlo ke zlepšení, nebo zhoršení přesnosti pilotáže u subjektu.



Obrázek 4.1: Grafické znázornění plošných odchylek

Grafická interpretace plošných odchylek potvrzuje publikované výsledky (viz obrázek 4.1). Dále lze z grafu určit, že prokázaný vliv hluku na přesnost pilotáže je v obou případech negativní. Medián hodnot se mezi prvním a druhým letem prokazatelně statisticky neodlišuje. Naopak při porovnání hodnot mezi prvním–třetím a druhým–třetím letem se statisticky výrazně odlišuje.



Obrázek 4.2: Grafické znázornění směrodatných odchylek

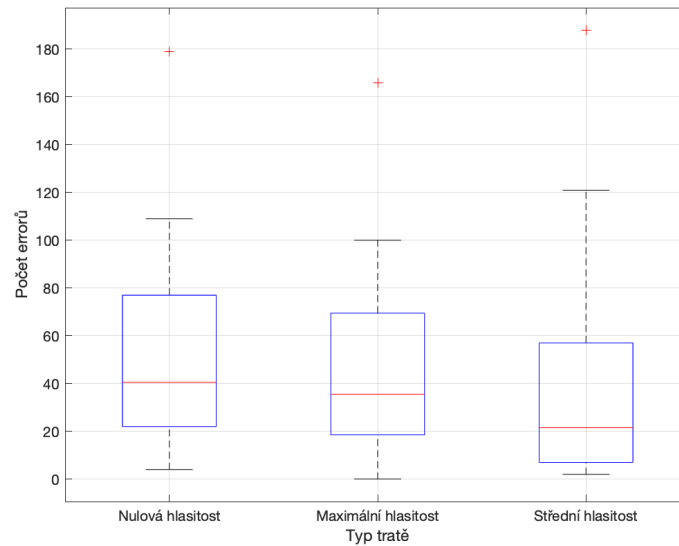
Obrázek 4.2 potvrzuje, že výsledky dosažené ze statistického a grafického vyhodnocení průměrných odchylek nejsou v rozporu se stejným vyhodnocením směrodatných odchylek, a i zde se prokázal negativní vliv při porovnání první–třetí a druhý–třetí let.

4.2 Vyhodnocení deviačních chyb

V práci jsem již zmínil definování tzv. deviačních chyb, které jsou rozděleny do osmi kategorií podle hodnoty plošné odchylky. Krokování bylo nastaveno po 50 metrech délky referenční tratě. V každém tomto kroku se vyhodnotila plošná odchylka letěné tratě od tratě referenční. Následně došlo k rozdělení do skupin podle hodnoty plošné odchylky, konkrétně tedy do 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300 a více než 300 metrů. Tyto deviační chyby pomohou lépe popsat vývoj odchylek při porovnání jednotlivých úrovní hluků a budou využity jako další nástroj popisu a interpretace naměřených dat.

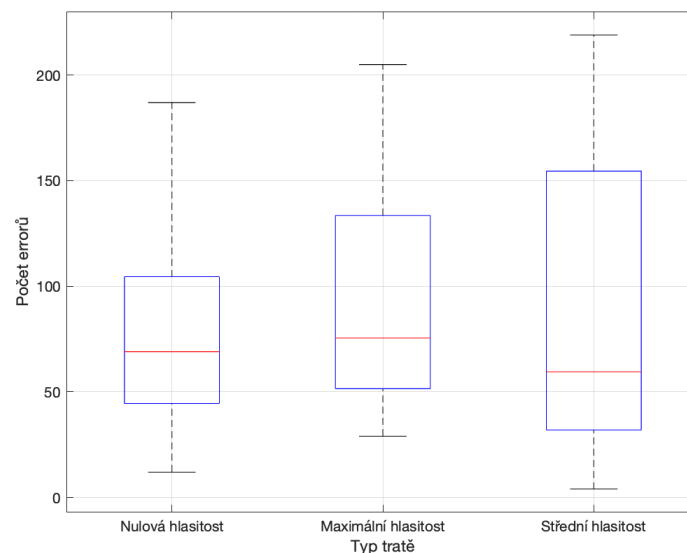
4.2.1 Grafický výstup deviačních chyb

Stejně jako v případě grafického vyhodnocení průměrných plošných odchylek a směrodatných odchylek, i pro vyhodnocení deviačních chyb byl využit tzv. box plot.



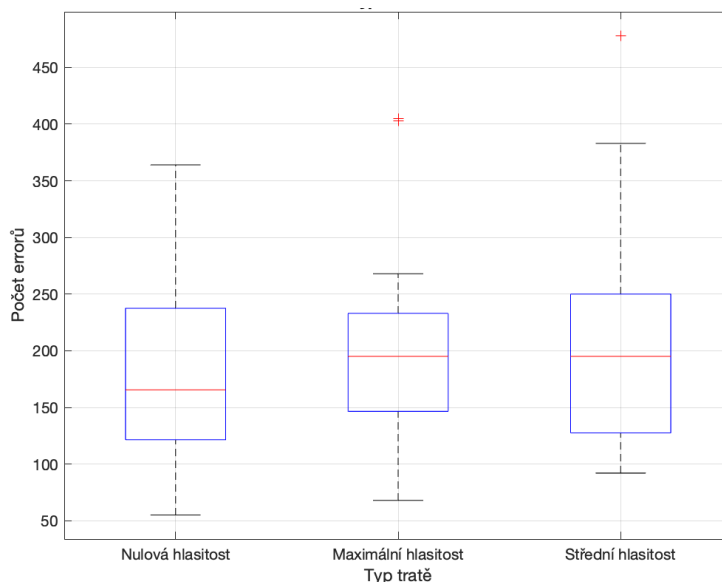
Obrázek 4.3: Grafické vyhodnocení chyb – typ 1

Obrázek 4.3 ukazuje grafické vyhodnocení chyb – typ 1, tedy odchylky do 25 metrů od referenční tratě. Graf naznačuje, že počet chyb mírně klesal v průběhu experimentu napříč jednotlivými lety.



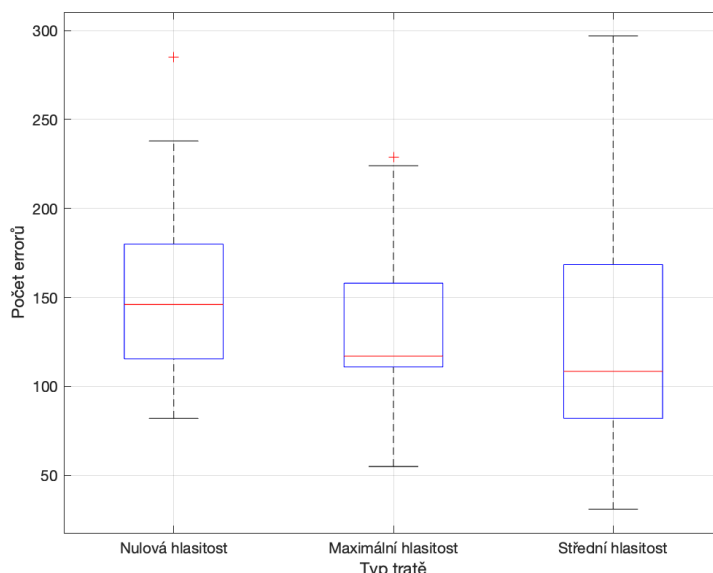
Obrázek 4.4: Grafické vyhodnocení chyb – typ 2

Obrázek 4.4 ukazuje grafické vyhodnocení chyby – typ 2, tedy odchylky do 50 metrů od referenční tratě. V porovnání s chybou typu 1 dochází k nárůstu výskytu chyb u maximální hladiny akustického tlaku, zároveň dochází k nárůstu rozptylu a mediánu u střední hlasitosti.



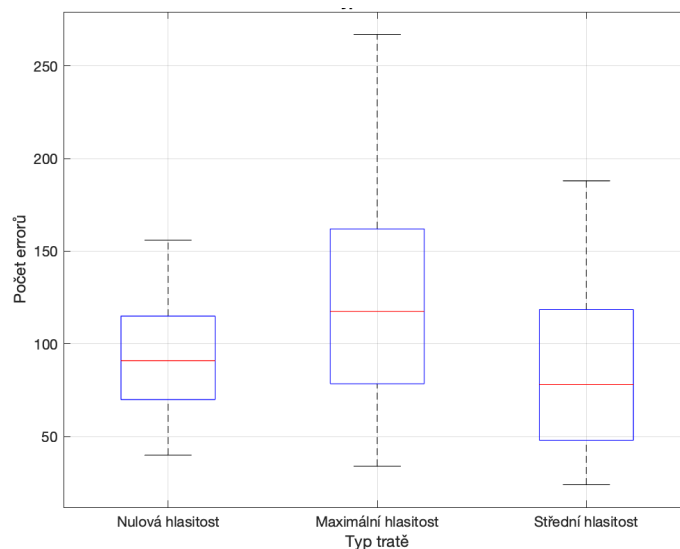
Obrázek 4.5: Grafické vyhodnocení chyb – typ 3

Grafické vyhodnocení chyby – typ 3, tedy do 100 metrů plošné odchylky, ukazuje pozvolna se zvyšující počet deviačních chyb při letu pod zatížením střední hlasitostí hluku. Zároveň se výrazně navýšil celkový počet chyb tohoto typu (viz obrázek 4.5).



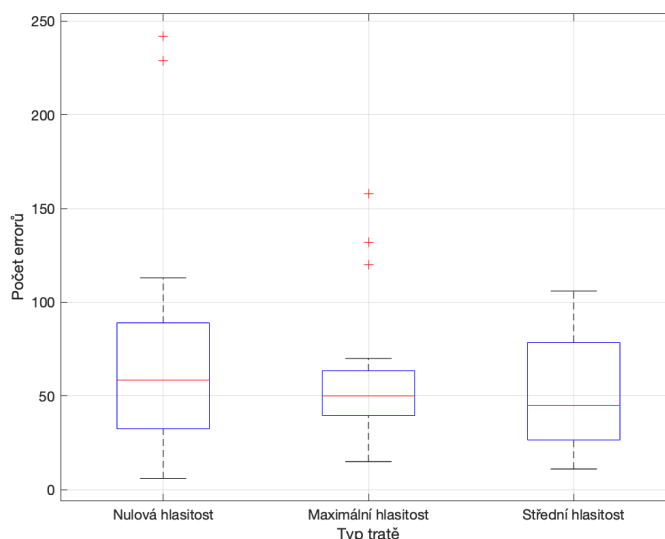
Obrázek 4.6: Grafické vyhodnocení chyb – typ 4

Obrázek 4.6 zachycuje deviační chyby do 150 metrů plošné odchytky. Zde je poměrně zajímavý výrazný úbytek výskytu chyb při střední úrovni hlasitosti. Naopak silně dominantní výskyt má nulová hlasitost.



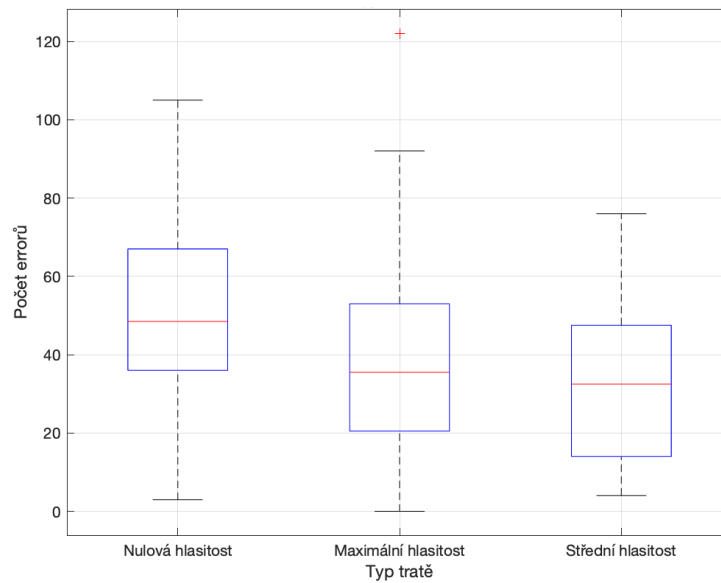
Obrázek 4.7: Grafické vyhodnocení chyb – typ 5

Obrázek 4.7 znázorňuje deviační chyby do 200 metrů plošné odchytky. V této kategorii je dominantní výskyt chyb při maximální hlasitosti. Naopak střední hlasitost dosahuje nejnižšího mediánu.



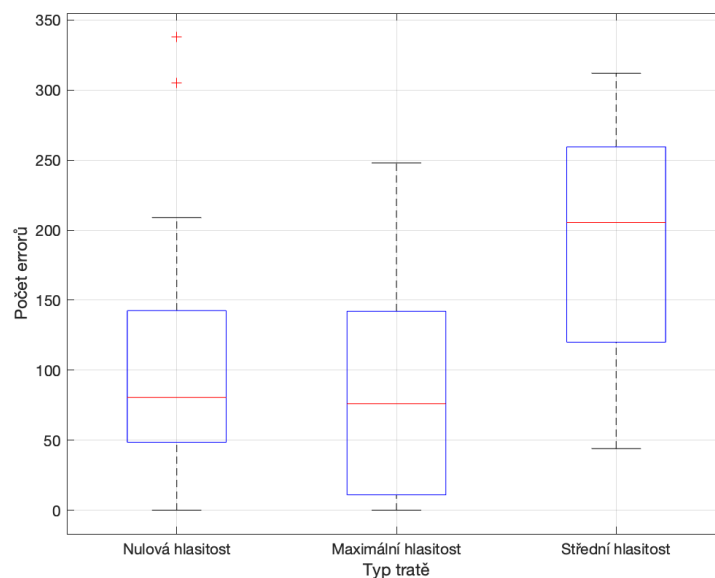
Obrázek 4.8: Grafické vyhodnocení chyb – typ 6

S přibývajícím skupinou chyb dochází ke zvyšování jejich vlivu na průměrnou plošnou odchytku. Typ 6 je odchytkou do hodnoty 250 metrů. Obrázek 4.8 ukazuje velmi podobné rozložení počtu chyb, avšak stále nejvíce jich bylo zaznamenáno při letu s nulovou hlasitostí.



Obrázek 4.9: Grafické vyhodnocení chyb – typ 7

Typ 7 deviačních chyb obsahuje odchylky do 300 metrů. Takovéto chyby se už výrazně propisují do konečného výsledku průměrné odchylky. Obrázek 4.9 ukazuje silně dominantní výskyt chyb u nulové hlukové zátěže. Naopak maximální a střední hluková zátěž se v rámci mediánu pohybují na podobných hodnotách.



Obrázek 4.10: Grafické vyhodnocení chyb – typ 8 (typ X)



Deviační chyby typu 8 (nebo taktěž X) jsou odchylky, které svou hodnotou přesáhly hranici 300 metrů. Tyto chyby se nejvíce podepisují na finálním výsledku a obrázek 4.10 ukazuje největší mediánový výskyt u letu pod vlivem střední hlasitosti. Nulová a maximální hlasitost jsou svými hodnotami velmi podobné. Lze tedy konstatovat, že převážně skupina chyb typu 8 (X) nejvíce ovlivnila finální hodnoty průměrné odchylky.



5 Diskuse výsledků

Ačkoliv soubor subjektů pocházel z celkem dvou odlišných leteckých škol, jedná se o školy s vysokým standardem kvality výcviku a zaměřením na výchovu dopravních pilotů. Zároveň se v každé ze škol v určité fázi výcviku vyskytují lety v letounech s potřebným systémem G1000, podle kterého byl nastaven a simulován experiment.

Hypotéza o vlivu hluku a jeho negativním efektu na výkonnost posádky se přijímá. Práce prokázala negativní vliv hluku na výkonnost pilota, avšak pouze při určité hlasitosti. Jelikož je tato problematika velmi komplikovaná, bylo nutné studii rozdělit na lety krátkodobé a dlouhodobé. V rámci této práce došlo ke zkoumání pouze krátkodobých letů. Schopnost odolávat negativním vlivům totiž úzce souvisí s případnou únavou pilota. Na výkonnost má významný vliv míra vzrušení (nabuzení) [21]. Odpočatý pilot je tedy schopen mnohem více odolávat negativním vlivům. Míru vzrušení zvyšuje i stres – respektive spouštěč budící reakce organismu. Mezi tyto spouštěče se řadí taktéž hluk. Pokud pilot začne vnímat silný subjektivní diskomfort, může tato skutečnost zvednout dočasně hladinu stresu, a zvýšit tak nabuzení. Jako konsekvenci můžeme pozorovat zvýšení výkonnosti. Tato skutečnost by vysvětlovala lepší výsledky v přesnosti pilotáže subjektů pod zatížením maximální hlasitosti hluku. Naopak střední hlasitost se mohla projevat podprahově, a nedošlo tedy k potřebnému nabuzení organismu. Zde je potřeba podotknout, že zcela odlišný výsledek se může projevit u dlouhodobého letu. Pokud dojde k přetížení organismu nebo se zvýší únava, dojde k úpadku výkonnosti pilota [20] [22].

Vyhodnocení naměřených dat taktéž ukazuje, že není přínosné snižovat hluk na nulovou úroveň. Druhá hypotéza se tedy zamítá. Indikátory výkonnosti pilotů v prostředí s nulovou intenzitou dosahují podobných hodnot jako v prostředí s hlasitostí o síle 92 dB. Snahy o maximální eliminaci hluku v kabině dopravního letounu by byly extrémně finančně náročné a krajně neproveditelné. Ve vztahu k letům o délce do 30 minut tedy není důvod nějak zvlášť snižovat hluk v kokpitu. Zde je však potřeba podotknout, že tento efekt se může drasticky lišit při zvýšení délky simulovaných letů. V úvahu je potřeba vzít snahy o snížení expozice posádky pomocí sluchátek s aktivním tlumením v posledních letech. Komerčně nejoblíbenější model těchto sluchátek je schopen snížit hluk aktivním tlumením až o 30 % v porovnání s pasivní redukcí běžných leteckých sluchátek. Hluk o síle 92 dB(A) se tedy může teoreticky snížit až na 70 dB(A). S ohledem na výsledky této práce se však toto snížení jeví jako nepotřebné a také kontraproduktivní v souvislosti s lety do 30 minut [25].

Třetí hypotéza o pozitivním efektu určité hladiny akustického tlaku se přijímá. Výsledky vyhodnocení deviačních chyb prokázaly, že hluk nemá téměř žádný vliv na malé výchyly do



100 metrů. Výjimku zde tvoří výchylky do 25 metrů, kdy nejvíce hodnot zastoupil let bez hlukové zátěže (graf 1 až 4). Vyhodnocení deviačních chyb se v grafech 5 až 7 náhodně rozložilo a není možné zde ustanovit vzorec, který by popisoval distribuci těchto chyb. Největší přínos však mají výsledky grafu 8. Tento graf reprezentuje deviační chyby skupiny 8, tedy odchylky větší než 300 metrů. Odchylky větší než 300 metrů se pro potřeby této práce hodnotily jako nepřesný let. Hodnota 300 metrů vychází jako zaokrouhlená přibližná hodnota po převodu 0,15 námořní míle na metry. Dvojnásobek této hodnoty představuje přesnost letu označovanou jako RNP 0,3. Představuje tak důležitý pojem pro přesné provedení letu [26]. Tyto výsledky ukazují silnou dominanci výskytu chyb v případě letu pod střední hlukovou zátěží. Lze tento fakt interpretovat tak, že největších chyb se piloti dopouští pod střední hlukovou zátěží. Zároveň právě tyto chyby nejvíce ovlivnily hodnoty průměrné plošné odchylky, jelikož jsou spolu úzce provázány. Pomáhají tak interpretovat výsledky průměrné plošné odchylky a deviační chyby.

Bylo zjištěno, že není důvodné snižovat hluk na minimální úroveň. Zároveň bylo prokázáno, že určitá hlasitost hluku může působit příznivě na výkonnost pilota. V tomto případě se hlasitost 92 dB(A) jeví jako výrazně méně riziková než hlasitost 70 dB(A). Přestože se piloti pod touto expozicí dopouští většího množství menších odchylek než v případě střední hlasitosti, naopak kritické deviační chyby větší než 300 metrů se dopouští výrazně méně.



6 Závěr

Výzkum měl za cíl zhodnotit vliv hluku na výkonnost posádky. Práce je výsledkem sdíleného experimentu sestaveného na základě reálných naměřených podmínek z kokpitu dopravního letadla. Cílem bylo sestavit kvalitní experiment, který odstranil nedostatky z předešlých studií. Výsledky prokázaly negativní vliv určitých hlasitostí hluku v kokpitu na výkonnost posádky. Konkrétně se podařilo prokázat negativní vliv při přechodu z nulové hlasitosti do prostředí s hlasitostí o síle 70 dB(A) a při přechodu z maximální hlasitosti o síle 92 dB(A) do prostředí o síle 70 dB(A), v obou případech v neprospěch hlasitosti 70 dB(A). Taktéž bylo zjištěno, že piloti se dopouští mnohem více deviačních chyb v prostředí o maximální intenzitě 92 dB(A), avšak kritických a limitních deviačních chyb nad 300 metrů se nejvíce dopouští v prostředí o hlasitosti 70 dB(A). Není tedy důvod snižovat hluk v kokpitu. Piloti by neměli využívat funkce aktivního tlumení hluku při letech do délky 30 minut. Takovéto užití se ukázalo kontraproduktivní.

Práce měla několik limitací. Přestože se podařilo překonat počtem subjektů téměř všechny předešlé studie, celkový počet 20 subjektů se stále nejeví dostatečný. Tato práce byla omezena počtem subjektů především vzhledem k omezeným možnostem nábory dobrovolníků. Aby nebyla narušena standardizace, podobnost výcviku a zkušeností subjektů, bylo nutné vybírat subjekty pouze ze dvou leteckých škol. Ani jedna ze škol však nemá k dispozici ideální počet studentů, kteří by svým počtem splnili nároky tohoto výzkumu. Jako další nedostatek se jeví vybavení laboratoře. Především simulátor schopný pohybu kolem všech tří os by mnohem lépe simuloval reálné prostředí, avšak takovéto vybavení je finančně velice náročné a aktuálně není k dispozici.

Přestože se výzkumu v rámci této práce účastnilo 20 subjektů, podařilo se tímto počtem překonat většinu prací předešlých. Tím se zvyšuje statistická hodnota a validita naměřených dat. Definováním deviačních chyb se podařilo lépe textově i graficky interpretovat data, jelikož prosté vyhodnocení průměrné plošné odchylky by se mohlo jevit jako nedostatečné. Bylo tak možné sledovat distribuci chyb v závislosti na hluku a jejich velikosti v celkem osmi skupinách. Dále se prokázala nevhodnost užití sluchátek s aktivním tlumením pro lety trvající méně než 30 minut. Při takovýchto letech by bylo vhodné užití sluchátek pouze s pasivním tlumením tak, aby nedocházelo ke snížení expozice hluku na hlasitost o hodnotě 70 dB(A), jelikož v této kategorii dochází ke skokovému nárůstu kritických chyb. V rámci spolupráce s leteckou společností, která umožnila naměření reálných dat z prostoru kokpitu při standardním linkovém letu, bylo odsouhlaseno sdílení výsledků této práce. Přínos tohoto kroku spočívá ve zvýšení letecké bezpečnosti a povědomí o této problematice tak, aby bylo možné aplikovat doporučení z této práce přímo do praxe a reálného prostředí.



Budoucí vědecký výzkum v souvislosti s problematikou hluku v kokpitu a jeho vlivu na posádku by se měl zaměřit na lety dlouhodobé, resp. delší než 30 minut. Při letech v této kategorii se mohou výsledky diametrálně lišit od výsledků v této práci, a jedná se tak o další logický krok pokrytí celé problematiky. Zároveň by bylo příhodné zvýšit počet subjektů a rozšířit počet skupin různých intervalů celkového náletu.



7 Seznam použité literatury

- [1] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 9788001024607.
- [2] HOLCMANOVÁ, Naďa. *Hluk a zdraví v pracovním prostředí. Poškození zdraví způsobené hlukem*. Praha, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, 3. lékařská fakulta. Vedoucí práce Evžen Hrnčíř.
- [3] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1980.
- [4] EVEREST, F. Alton and Ken C. POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. 7th ed. New York: McGraw Hill, 2022. ISBN 9781260473599.
- [5] Boeing: Fact sheets [online]. Arlington: Boeing, 2019 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: <https://investors.boeing.com/investors/fact-sheets/default.aspx>
- [6] ZHANG, Yifan et al. Environmental noise degrades hippocampus-related learning and memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118.1: e2017841117
- [7] KUJALA, Teija a Elvira BRATTICO. Detrimental noise effects on brain's speech functions. *Biological psychology*, 2009, 81.3: 135-143.
- [8] BALLARD, Joan C. Assessing attention: Comparison of response-inhibition and traditional continuous performance tests. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 2001, 23.3: 331-350.
- [9] NWABEKE, Kelechi. *The effect of cockpit noise on aircraft pilot psychomotor performance*. Embry-Riddle Aeronautical University, 2001.
- [10] IVOŠEVIĆ, Jurica, Tino BUCAK a Petar ANDRAŠI. Effects of interior aircraft noise on pilot performance. *Applied Acoustics*, 2018, 139: 8-13
- [11] BAO, Jun-Ping, You-Chao SUN a Xin-Chao LIU. Research on Pilot Situation Awareness in Noise Environment. In: *2019 4th International Conference on*



Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT). IEEE, 2019. p. 129-133.

[12] MELLERT, Volker et al. Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots. *Aerospace Science and Technology*, 2008, 12.1: 18-25.

[13] JAKUBÍČEK, PRÁCE PATRIK. Systém pro sledování trajektorie objektů pohybujících se v prostoru. *Vutbr. cz*.

[14] NOVÁK, PRÁCE PAVEL. ANALÝZA POUŽITELNOSTI GPS DAT PRO NAVIGACI MOBILNÍHO ROBOTU.

[15] HUDECOVÁ, Šárka. Matematická statistika. *Matematická sekce: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova v Praze*, 2012.

[16] SOUKUP, Petr. Nesprávná užívání statistické významnosti a jejich možná řešení. *Data a výzkum–SDA Info*, 2010, 4.2: 77-104.

[17] GABRHEL, Vít. *Repeated-measures Anova*. *Fakulta sociálních studií Masarykova univerzita v Brně*, 2016

[18] *MathWorks: HelpCenter* [online]. Natick, Massachusetts [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://ch.mathworks.com/help/stats/multcompare.html>

[19] MAREK, Jaroslav. *Popisná statistika*. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky, 16. 3, 2009, 16-18.

[20] YERKERS, Robert M. a Johny D. DODSON. The relation of strength of stimuli to rapidity of habit-formation. *Journal of comparative neurology and psychology*. 1908, 18.5, pp. 459-482.

[21] ATPL ground training series: Human Performance and Limitations. EASA revised first edition. Oxford: CAE Oxford Aviation Academy, 2014. ISBN 978-1906202712.



- [22] MAREK, Moštěk. *Vliv řízeného odpočinku na výkonnost pilota*. 2023. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [23] UGLICKICH, E. Přednáška 11- Testy pro diskrétní data: Text. In: Statistika. [online]. Praha: Institute of Information Theory and Automation. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: http://staff.utia.cas.cz/uglickich/pdfka/PrednaskaSTAT11_DISTAN.pdf
- [24] NAGY, Ivan a Pavla PECHERKOVÁ. STATISTIKA [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <http://staff.utia.cas.cz/uglickich/pdfka/Statistika.pdf>
- [25] BOSE A20 [online]. Headset. 2021 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://boseaviation-emea.aero/media/pdf/Bose-Feature_2022-08-10-143452.pdf
- [26] SkyBrary: Required Navigation Performance (RNP). *SKYbrary Aviation Safety* [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/required-navigation-performance-rnp>
- [27] ANÍSA, Kabarová. *Hluková analýza zvukových signálů*. 2015. Bachelor's Thesis. Vysoké učení technické v Brně.
- [28] SHAN, Guogen; GERSTENBERGER, Shawn. Fisher's exact approach for post hoc analysis of a chi-squared test. *PloS one*, 2017, 12.12: e0188709.
- [29] KNAUERT, Melissa, et al. Comparing average levels and peak occurrence of overnight sound in the medical intensive care unit on A-weighted and C-weighted decibel scales. *Journal of critical care*, 2016, 36: 1-7.