



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

**Vliv hluku na reakční čas pilota**  
**Influence of Noise on Pilot Reaction Time**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojkách

Studijní obor: Profesionální pilot

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

---

**Martin Ungr**

Praha 2023



**K621.....Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Martin Ungr**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**bakalářský – PIL – Profesionální pilot**

Název tématu (česky): **Vliv hluku na reakční čas pilota**

Název tématu (anglicky): Influence of Noise on Pilot Reaction Time

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zhodnotit vliv hluku na reakční čas pilota. Práce vychází z předpokladu, že zvýšená intenzita hluku bude pilota negativně ovlivňovat.
- Vykonejte analýzu současného stavu zaměřenou na problematiku hluku a jeho vlivu na výkonnost člověka v kontextu reakčního času. Primární zaměření analýzy by mělo být na oblast letectví.
- Na základě analýzy současného stavu navrhnete experiment, prostřednictvím něhož bude možné zhodnotit vliv hluku na reakční čas pilota. 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: Ozcan, H. Kurtulus, et al. "In-cabin noise levels during commercial aircraft flights". Canadian Acoustics (2006). Zeydabadi, Alireza, et al. "The effect of industrial noise exposure on attention, reaction time, and memory." International archives of occupational and environmental health (2019).

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.

Martin Ungr  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 7. října 2022



## Abstrakt

Vliv hluku na výkonnost pilota je v rámci letecké medicíny diskutovaným tématem. V rámci pilotovy výkonnosti se však reakčnímu času nedostává zasloužené pozornosti a zpravidla je brán pouze jako jeden z parametrů celkové výkonnosti pilota. Jelikož se v pilotní praxi velmi často setkáváme s odkládáním pilotních headsetů v rámci letu a s ohledem na skutečnost, že současný výzkum je v této oblasti značně limitován, zdá se vhodné se problematice vlivu hluku na reakční čas pilota věnovat. Cílem práce tedy je odhalit vliv hluku na reakční čas pilota. Pro tyto účely byl sestaven experiment, jehož se zúčastnilo 20 mladých pilotů – studentů, pocházejících ze stejné věkové skupiny s převážně stejnými nálety a zkušenostmi. Během tří simulovaných letů s délkou 30 minut byly subjekty podrobeny sérii tří letů pod různou hlukovou zátěží (55, 92 a 70 dB(A)). Hodnoty hladin intenzity zvuku vycházely z měření provedeného v kokpitu letounu B737-700 v průběhu standardního obchodního letu z Prahy do španělské Malagy. Na základě výsledků lze konstatovat, že nebyl nalezen statisticky významný vliv hluku na reakční čas subjektů.

**Klíčová slova:** bezpečnost v letectví, hluk, kokpit, reakční čas, pilot, výkonnost pilota





## Abstrakt

The effect of noise on pilot performance is a debated topic within aviation medicine. However, reaction time does not receive the attention it deserves and is usually considered only as one of the parameters of overall pilot performance. As it is very common in pilot practice to see pilot headsets being removed in flight, it would be appropriate to study the effect of noise on pilot reaction time more rigorously. This thesis is concerned with the study of the described problem. Based on a literature search, an experiment was designed to reveal the effect of noise on pilot reaction time. Twenty young student pilots, coming from the same age group with mostly the same flight experience, participated in the experiment. The subjects were subjected to a series of three simulated flights of 30 minutes duration under different noise levels (55, 92 and 70 dB(A)). The sound level values were based on measurements made in the cockpit of a B737-700 aircraft during a standard commercial flight from Prague to Malaga. The measured data were evaluated and no effect of noise on pilot reaction time was found.

**Keywords:** aviation safety, noise, cockpit, reaction time, pilot, pilot performance



## **Poděkování**

Děkuji Ing. Lence Hanákové, Ph.D. za odborné připomínky týkající se bakalářské práce, její dohled a především za její 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 spolužáky, kteří se více či méně ochotně účastnili měření na letovém simulátoru a především musím zmínit Tomáše Hofírka a jeho pomoc v rámci získání vstupních dat pro uskutečnění experimentu.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Vliv hluku na reakční čas pilota 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 27. července 2023

.....  
Podpis





## Obsah

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Teoretické základy práce</b>	<b>13</b>
1.1 Zvuk . . . . .	13
1.1.1 Hluk . . . . .	15
1.1.2 Legislativní požadavky na hluk v kabině . . . . .	16
1.2 Zdroje hluku v kokpitu letadla . . . . .	17
1.2.1 Letecká sluchátka s pasivním tlumením . . . . .	19
1.2.2 Letecká sluchátka s aktivním tlumením . . . . .	20
1.3 Reakční čas . . . . .	20
1.4 Situační povědomí . . . . .	22
1.5 Shrnutí kapitoly . . . . .	24
<b>2 Metody</b>	<b>25</b>
2.1 Účastníci experimentu . . . . .	25
2.2 Získání vstupních dat experimentu . . . . .	26
2.2.1 Naměřené hodnoty hladin intenzity v kokpitu B737-700 . . . . .	27
2.3 Návrh experimentu . . . . .	28
2.3.1 Průběh experimentu . . . . .	34
2.3.2 Měření reakčního času . . . . .	35
2.4 Statistické vyhodnocení dat . . . . .	38
<b>3 Prezentace výsledků</b>	<b>40</b>
<b>4 Diskuze výsledků</b>	<b>43</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>46</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>48</b>



## Seznam obrázků

1.1	Vážení hladiny intenzity zvuku různými filtry . . . . .	16
1.2	Popis rozhodovacího procesu pilota . . . . .	24
2.1	Ukázka měření hladiny intenzity zvuku v kokpitu letounu B737 . . . . .	27
2.2	Rozložení prvků letového simulátoru . . . . .	29
2.3	Návrh trati experimentu . . . . .	30
2.4	3D profil trati experimentu . . . . .	33
2.5	Měření reakčního času v rámci experimentu . . . . .	35
2.6	Aplikace pro měření reakčního času . . . . .	36
2.7	Sluchátka Telex Airman 750 . . . . .	38
3.1	Porovnání reakčních časů v rámci jednotlivých měření . . . . .	40
3.2	Porovnání směrodatných odchylek v rámci jednotlivých měření . . . . .	41
3.3	Správnost pilotovy reakce v rámci jednotlivých měření . . . . .	42



## Seznam tabulek

2.1	Hodnoty hladiny intenzity zvuku v kokpitu . . . . .	28
2.2	Zeměpisné souřadnice trati experimentu . . . . .	32
2.3	Doporučené režimy pro let v rámci jednotlivých tratí . . . . .	34





## Seznam symbolů a zkratk

AC	Poradní oběžník (Advisory Circular)
ANC	Aktivní potlačení hluku (Active Noise Cancellation)
ANVS	Systém aktivního potlačení hluku a vibrací (Active Noise and Vibration Suppression System)
ATC	Služba řízení letového provozu (Air Traffic Control)
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
CPL(A)	Průkaz obchodního pilota (letoun)
CS	Certifikační specifikace (Certification Specifications)
EASA	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (European Union Aviation Safety Agency)
EFIS	Elektronický letový přístrojový systém (Electronic Flight Instrument System)
FAA	Federální letecká správa (Federal Aviation Administration)
FAR	Federální letecké předpisy (Federal Aviation Regulations)
Fpm	Stopy za minuty (Feet per minute)
HSI	Indikátor horizontální situace (Horizontal Situation Indicator)
IAS	Indikovaná rychlost (Indicated Airspeed)
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organization)
IQR	Mezikvartilové rozpětí (Interquartile Range)
Kt	Uzel (Knot)
ND	Navigační displej (Navigation Display)
NIHL	Ztráta sluchu způsobená hlukem (Noise-Induced Hearing Loss)
PFD	Primární letový displej (Primary Flight Display)
PPL(A)	Průkaz soukromého pilota (letoun)
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SPL/SFCL	Průkaz pilota kluzáků
UAS	Bezpilotní systém (Unmanned Aerial System)
ULL	Ultralehký letoun
VMC	Meteorologické podmínky pro let za viditelnosti (Visual Meteorological Conditions)
VS	Vertikální rychlost (Vertical Speed)
ZLP	Způsobnost letových posádek



## Úvod

Od dávných dob kráčel člověk s hlavou upřenou k nebi, obdivující všechna létající stvoření naší planety a toužebným pohledem se k nim přál připojit. Nemůže být divu, že na sebe první létající stroje nenechaly dlouho čekat. Již na přelomu 18. a 19. století Sir George Cayley popsal několik návrhů aerodynamů, z nichž jeden roku 1849 vzlétl. Jednalo se o první let letadla těžšího vzduchu.

O několik desítek let později německý konstruktér Wilhelm O. Lilienthal započal s konstrukcí kluzáků, na kterých prováděl úspěšné lety. Smutnou skutečností je, že se mu jeho výtvořiny nakonec staly záhubou.

Vyvrcholení lidského snažení dob minulých nastalo 17. prosince roku 1903 v Severní Karolině na pláži Kitty Hawk, kdy se do vzduchu vznesl letoun bratří Wrightů – Wright Flyer. Byť od této doby uběhlo pouhých 120 let, mohli jsme již pozorovat nevídaný technologický rozmach leteckého průmyslu. První dopravní letouny na sebe nenechaly dlouho čekat a lidstvo se od plátěných konstrukcí letounů Farman přesunulo k přetlakovaným kabinám de Havillandu Comet a koncem 20. století k systému elektroimpulsního řízení systémem Fly-by-wire na letounech Airbus. Od konstrukčních omezení a technologických nedostatků jsme se svojí pílí dopracovali k technologické spolehlivosti a limitní dokonalosti, která dnes zajišťuje provoz mnohaset tunových kolosů přepravujících cestující přes celý svět. Takový rozmach by samozřejmě nebyl možný bez lidské schopnosti logického uvažování a tak se pravděpodobně i v daleké budoucnosti budeme stále setkávat s letadly řízenými člověkem – pilotem.

Pilot, stejně jako každá součást leteckého soukolí, čelí i přes naše snahy mnoha nepříznivým faktorům. Jedním z těchto faktorů je i hluk v kabině. Přesto, že si pilot nemusí být vědom ovlivnění své výkonnosti hlukem, opak je pravdou. Existuje nemalý počet článků, věnujících se ovlivnění pilotovy výkonnosti hlukem. V průběhu posledních několika let proběhla série různých měření a experimentů popisujících vliv hlukové zátěže na posádku letounů. Jejich závěry však nejsou konzistentní. Někteří autoři prezentují degradaci schopností vlivem hlukové zátěže, jiní hluku nepřikládají přílišného významu a najdou se i tací, kteří tvrdí, že určitá hladina intenzity zvuku působí na výkonnost posádek pozitivně. Žádný z těchto zdrojů však neřeší problematiku reakčního času přímo. Reakční čas je v člancích často popisován pouze jako jeden z indikátorů pilotovy výkonnosti. Nejen z těchto důvodů je předmětem bakalářské práce hlubší průzkum reakčního času pilota v závislosti na hluku.



Na základě osobní zkušenosti a diskuzí se zkušenými piloty je sundávání pilotních headsetů běžnou praxí velké většiny pilotů dopravních letadel. Tací piloti si tímto chováním mohou nevědomky snižovat své mentální kapacity, což může představovat značný problém, zejména v závěrečných fázích letu. Nehledě na značnou dávku lehkomyšlnosti, kterou takové jednání představuje, je mnohdy v rozporu s provozními postupy daného dopravce.

Na základě výše uvedeného je tedy cílem bakalářské práce poskytnout zhodnocení vlivu hluku na reakční čas pilota pomocí experimentu, jenž poslouží jako zdroj dat pro zhodnocení tohoto vlivu.





## 1 Teoretické základy práce

Problematika vlivu reakčního času pilota bývá v kontextu letecké medicíny řešena spíše na úrovni výkonnosti pilota jako celku, beroucího v potaz komplexní schopnost pilota práce v hlučném prostředí [1]. Hlavní překážkou při hledání zdrojů je včlenění reakčního času do celkové výkonnosti pilota, přičemž výzkumníci reakční čas často považují pouze za jeden z elementů výkonnosti pilota [2]. Při zkoumání problematiky musí být brán v potaz, kromě hladiny intenzity, nemalý počet proměnných, což výzkumnou činnost neulehčuje [3, 4, 5]. Omezený počet vědeckých publikací rovněž představuje určitou překážku pro zhodnocení současného stavu řešené problematiky.

### 1.1 Zvuk

Jelikož přítomnost zvuku a hluku představuje nutné předpoklady pro provádění výzkumu v rámci bakalářské práce, jsou tyto pojmy v následující kapitole představeny. Zvukem označujeme mechanické vlnění, které jsme schopni vnímat naším sluchovým aparátem. Frekvence, které jsme schopni vnímat, se ve zdrojích různí, každopádně všeobecně je bráno, že lidské ucho je schopno registrovat zvuky ve frekvenčním rozptýlu od 16 Hz do 20 000 Hz [6, 7]. Zvuky nacházející se pod tímto intervalem nazýváme infrazvukem, zvuky přesahující 20 kHz ultrazvukem. Pro příjem zvuku je třeba zařízení schopné převodu akustického signálu na signál elektrický. Tímto zařízením je mikrofón. Lidské ucho je principem fungování mikrofónu podobné, avšak procesy zajišťující převod mechanického vlnění na elektrický signál jsou fyziologického rázu s množstvím biochemických reakcí [8].

Zdroji zvuku jsou ve většině případů kmitající tělesa a pro jeho přenos je nutné médium, ve kterém se zvuk může šířit (nejčastější formou tohoto média je vzduch). Fyzikální vysvětlení šíření zvuku je založeno na změnách tlaku v rámci kontinua (kontinuem rozumíme model prostředí se zanedbáním jeho částicové struktury). Po provedení aproximací můžeme vzduch považovat za kontinuum. Umístěním zdroje zvuku do prostoru docílíme změn tlaku nejprve v blízkosti kmitajícího tělesa, posléze i v jeho okolí [9]. Zvuk se vzduchem šíří ve formě podélného postupného vlnění, což znamená, že částice kontinua kmitají ve směru šíření vlnění [10]. V obecné řeči můžeme šíření zvuku považovat za periodické stlačování a rozpínání vzduchu [10].

Pro popis zvuku je využíváno několik fyzikálních veličin, které jsou dále využívány v práci.



Akustický tlak  $p$  (Pa) představuje změny atmosférického tlaku, na něž je lidský sluch citlivý [6]. Větší změny akustického tlaku mají za následek zvětšení subjektivního vjemu hlasitosti určitého zvuku [6]. Akustický tlak klesá se vzdáleností od zdroje zvuku vlivem útlumu vlnění [7].

Šíření zvuku je spojeno s přenosem energie [6]. Akustickou energii  $E$  (J) přenesenou zvukovým vlněním popisuje akustický výkon  $P$  (W), který je definován jako

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (1.1)$$

kde  $\Delta E$  (J) představuje množství přenesené energie za časový interval  $\Delta t$  (s) [7].

Samotný akustický výkon ovšem neposkytuje intuitivní informaci o hlasitosti zvuku. Zavedením veličiny intenzita zvuku  $I$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) dostaneme představu o tom, jakým způsobem akustický výkon ovlivňuje vnímanou hlasitost. Vztahem

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1.2)$$

definujeme intenzitu zvuku  $I$ , kde  $\Delta P$  (W) je akustický výkon působící na plochu o velikosti  $\Delta S$  ( $\text{m}^2$ ) [11]. V lékařské praxi nalezneme dvě význačné hodnoty týkající se lidského sluchu. Prahem slyšitelnosti označujeme nejmenší změnu akustického tlaku, kterou jsem schopni sluchem zaznamenat [9]. Referenční prahovou hodnotu představují zvuky o akustickém výkonu  $10^{-12}$  W [6]. Tato hodnota je individuální a s věkem stoupá [9]. Na druhém konci sluchového pole nalezneme práh bolesti, který způsobí zvuky o výkonu přesahujícím 1 W [6, 9].

Zásadní význam má pro akustická měření veličina hladina intenzity zvuku  $L$ , někdy označovaná jako hladina akustického výkonu [6, 7]. Vztahem

$$L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (1.3)$$

kde  $I$  představuje intenzitu zvuku a  $I_0$  práh slyšitelnosti, je tato veličina definována [11]. Užitím desetinásobku dekadického logaritmu dostáváme stupnici vyjádřenou v decibelech dB [12]. Decibel je bezrozměrnou jednotkou, pomocí které vyjadřujeme nárůst intenzity zvuku vůči zvolené referenční hodnotě – v tomto případě oproti prahu slyšitelnosti [12]. Z důvodu použití logaritmické stupnice se tento postup může zdát neintuitivním, protože dvojnásobná změna intenzity zvuku nezpůsobí dvojnásobnou změnu hladiny intenzity. Použití stupnice v Belech není z praktického



hlediska vhodné – Bel představuje příliš velké vzorkování, což činí stupnici pro běžné použití takřka nepoužitelnou.

V reálném prostředí se nesetkáváme pouze s jedním zdrojem zvuku (viz 1.2). V případě skládání zvuků z více zdrojů je výsledná hladina intenzity dána sumou jednotlivých intenzit zvuku oproti referenční hladině [11]. Předchozí vztah pak píšeme v této podobě

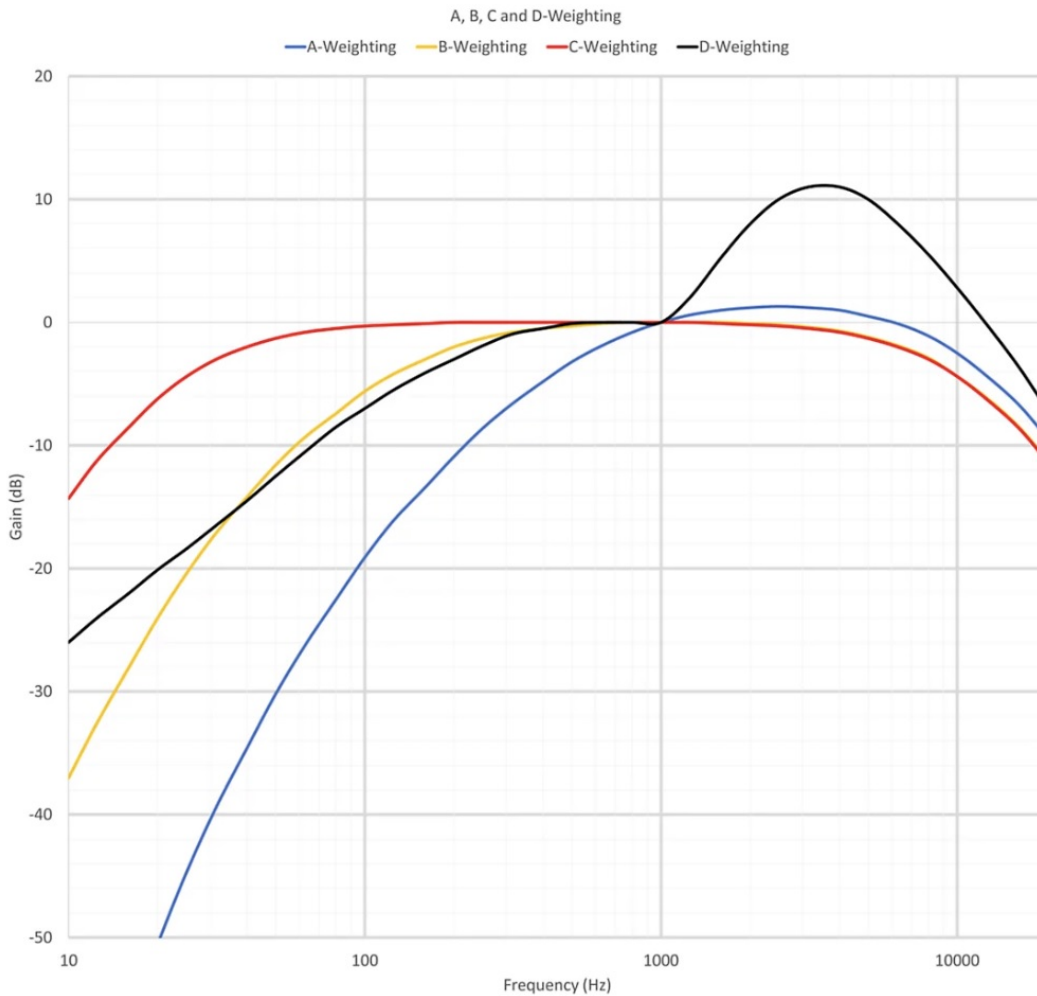
$$L = 10 \log \left( \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} \right) \quad (1.4)$$

kde  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  představuje hladiny intenzity produkované jednotlivými zdroji zvuku [11].

### 1.1.1 Hluk

V širším pojetí hlukem rozumíme jakékoliv nechtěné, rušivé nebo nepříjemné zvuky. Z fyzikálního hlediska jsou hlukem neperiodické zvuky [6]. Při měření hluku hlukovými dozimetry se setkáme s převodem dB do tzv. dB(A). Tento proces nazýváme, dle normy ISO 2631-1, vážením pomocí filtru typu A [13]. Vážené hodnoty umožňují lepší vystižení vnímání vysokých hodnot hluku sluchem člověka, neboť vjem hluku závisí především na frekvenci zvuku [14]. Filtr typu A se používá při středních a vysokých hladinách hluku [13].

Decibely (dB) i vážené decibely A (dB(A)) vyjadřují hladinu intenzity zvuku. Rozdíl spočívá v tom, jakým způsobem berou v potaz citlivost lidského sluchu na zvuky různých frekvencí. Decibel tak představuje prosté porovnání intenzity zvuku oproti referenční hodnotě (prahu slyšitelnosti). Vážený decibel filtrem A klade důraz na frekvence, na které je lidský zvuk citlivější a naopak utlumuje frekvence, které lidský sluch nevnímá tak citlivě [14]. Princip vážení filtrem A popisuje obrázek 1.1, ze kterého je patrný nárůst vnímané intenzity zvuku ve středních frekvencích. Pro stejný zvuk jsou hodnoty dB(A) typicky menší než hodnoty dB, protože lidský sluch je nejcitlivější pouze na úzkou oblast zvuků, která je zastoupena kmitočty v rozsahu od 2 000 až do 5 000 Hz [15]. Frekvence  $f$  (Hz) je na obrázku 1.1 vynesena na ose x. Hladina intenzity zvuku  $L$  (dB) na ose y a jednotlivé křivky představují hodnoty vážených decibelů pomocí filtrů typu A, B, C a D.



Obrázek 1.1: Vážení hladiny intenzity zvuku různými filtry. Filtr typu A je zobrazen modrou barvou [16]

### 1.1.2 Legislativní požadavky na hluk v kabině

Hygienické limity hluku na pracovišti jsou upraveny Nařízením vlády č. 272/2011 Sb. [17]. Maximální hodnota hluku, který se může na pracovišti vyskytovat, je odvozena z hladiny akustického tlaku a představuje 85 dB [17]. Po překročení zákonného limitu je nutné pracovníkům poskytnout osobní ochranné pomůcky k ochraně sluchu.

V oblasti letecké certifikace bylo přistoupeno k průzkumu příslušných částí CS-25. CS-25 je dokument zabývající se certifikačními požadavky pro velká letadla. Velkým letadlem je v tomto kontextu myšlen stroj přesahující svojí maximální vzletovou hmotností 5 700 kg. V sekci



CS 25.771 je stanoven požadavek týkající se vibrací a hluku v pilotní kabině: „*Vibration and noise characteristics of cockpit equipment may not interfere with safe operation of the aeroplane*“ [18]. Tento odstavec si lze vyložit tak, že hluk v pilotním prostoru by neměl dosahovat hodnot, při kterých by byla negativně ovlivněna výkonnost posádky, neboť posádka je v dnešních dnech k bezpečnému provozu letadla stále potřeba. V Příloze 2 k AMC 25.1322 je připuštěno, že schopnost registrovat upozornění varovných systémů letadla může být pro posádku vlivem hluku značně ztížena. Výrobcům letadel se doporučuje, aby frekvence použité v akustických upozorněních byly odlišné od hluku, který v kokpitu převládá. Varování musí navíc být slyšitelné nehledě na to, zda má člen posádky nasazená sluchátka, což je zajištěno dostatečnou hlasitostí takového varování [18]. Hluk v kabině dopravního letounu se nachází v rozmezí mezi 16 a 250 Hz [19]. V kokpitu běžného dopravního letounu můžeme očekávat obdobné rozložení frekvencí.

Mnoho odstavců této přílohy je věnováno zvuku hlavního varovného systému (master aural alert). Nejpodstatnějším parametrem je hodnota hladiny intenzity, o kterou by mělo takové varování převyšovat hluk okolního prostředí. EASA (Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví) doporučuje hodnotu mezi 20 a 30 dB s unikátním tónem [18]. Doporučovanou maximální hodnotu hladiny intenzity hluku v CS-25 nenalezneme. EASA pouze připouští existenci hluku v pilotním prostoru a ujišťuje se, že hluk nebude mít negativní vliv na bezpečný provoz letadel.

Obdobné informace nalezneme i na poli amerického regulátora FAA (Federální letecká správa), který ve FAR-25 obsahuje místy naprosto shodné formulace jako CS-25 (např. FAR 25.771) [20]. Čínská pověřená autorita se v dokumentu GJB 1357-1992, který upravuje hladinu intenzity hluku v letadle, odkazuje na konkrétní hodnotu hladiny intenzity. V kontextu tohoto dokumentu je jako maximální kontinuální hladina intenzity, které může být pilotův sluch v průběhu letu vystaven, brána hodnota 115 dB(A) [5].

## 1.2 Zdroje hluku v kokpitu letadla

Zdroje hluku v kokpitu letadla se liší v závislosti na tom, zda se pohybujeme na poli všeobecného letectví, kde je většina strojů zastoupena malými letouny s pístovými motory a vrtulovým pohonem, nebo v oblasti obchodní letecké dopravy povětšinou zastoupené stroji s proudovými pohonnými jednotkami.



V kokpitu malého sportovního letadla jsou základními zdroji hluku hluk od vrtule a motoru a do určité míry i aerodynamický šum.

Převážná část hluku od vrtule je způsobena vznikem tlakových vln, které vznikají při konverzi výkonu motoru na tahovou sílu, což pohání letoun vpřed [21]. Největší množství hluku je vlivem šíření tlakových vln soustředěno v osovém směru vrtule, tedy v místech pilotní kabiny (u jednomotorových strojů) [21]. Hluk produkovaný listy vrtule je závislý na otáčkách vrtule a dále rapidně stoupá při překročení místní rychlosti zvuku na koncích vrtule [22]. Hluk vrtule je do určité míry možné snížit použitím vhodné vrtule s více listy [23].

Na vzniku hluku v motoru se podílí hlavně pulzování tlakové vlny vycházející výfukovým potrubím mající svůj původ v jednotlivých cyklech klasického čtyřdobého motoru standardně užívaného ve sportovním letectví [24]. Do kabiny letounu se může hluk od motoru přenášet i přes závěsy motorového lože [25]. Redukce hluku motoru je dosažena snížením provozních otáček, vhodným krytváním motoru a konstrukčními úpravami výfukového potrubí [25].

Tření mezní vrstvy nabíhajícího vzduchu způsobuje rozličné hladiny intenzity, jejichž hlavním parametrem je dynamický tlak [26]. Hluk produkovaný při nižších rychlostech bude dosahovat menších hodnot, než při rychlostech vysokých, neboť dynamický tlak je závislý na kvadrátu rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu [27]. Hustota je rovněž jedním z řídících parametrů hodnot dynamického tlaku [27]. Ve velkých výškách lze na dané rychlosti dosáhnout vlivem snížení hustoty redukce hluku až o 10 dB [26].

V případě proudových letounů je situace mírně odlišná. Hlavními komponenty přispívajícími k hluku v pilotní kabině jsou hluk od pohonné jednotky a aerodynamický šum.

Používané pohonné jednotky se u dopravních letounů liší od dnes již klasických dvouproudových a turbovrtulových motorů přes starší jednoproudové motory až po exoticky vzhlízející pohonné jednotky koncepce propfan. Jelikož se ale ve valné většině případů setkáme pouze s prvními dvěma zástupci, budou následující řádky věnovány pouze těmto typům pohonu.

U proudových motorů jsou hlavními zdroji hluku rotor nízkotlakého kompresoru a výfuková tryska [28, 29]. Principiální možnost redukce hluku u výfukových trysek tkví v úpravě trysky samotné [28]. Použitím vzoru pilových zubů lze u nových motorů letounů B747-8 snížit hluk motorů až o 1 dB(A) [30]. Snížením výtokové rychlosti plynů lze rovněž docílit zmenšení hlučnosti motoru [29].





Hluk způsobený otáčkami nízkotlakého kompresoru lze redukovat snížením počtu otáček podobně, jako u vrtule pístového motoru nebo zvětšením obtokového poměru u dvouproudých motorů [28]. U některých turbovrtulových letounů se navíc pro redukcii hluku používají systémy aktivního tlumení. Active Noise and Vibrating Suppression System (ANVS) firmy Bombardier Aerospace instalovaný v některých letounech Dash 8 v sobě skrývá podobný princip jako systém aktivního tlumení používaný u leteckých sluchátek. Instalovaný mikrofon měří hladinu hluku v kabině cestujících a po předání těchto dat palubnímu procesoru jsou tvořeny vlny s opačnou fází tak, aby byla snížena hladina intenzity zvuku pod systémem definovanou úroveň [31].

V letové hladině mohou hladiny intenzity způsobené aerodynamickým šumem dosahovat značných hodnot. Při měření v kokpitu dopravního letounu byly zjištěny hladiny intenzity přesahující 90 dB(A) (viz 2.2.1). Princip vzniku hluku je stejný jako ve výše uvedeném odstavci.

Potřeba ochrany pilotova sluchu je zřejmá. Indický průzkum mezi třemi tisíci dopravních pilotů odhalil podezření na postupnou ztrátu sluchu způsobenou nadměrným hlukem (NIHL) u téměř 30 % zúčastněných subjektů [32], s větší degradací sluchu u levého ucha [33]. U aktivních vojenských pilotů bylo navíc potvrzeno značné zúžení sluchového pole s rostoucím věkem [34]. Poškození sluchového aparátu vlivem zvýšených hladin intenzity se nevyhýbá ani pilotům všeobecného letectví. Po deseti letech aktivního létání trpí polovina pilotů měřitelným posunem slyšitelných frekvencí [33].

Letecká sluchátka dnešní doby v sobě kombinují dvě funkce. Pilotovi slouží jako osobní ochranná pomůcka v hlučném prostředí kokpitu (obdobně jako mnoha jiným pracovníkům technických profesí), ale i jako prostředek určený ke komunikaci. Použití vhodného druhu headsetu je u pilotů nezbytností. Současný trh s leteckými sluchátky je zastoupen dvěma druhy headsetů.

### **1.2.1 Letecká sluchátka s pasivním tlumením**

Princip pasivního tlumení hluku spočívá ve vytvoření bariéry v prostředí, ve kterém se zvukové vlny šíří [35]. Faktor, který rovněž nesmí být opomenut je samotný materiál, ze kterého jsou sluchátka vyrobena, neboť v případě zvukově vodivého materiálu by taková zařízení nedosahovala požadovaného tlumení [35]. Ohled musí být brán rovněž na anatomické proporce uživatelů, kdy je nutné utěsnění zvukového kanálu i při pohybech čelistí dané osoby [36]. Výše popsané skutečnosti



implikují nezbytnou robustnost a zpravidla větší hmotnost sluchátek s pasivním tlumením, které u běžně používaných typů dosahuje hodnoty kolem 22 dB [37, 38, 39].

### 1.2.2 Letecká sluchátka s aktivním tlumením

Zvuk je, stejně jako ostatní vlnění, předmětem skládání dle principu superpozice. Sejdou-li se dvě vlny v různé fázi, dojde k interferenci. Vzájemné setkání zvukových vln v protifázi doprovází jev zvaný destruktivní interference, kdy je amplituda výsledného vlnění rovna rozdílu amplitud jednotlivých vlnění [40]. Dokážeme-li vytvořit takovou vlnu, která má v porovnání s původní vlnou stejnou amplitudu a opačnou fázi, vlnění se ruší a výsledná amplituda je v daném bodě nulová [40]. ANC (ANC, active noise cancellation) sluchátka využívají tohoto jevu k eliminaci nechtěných zvukových vln (šumů) [41].

Aparatura ANC sluchátek je tvořena třemi základními částmi. Interní mikrofon zaznamenává šum, který je přes filtr poskytnut procesoru k vytvoření tlumícího signálu [42]. Účinnost tlumení závisí na fázovém rozdílu tlumícího a původního signálu [40]. Z porovnávání jednotlivých fázových rozdílů vyšlo najevo, že pro dosažení alespoň minimálního tlumení 5 dB, nesmí fázový rozdíl přesáhnout  $32,7^\circ$  [42].

ANC sluchátka rovněž dosahují určité hodnoty pasivního tlumení. Hlavní část redukce hluku je ovšem zajištěna zapnutím ANC jednotky a některé výzkumy naznačují, že používání headsetů založených na technologii aktivního tlumení může mít pozitivní vliv na výkonnost pilota [43, 44].

### 1.3 Reakční čas

Jedním z parametrů celkové výkonnosti pilota je nepochybně reakční čas, který v tomto kontextu představuje jeden ze stěžejních faktorů. Dostatečně krátký reakční čas může znamenat rozdíl mezi úspěšným dokončením letu a nehodou. Problematika reakčního času je ale spíše řešena v jiných oblastech než v letectví. Názornými příklady může být nespočet studií věnující se problematice reakčního času řidiče a nehodovosti, vykazující silnou korelaci [45, 46, 47].

V literatuře zabývající se reakčním časem se setkáme se dvěma pojmy označujícími reakci organismu na různě složité podněty. Jako *simple reaction* je označována situace, kdy na je na představený podnět vždy stejná reakce (př. pádové varování a snížení úhlu náběhu letounu potlačením sloupku řízení) [48]. V této situaci je reakční čas člověka dán součtem časů nezbytných



k zaregistrování podnětu, zvolení správné reakce (byť je v uvedeném případě jen jedna) a provedení správných motorických akcí [48]. *Alternative reaction* zahrnuje případy, ve kterých má subjekt více možností, jak na nastalou situaci zareagovat [48]. Reakční čas v tomto případě vykazuje logaritmickou závislost na počtu dostupných možností a bývá nazýván rozhodovacím časem [49].

Se současným trendem v rozvoji kategorie UAS (bezpilotní systémy) provozu narůstá riziko střetu těchto strojů s letadly. Americký regulátor FAA se v rámci AC 90-48D odkazuje na hodnotu 12,5 s, což představuje průměrnou dobu, kterou pilot potřebuje k zareagování na letící UAS [50]. Následný univerzitní experiment ovšem představil jistá omezení této reakční doby. Pilot je takto rychlé reakce schopen pouze za takřka ideálních podmínek a za předpokladu, že se na přítomnost UAS soustředí, což nemusí reflektovat průběh běžného letu [51].

Vliv mentálního zatížení pilota může, kromě mnoha dalších faktorů, ovlivňovat i reakční čas, přičemž závisí hlavně na tom, zda je daná situace pilotem vnímána jako obtížná, nebo snadná [52, 53, 54]. Subjektivně vnímané vysoké nároky jsou spojeny s poklesem správnosti odpovědí a prodloužením reakčního času pilota na jemu prezentované podněty [52]. Ukazuje se, že vysoké hladiny hluku nemusí mít pouze okamžité projevy, ale vliv hluku může přetrvávat ještě určitý čas poté, co je zdroj hluku odstraněn [55]. Vysokofrekvenční zvuky zpravidla působí značnější degradaci pilotovy výkonnosti oproti zvukům nízkofrekvenčním [55]. Negativní vliv na reakční čas pilota mají, dle tohoto autora, hodnoty hluku dosahující 100 dB(A) [55].

Tyto výsledky jsou podpořeny i nedávným výzkumem čínského týmu. Na základě testování pilotů při různých hladinách intenzity (45, 55, 65 a 75 dB(A)) bylo zjištěno, že správnost odpovědí vykazuje silnou negativní korelaci s rostoucí hladinou intenzity [5]. V průběhu experimentu byl použit test SAGAT (Situational Awareness Global Assessment Technique). Test SAGAT je využíván k měření úrovně situačního povědomí mezi piloty. Sestává ze simulování letové situace, která je náhle pozastavena a pilot je po zakrytí obrazu tázán otázek souvisejících s danou simulací [56]. Správnost odpovědí je vyhodnocena oproti datům z počítače [56]. Na nejvyšší hladině intenzity byl pozorován pokles správnosti odpovědí o 30 procentních bodů oproti hladině intenzity 45 dB(A) s nárůstem doby nutné pro správné zodpovězení otázky o 100 % [5]. Omezením tohoto měření je hlavně malý vzorek subjektů – měření se zúčastnilo pouze deset pilotů [5]. Další limitací zmíněné studie je absence informací o leteckých zkušenostech a náletech účastníků experimentu [5].



Výsledky dostupných studií však nejsou konzistentní. Určitá hladina intenzity nemusí být z hlediska pilotovy výkonnosti vždy negativním aspektem. Na základě experimentu, kdy byly skupiny pilotů vystaveny různým hladinám intenzity s cílem zaletění co nejpřesnějšího profilu trati bylo zjištěno, že hladina intenzity 60 dB nezhoršila pilotovu výkonnost oproti hladině intenzity 45 dB [57]. Rovněž vystavení subjektů hladinám intenzity o hodnotě 100 dB(A) nemělo značný vliv na srdeční frekvenci subjektů jakožto indikátoru vybuzení účastníků experimentu a výkonnost subjektů nebyla značným způsobem ovlivněna [58]. Tyto závěry rovněž potvrzuje chorvatský výzkum, který naznačuje, že kumulativní efekt hluku zásadním způsobem neovlivňuje výkonnost pilota v průběhu vykonávání běžných činností spojených s pilotováním letadla [59]. Opět se zde však setkáváme s omezeným počtem subjektů, neboť se měření zúčastnilo pouze 14 pilotů [59].

Mimo výše zmíněné články proběhl průzkum mezi piloty společnosti Croatia Airlines předkládající znepokojivý výsledek – téměř 30 % pilotů proudových a více než třetina pilotů turbovrtulových letadel chorvatského dopravce uvedla, že v průběhu jejich kariéry byla bezpečnost letu minimálně jednou hlukem narušena [2].

#### 1.4 Situační povědomí

Kritický aspekt bezpečnosti současného letectví tvoří situační povědomí. U pilotů je dostatečná úroveň situačního povědomí nezbytným předpokladem pro bezpečné provedení letu a i proto dnešní letecký průmysl uznává situační povědomí jako klíčový faktor při zmírňování rizik a prevenci nehod.

Situační povědomí můžeme definovat jako „vnímání prvků prostředí v čase a prostoru, pochopení jejich významu a projekce jejich stavů v blízké budoucnosti“ [60]. Dle uvedené definice v sobě pojem situační povědomí neskrývá pouze současný přehled o situaci, nýbrž i očekávání možných výstupů dané situace. Situační povědomí je klíčovým vstupem do pilotova rozhodovacího procesu [61, 56] (obrázek 1.2).

Myšlenkový model o dané situaci je ovlivňován mnoha faktory a to jak objektivními, tak subjektivními [62]. Objektivní data (komunikace s ATC (služba řízení letového provozu), indikace přístrojů, atd.) mohou být přehlížena vyvozováním závěrů na základě přání a tužeb dané osoby, což má negativní vliv na situační povědomí a může vést až k jeho ztrátě [62]. Takovému scénáři by se měl pilot snažit zabránit svojí ostražitostí, komunikací se zbytkem posádky a neustálým



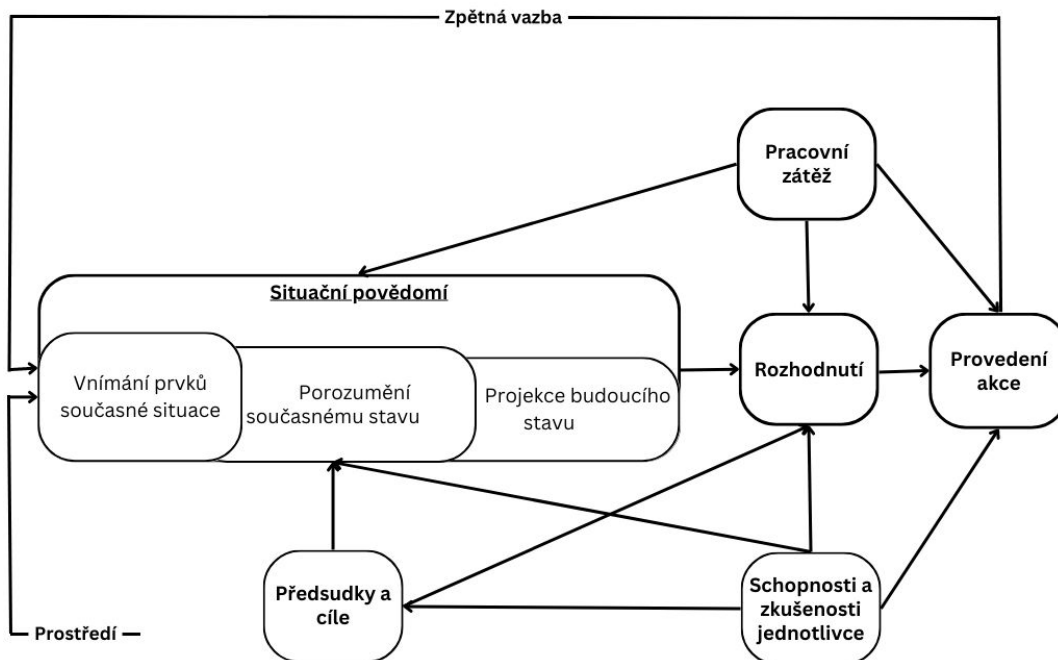
ověřováním svého myšlenkového modelu. Nebezpečím je ignorování očividných důkazů, které nepotvrzují pilotův myšlenkový model (confirmation bias) [62]. Všeobecně známým doporučením k zachování situačního povědomí je především schopnost, která je mezi piloty označována jako „zůstávání před letadlem“. Souhrnně tento pojem označuje stav, kdy je pilot schopen:

- pružně reagovat na nečekané události vzniklé za letu,
- předvídat další průběh letu,
- uvolnění dostatečného množství myšlenkové kapacity na provádění všech činností souvisejících s letem.

Tyto dílčí schopnosti jsou ve výcviku pilota průběžně rozvíjeny a společně tvoří jednu z devíti kompetencí moderního pilota tak, jak jsou prezentovány organizací ICAO (Mezinárodní organizace pro civilní letectví) [56].

Z výše popsaného je zřejmé, že pro udržení optimální úrovně situačního povědomí je nutné příhodné prostředí. Toto tvrzení je graficky vyjádřeno obrázkem 1.2, kde je jasně vidět přímý vliv prostředí na pilotovo situační povědomí. Mezi vlivy, které působí na pilotův komfort v kokpitu řadíme nízkou vlhkost vzduchu, vibrace, kosmické záření, proměnné teploty a samozřejmě také hluk [5].

Vlivem hlučného prostředí na kognitivní funkce člověka se zabývali i íránští výzkumníci. Jejich studie je do seznamu zdrojů zařazena, protože se v jejím rámci podařilo prokázat degradaci všech kognitivních funkcí (včetně reakčního času) u skupiny pracovníků v kovovýrobě, kteří byli v průběhu osmihodinové směny vystaveni hladinám intenzity přesahující 90 dB(A) [63]. Výsledky této studie ovšem nelze přímo aplikovat na prostředí kokpitu dopravního letounu, neboť piloti nejsou v průběhu své pracovní doby vystaveni fyzické námaze srovnatelné s pozorovanými pracovníky.



Obrázek 1.2: Popis rozhodovacího procesu pilota [56]

## 1.5 Shrnutí kapitoly

Kapitola 1 představila základní pojmy nutné pro sestavení metodologie sběru dat a návrh experimentu. Hlavním nedostatkem byl v rámci dostupných zdrojů především malý počet subjektů, který v použitých zdrojích nepřesáhl 14 subjektů v rámci každého experimentu. Na základě tohoto úzkého vzorku pravděpodobně vznikají rozpory mezi předloženými studiemi, kdy někteří autoři považují vliv hluku na výkonnost za negativní a jiní hluku nepřikládají přílišného významu. Rovněž absence studia reakčního času samotného představuje určité omezení. Bakalářská práce si klade za cíl zhodnotit vliv hluku na reakční čas pilota realizací experimentu vycházejícího z poznatků představených v kapitole 1.





## 2 Metody

Pro dosažení cíle bakalářské práce byl navržen experiment vycházející z analýzy současného stavu (viz 1). Sestavený experiment si klade za cíl zhodnocení vlivu hluku na reakční čas pilota bez kontextu celkové výkonnosti pilota.

### 2.1 Účastníci experimentu

K účasti v experimentu bylo přizváno 20 mladých pilotů z řad bakalářského studia oboru Profesionální Pilot na Fakultě dopravní ČVUT z věkové kategorie 21–24 let s průměrem  $21,4 \pm 1,46$  let. Zúčastnění v průběhu svého výcviku již stihli nashromáždit různé množství zkušeností a všichni byli v době konání experimentu držiteli pilotní licence PPL(A) a jeden účastník držitelem licence CPL(A). Několik studentů mělo zkušenosti s létáním na sportovních létajících zařízeních s pilotními licencemi ULL (1) a SPL/SFCL (2). Většina studentů (17) již byla ve fázi pro získání přístrojové kvalifikace dle ZLP-163. Je důležité zmínit, že všichni studenti byli oprávněni vykonávat sólo lety, tj. být jedinou osobou na palubě letounu a zaznamenávat si tak do svých zápisníků letů *solo flight time* ve smyslu Nařízení Komise (EU) č. 1178/2011.

Všichni účastníci byli v době konání měření držiteli 1. třídy Průkazu způsobilosti člena letové posádky vydaným v souladu s Part-MED dle Nařízení Komise (EU) č. 1178/2011. Touto podmínkou bylo zaručeno, že účastníci netrpí žádnými poruchami sluchového ústrojí ani jinými zdravotními neduhy neslučitelnými s prací obchodního pilota.

Létané typy studentů se lišily v závislosti na letecké škole, kde daný student vykonával praktický výcvik. První skupina měla zkušenosti převážně s italskými letouny Tecnam (konkrétně se jednalo o typy P2002 a dvoumotorovou variantu P2006). Druhá skupina pak byla zastoupena americkým výrobcem Cessna (C150/C152 a C172). Kromě jednoho účastníka měli všichni studenti zkušenosti jak s analogovým, tak i digitálním zobrazením letových parametrů (zobrazení EFIS G1000). Počty nalétaných hodin u většiny účastníků nepřesáhly 160 letových hodin (součet letové doby ve dvojím řízení a doby ve funkci velícího pilota) s průměrem  $125,8 \pm 34$  hodin. Pro účely experimentu nebylo nutné studenty rozdělovat na dvě skupiny a popsany vzorek je v bakalářské práci považován za jednu skupinu.

Před započítáním experimentu byl každý účastník ústně seznámen s povahou měření, základními ovládacími prvky simulátoru, charakterem letových úloh a manévrů bez představení



letěné tratě. Samotnému měření předcházelo krátké seznámení se simulátorem, kdy si každý účastník vyzkoušel sérii manévřů v horizontální i vertikální rovině, aby se ztotožnil s chováním letového simulátoru.

Každý účastník experimentu byl důrazně upozorněn na skutečnost, že bude v průběhu měření vystaven nadměrným hladinám intenzity zvuku. V případě komplikací nebo stížností studenta bylo možné měření okamžitě přerušit. Studenti se experimentu zúčastnili dobrovolně. Experiment s daným studentem byl proveden až po podpisu informovaného souhlasu. Výzkum byl schválen Komisí pro etiku ve výzkumu na Českém vysokém učení technickém v Praze pod jednacím číslem 0000-01/23/51903/EKČVUT.

## 2.2 Získání vstupních dat experimentu

V rámci bakalářské práce byla snaha o získání co nejrelevantnějších údajů ohledně hladin intenzity, kterým jsou posádky dopravních letadel vystaveny. Po dohodě s tuzemským dopravcem Smartwings a.s. byl umožněn přístup do kokpitu letounu Boeing 737-700 (konkrétně B737-7Q8) registrace OK-SWW na standardním linkovém letu z Prahy (LKPR) do španělské Malagy (SCSO) s délkou 3 hodiny a 15 minut.

Pro měření byl zakoupen hlukoměr PDEME 130 A1 (PARKSIDE, Neckarsulm, Německo) schopný zaznamenávat hladiny intenzity od 30 do 130 dB(A) ve frekvenčním rozsahu mezi 31,5 a 8000 Hz s přesností  $\pm 3$  dB(A). Hlukoměr splňuje třídu přesnosti II dle normy IEC 61672-1 a je schopný spolehlivé indikace v provozních podmínkách od 0 °C do 40 °C až do hodnot relativní vlhkosti nepřevyšující 90 %. Nutné podmínky byly v průběhu měření zajištěny. Hlukoměr je schopen zaznamenávat hladiny intenzity buď po 125 ms (fast) nebo po 1000 ms (slow) s možností zobrazení nejvyšší zaznamenané hladiny intenzity.

Měření hladin intenzity probíhalo po briefingu s posádkou letounu tak, aby nebyla ohrožena bezpečnost letu a aby měření co nejméně narušovalo činnost posádky. V rámci briefingu byla posádka seznámena s obsluhou přístroje dle přiloženého návodu, protože část měření vždy probíhala za součinnosti posádky s předáním hlukoměru do rukou kapitána a poté prvního důstojníka. Ukázka měření je k vidění na obrázku 2.1



Obrázek 2.1: Ukázka měření hladiny intenzity zvuku v kokpitu letounu B737

### 2.2.1 Naměřené hodnoty hladin intenzity v kokpitu B737-700

Měření hladin intenzity bylo zaměřeno na traťový let, protože značná část standardního letu probíhá právě v traťovém segmentu. Měření bylo rozděleno na 10 dílčích měření na 4 pozicích (pravé/levé sedadlo, jumpseat, čelní sklo) a výstupem každého z nich bylo 8 hodnot hladin intenzity. Cílem bylo měřit na obou stranách všech sedadel stejně jako při měření v blízkosti čelního skla. Při jednotlivých měřeních byl hlukoměr vždy umístěn na úrovni hlav pilotů v blízkosti jejich uší. V této



poloze byl hlukoměr podržen po dobu 10 sekund se zaznamenáním nejvyšší dosažené hodnoty. Tabulka 2.1 poskytuje seznam naměřených hodnot.

Tabulka 2.1: Hodnoty hladiny intenzity zvuku v kokpitu v dB(A)

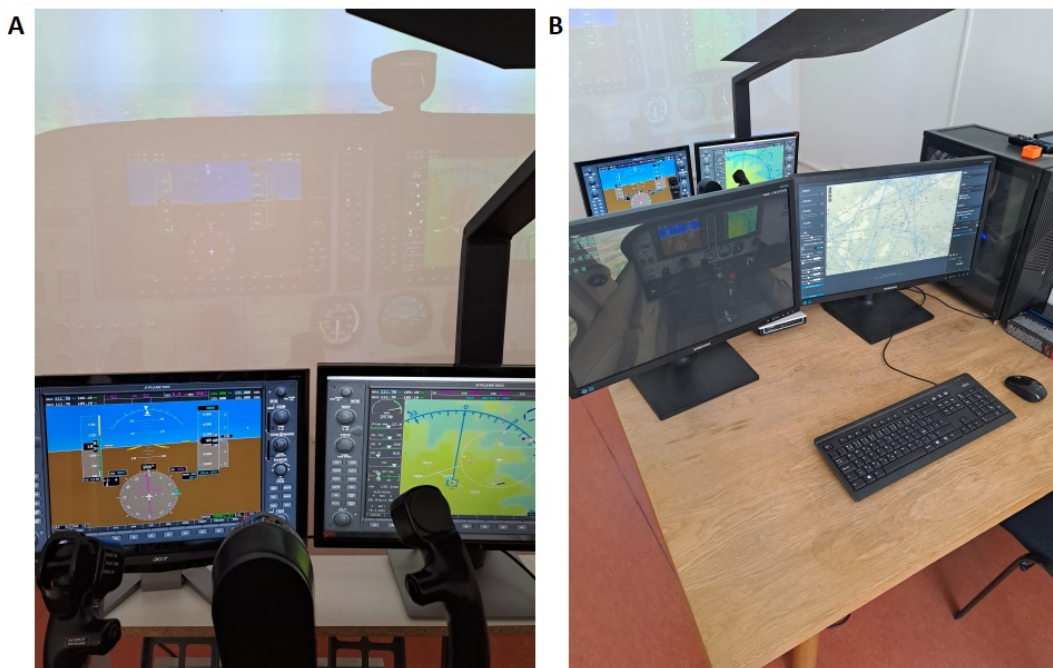
Strana a měření:	Levé sedadlo		Pravé sedadlo		Jumpseat		Čelní sklo	
	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1.	91,3	90,1	90,3	92,1	87,9	87,8	97,9	97,9
2.	92,7	90,9	91,1	93,2	88,1	88,2	98,8	98,6
3.	92,9	91,2	91,5	93,2	88,8	89,1	98,8	98,8
4.	93,4	91,6	91,4	94,1	89,9	89,7	98,7	98,9
5.	93,9	92,0	91,9	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

Z tabulky je patrná mírná variace naměřených hodnot způsobená rozdílnými rychlostmi, kterými se letoun v průběhu letu pohyboval. Naměřené hodnoty na pilotních sedadlech byly zprůměrovány a hodnota 92 dB(A) posloužila jako nejvyšší hladina intenzity v průběhu experimentu. Tato hodnota je výsledkem průměrné hladiny intenzity zvuku na sedadle kapitána a prvního důstojníka. Od začátku prvního měření do změření poslední hodnoty uběhlo 120 minut.

### 2.3 Návrh experimentu

Celé měření bylo prováděno v prostředí letového simulátoru X Plane 11 (Laminar Research, Columbia, SC, USA) na letounu C172 vybaveného avionikou EFIS G1000 (Garmin Ltd., Olathe, KS, USA). Letoun C172 byl vybrán kvůli své celosvětové oblibě mezi leteckými školami. Digitální prezentování informací na EFIS G1000 představovalo nejvhodnější zobrazení letových a navigačních parametrů jakého bylo s dostupným vybavením možné dosáhnout – pilot tak měl ve svém zorném poli jak celkový výhled z kabiny letounu, tak i zvětšený PFD (primary flight display) spolu s ND (navigation display).

Rozložení prvků simulátoru sestávalo z jednoho projektoru, který promítal obraz na zeď místnosti, dvou monitorů zobrazujících výše zmíněné části avioniky, sloupku volantového řízení s pedály pro ovládání brzd a směrového kormidla a nakonec z panelu pro ovládání páky přípusti, vztlakových klapek a vyvažovací plošky na výškovém kormidle (dále jen vyvážení). Instruktorská stanice sestávala ze dvou dalších monitorů z nichž jeden zobrazoval pohled z pilotního sedadla a druhý zobrazoval pohled na horizontální situaci s možným ovládáním polohy, kurzu, výšky, rychlosti, příčného a podélného sklonu letadla. Osoba sedící na sedadle instruktorské stanice měla přístup k zobrazení na pilotním sedadle a byla v případě nutnosti schopna interakce s primárním a navigačním displejem (zobrazování trati letu, nastavování zvoleného kurzu, atd.). Osoba v pilotním sedadle taková nastavení provádět nemohla – jediné prvky, které bylo možné z pilotního sedadla ovládat byla řididla primárního řízení a panel s ovládáním přípusti plynu. Rozložení prvků experimentu je vidět na obrázku 2.2.

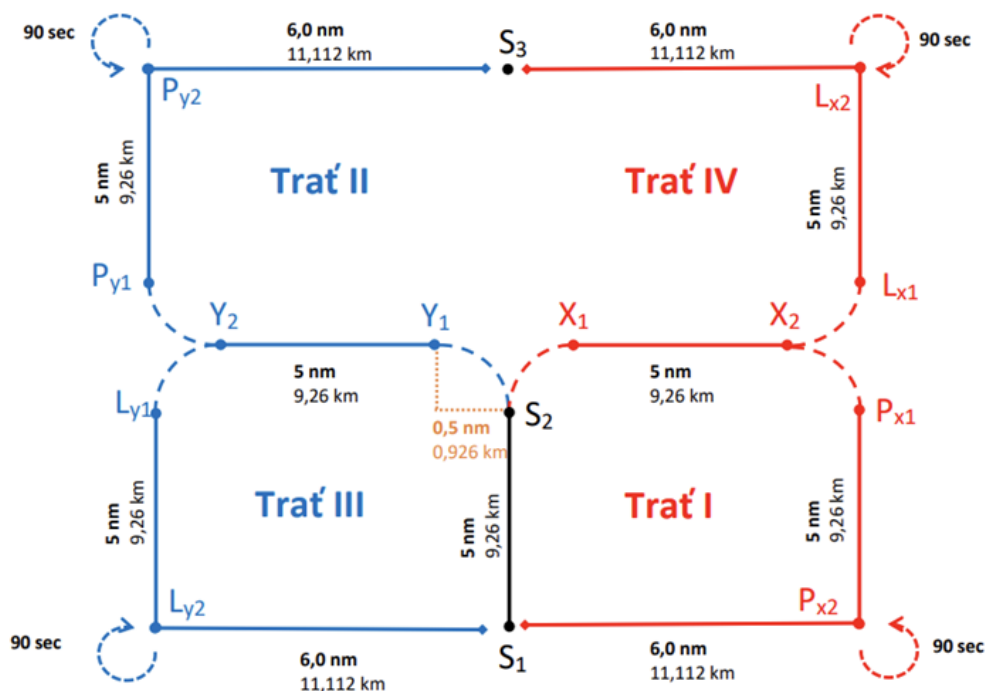


Obrázek 2.2: Rozložení prvků letového simulátoru. Pohled z pilotního sedadla (A) a instruktorská pozice (B)

Simulace probíhala za podmínek VMC (Visual meteorological conditions), neboť se mezi účastníky vyskytovaly osoby, které za sebou v době měření ještě neměly ukončený výcvik pro získání přístrojové kvalifikace. Takové podmínky umožnily do měření zařadit větší množství

studentů. Meteorologické podmínky byly zastoupeny letovou dohledností přesahující 10 km, vysokou oblačnost typu Cirrus pokrývající 1/8 oblohy a bezvětrí bez jakékoliv formy turbulence. Letoun byl při jednotlivých měřeních vždy zásoben stejným množstvím paliva (přibližně dvě hodiny letu včetně rezervy) a nulovým užitečným zatížením. Toto nastavení zajišťovalo stejné podmínky pro všechny účastníky měření.

Každý účastník experimentu byl podroben zaletění několika jednoduchých manévrů na předem definované trati v blízkosti Letiště Václava Havla v Praze. Obrázek 2.3 přehledně zobrazuje sestavenou trať experimentu.



Obrázek 2.3: Návrh trati experimentu

Pro tvorbu trati experimentu byl zvolen bezplatný open source software Little Navmap (Alexander Barthel, Německo), který umožňuje plánování letů a jejich exportování do většiny leteckých simulátorů. Pro simulátor X Plane 11 se jedná o soubory s příponou fms. Po exportu jednotlivých tratí stačí tyto soubory vložit do příslušné složky letového simulátoru a po spuštění dojde k automatickému obohacení navigační databáze o vložené údaje. Software Little Navmap byl





zvolen hlavně kvůli technickým potížím se simulátorem v době plánování tratí, které neumožňovaly trať definovat přímo v prostředí leteckého simulátoru v rámci systému EFIS G1000.

Při konstrukci trati experimentu byl využit článek chorvatského výzkumného týmu, kdy bylo 14 pilotů podrobena sérii 18 letových manévřů různé obtížnosti sestávajících z klesání/stoupání, zatáčení a změn rychlosti [59]. Koncepce představená v tomto článku ovšem neodpovídala průběhu reálného letu, protože při provedení reálného letu se jeho velká část odehrává v traťovém segmentu bez zásadních změn kurzu a režimu letu.

Hlavním cílem při tvoření trati experimentu byla snaha o vytvoření takového profilu, který pilotovi neumožní jeho zapamatování v průběhu jednotlivých měření, aby nedošlo k ovlivnění výsledků experimentu.

Při návrhu experimentu byly řešeny dva problémy. Hlavním úkolem bylo rozhodnout, zda zvolit trasu s vyšší složitostí, která zahrnuje větší počet manévřů k udržení optimální úrovně pilotovy pozornosti. Vystaly ovšem obavy z možných nepříznivých účinků spojených s takovou tratí. Pilot by byl nucen svoji pozornost zaměřovat hlavně na přesnou pilotáž a to by si žádalo mnoho mentální kapacity. Jelikož standardní let dopravního letounu tímto způsobem neprobíhá, bylo od této varianty upuštěno. Vyvstal ovšem problém druhý. Pokud by byla zvolena jednoduchá trať bez zásadních manévřů s převážně rovnými segmenty, pak by byla pilotova výkonnost pravděpodobně slabá z důvodu nedostatku podnětů. Dílčím cílem bylo tedy zvolit takový profil letu, který by pilota nevyčerpал svojí náročností, ale zároveň poskytl dostatek podnětů k udržení optimální hladiny výkonnosti pilota.

Jako nejvhodnější řešení bylo zvoleno vytvoření čtyř obrazců podobných čtvercům, které jsou zrcadlově převráceny. Výsledná trať se tedy skládá ze čtyř dílčích profilů, které byly označeny jako trať I, II, III a IV. Jednotlivé tratě spolu tvoří dvojice (trať I + II a trať III + IV). Právě zatáčky trati I jsou v jejím dvojčeti nahrazeny zatáčkami levými. Aby byla udržena optimální hladina pozornosti, bylo do jednotlivých segmentů včleněno stoupání a klesání spolu s jednou zatáčkou o 270° před posledním segmentem každé trati. Jelikož je celé měření prováděno za VMC podmínek, nebylo při konstrukci zatáček použito standardních přístrojových zatáček. Průběh stoupání a klesání je rovněž v jednotlivých tratích zrcadlově převrácen. Body, ze kterých se jednotlivé tratě skládají, jsou definovány zeměpisnými souřadnicemi, které shrnuje tabulka 2.2.

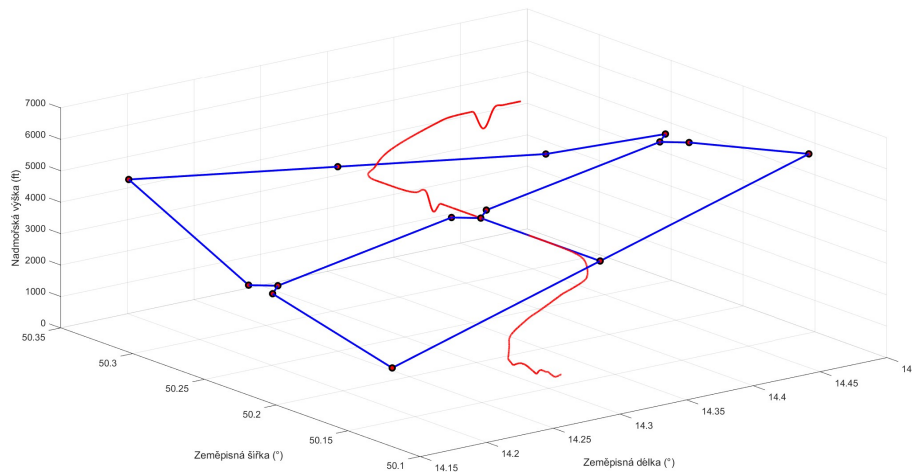


Tabulka 2.2: Zeměpisné souřadnice trati experimentu

<b>Bod</b>	<b>Zeměpisné souřadnice</b>	<b>Nadmořská výška (ft)</b>
S1	50°08'18.7"N 14°19'35.9"E	4000
S2	50°18'20.3"N 14°19'36.7"E	4000
Y1	50°18'56.2"N 14°18'41.1"E	4000
Y2	50°18'57.8"N 14°03'02.8"E	3000
LY1	50°18'22.2"N 14°02'07.1"E	3000
LY2	50°08'22.9"N 14°02'07.3"E	2000
PY1	50°19'33.5"N 14°02'07.1"E	3000
PY2	50°29'32.5"N 14°02'06.4"E	5000
S3	50°29'32.6"N 14°19'42.6"E	4000
X1	50°18'55.8"N 14°20'32.4"E	4000
X2	50°18'56.1"N 14°36'10.2"E	5000
PX1	50°18'20.6"N 14°37'05.9"E	5000
PX2	50°08'21.6"N 14°37'06.2"E	6000
LX1	50°19'31.5"N 14°37'05.8"E	5000
LX2	50°29'30.5"N 14°37'05.3"E	3000

Samotné měření sestávalo ze zaletění tratí I až III. Trať IV byla zvolena jako záložní v případě, že by během letu došlo na jednom z úseků k technickým potížím. Pokud by byl student vrácen na počátek aktuální trati, již by znal její průběh a výsledky experimentu by mohly být zakresleny.

Vizualizace 3D profilu trati (obrázek 2.4) byla vytvořena pomocí skriptu v softwaru MATLAB (MATLAB R2022a, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA). Mimo zobrazení definované trati umí skript rovněž vyznačit trajektorii letu, kterou účastník experimentu v průběhu měření zaletěl.



Obrázek 2.4: 3D profil trati experimentu. Modrými liniemi jsou zobrazeny tratě I až IV, červenou křivkou je zobrazena letěná trajektorie v průběhu testovacího měření.

Experiment pro bakalářskou práci proběhl ve spolupráci s mým kolegou Tomášem Hofírkem. Každý si z experimentu odnesl svá vlastní data a naše práce jsou na sobě nezávislé. Vstupní data pro nastavení experimentu jsou proto stejná.



### 2.3.1 Průběh experimentu

Experiment byl rozdělen na tři měření z nichž každé trvalo zhruba 30 minut. Jednotlivá měření probíhala vždy dle stejného scénáře. Student byl seznámen s časovým rozsahem měření (přibližně 1,5 hodiny) a usazen do pilotního sedadla letového simulátoru. V pilotním sedadle mu byly představeny jednotlivé ovládací prvky a po tomto ústním seznámením následoval krátký let (nepřesahující 10 minut), k procvičení letových manévrů dle libosti studenta. Tento seznamovací let ovšem vždy obsahoval vyzkoušení podobných režimů, jejichž nastavení bylo v průběhu měření potřeba (stoupání a klesání na dané indikované rychlosti (IAS)). Hlavním cílem byla adaptace na chování jednotlivých prvků simulátoru. V průběhu simulovaných letů nebylo třeba nijak manipulovat se vztakovými klapkami a k veškerému ovládní stroje stačily prvky primárního řízení a páky plynu spolu s vyvážením. Po seznámení se simulátorem následovalo promítnutí prezentace s představením experimentu a vyplnění dotazníku týkající se letové praxe studenta.

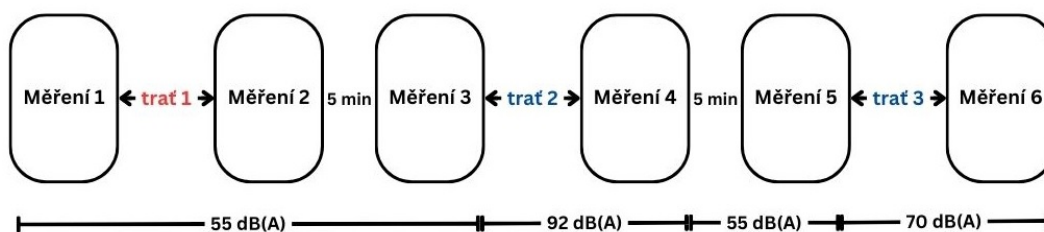
V průběhu měření bylo laterální vedení po trati zajištěno nahranou tratí z navigační databáze systému G1000. Výstup byl pilotovi prezentován na indikátoru horizontální situace (HSI). Bylo-li nutné v průběhu měření stoupat nebo klesat, byl student instruován verbálně. Pro jednotlivé úseky se stoupáním a klesáním mu byly rovněž doporučeny režimy sestávající z indikované rychlosti letu a vertikální rychlosti (VS). Dodržením těchto doporučení pilot dosáhl optimální trajektorie. Doporučené režimy pro jednotlivé tratě shrnuje tabulka 2.3.

Tabulka 2.3: Doporučené režimy pro let v rámci jednotlivých tratí

	Trať I			Trať II	
	Stoupání	Klesání		Stoupání	Klesání
IAS (kt)	95	110	IAS (kt)	85	110
VS (fpm)	300–400	750–850	VS (fpm)	600–700	300–400
	Trať III			Trať IV	
	Stoupání	Klesání		Stoupání	Klesání
IAS (kt)	85	105	IAS (kt)	95	110
VS (fpm)	600–700	300–400	VS (fpm)	300–400	750–850

### 2.3.2 Měření reakčního času

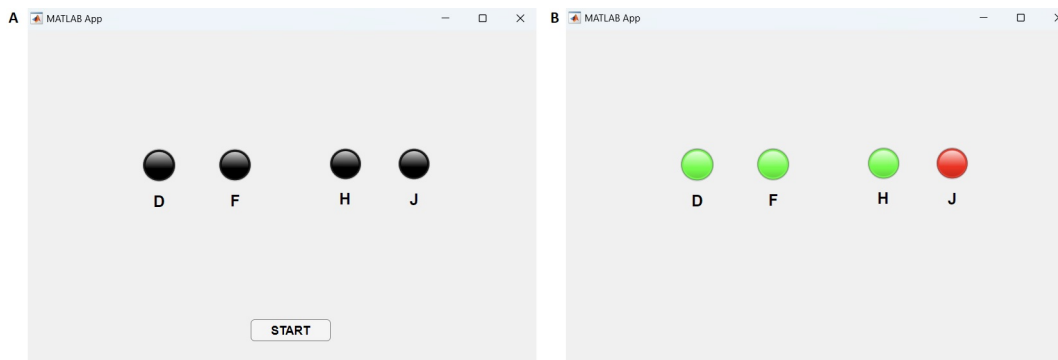
V rámci jednotlivých tratí bylo prováděno měření reakčního času subjektu. Samotné měření sestávalo z šesti opakování, v nichž se v každém opakování měřilo desetkrát. Výsledkem každého experimentu bylo 60 hodnot reakčního času. Jednotlivá měření probíhala vždy na začátku a konci jednotlivých tratí. Pro účely měření byla mezi jednotlivé fáze experimentu včleněna krátká pauza, nepřesahující pět minut. Pro přehlednost je schéma měření, spolu s hladinami intenzity zvuku, zobrazeno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Měření reakčního času v rámci experimentu

Měření reakčního času bylo realizováno pomocí aplikace vytvořené v softwaru MATLAB R2022b. Aplikace pro měření reakčního času je založena na Four Choice Reaction Time Task [64], kdy jsou uživateli prezentovány čtyři objekty, které v náhodném pořadí mění svoji barvu (obrázek 2.6). Pro účely experimentu byly v aplikaci definovány objekty, kterým byly přiřazeny akční klávesy „D“, „F“, „H“ a „J“. Stisknutím tlačítka start dojde ke spuštění aplikace, k zelenému podbarvení objektů a náhodnému podbarvení jednoho objektu na červeno. Cílem uživatele je, co nejrychleji zareagovat na změnu červeného podbarvení stisknutím příslušné klávesy na klávesnici. Podbarvení objektů se děje náhodně vždy v rámci časového intervalu od jedné do tří sekund. Tento proces se po spuštění aplikace desetkrát opakuje.

V průběhu experimentu je kromě měření reakčního času vyhodnocována i správnost reakce subjektu. Po skončení měření je možné naměřená data exportovat do \*.xlsx souboru pro účely vyhodnocení dat. Aplikace je naprogramována tak, aby v průběhu měření nedocházelo k podbarvování stejných objektů ihned po sobě, což je realizováno jednoduchým *while* cyklem. Pro měření byl zvolen notebook namísto zařízení s dotykovou obrazovkou, neboť použití dotykového



Obrázek 2.6: Aplikace pro měření reakčního času. Aplikace aplikace po spuštění (A) a aplikace v průběhu měření (B)

displeje a klikání na jednotlivé objekty by do měření zavádělo chybu v podobně nestejného postavení ruky uživatele. Použitím klávesnice je zajištěno stále stejné umístění prstů uživatele bez nutnosti změny polohy ruky s přesnějším měřením reakčního času.

V průběhu měření byly subjekty vystaveny třem hladinám intenzity na základě dat uvedených v tabulce 2.1. V průběhu prvního měření je pilot vystaven pouze hluku klidného prostředí odpovídající hodnotě 55 dB(A) Z reprosoustavy není prozatím prezentován žádný hluk. V průběhu druhého letu je v místnosti aktivován záznam hluku z kokpitu dopravního letounu B737 odpovídající hladině intenzity 92 dB(A) měřený hlukoměrem PDEME 130 A1. Pro reprodukci hluku byl zvolen zvukový panel výrobce LG model SJ3 (LG, Seoul, South Korea), ke kterému byl připojen notebook obsahující záznam zvuku z kokpitu letounu.

Reprosoustava je umístěna bezprostředně za hlavou pilota za opěrkou pilotní sedačky. Takové umístění bylo zvoleno kvůli přílišnému poklesu hladiny intenzity zvuku v případě umístění na jiné místo v místnosti, kde se experiment uskutečnil. Jedině toto umístění umožnilo vystavení subjektu stejné hladině intenzity zvuku, které byla vystavena posádka v průběhu letu. Celé druhé měření je letěno pod konstantní hlukovou zátěží s následným měřením reakčního času ve stejných podmínkách. Při posledním měření je subjekt vystaven menšímu hluku odpovídající hladině intenzity 70 dB(A), což představuje hladinu intenzity, které je pilot vystaven v případě použití headsetu.

Tato hodnota byla stanovena na základě porovnání headsetů dvou výrobců leteckých sluchátek. Výrobce David Clark byl zastoupen modelem *David Clark H10-13.4* s pasivním





tlumením okolního hluku 23 dB [38]. Od výrobce Telex byl vybrán model *Telex Echelon 20* poskytující pasivní útlum 20 dB [39].

Pilot v průběhu experimentu headset nepoužívá, neboť při měření hodnot bylo zjištěno, že typ letounu, na kterém bylo měření prováděno, nedisponuje interkomem, který by zajistil spojení mezi členy posádky. Piloti jsou v případě vzájemné komunikace nuceni svůj headset odložit a vystavují se nadměrnému hluku. Běžnou pilotní praxí je rovněž sejmutí pilotního headsetu po dostoupaní FL100 popř. v segmentu traťového letu. Sluchátka, která jsou v současnosti dostupná v kokpitech strojů dopravce Smartwings navíc neposkytují dostatečnou úroveň tlumení okolního hluku. Zpravidla se jedná o model *Airman 750* amerického výrobce Telex, který byl původně certifikován v 80. letech minulého století [65]. Z obrázku 2.7 je patrné, že tato sluchátka nepokrývají celé ucho pilota a nemohou tak poskytnout dostatečné tlumení. Tato sluchátka samozřejmě pro piloty nepředstavují jedinou možnost, jak svůj sluch před hlukem ochránit. Mnozí piloti si do letounů přinášejí svá vlastní sluchátka. Tato sluchátka ovšem nemusí být vždy zcela kompatibilní se systémy letadla a mohou dokonce ohrozit průběh letu [66].



Obrázek 2.7: Sluchátka Telex Airman 750

## 2.4 Statistické vyhodnocení dat

Data získaná v rámci experimentu sestávala z hodnot reakčního času v kombinaci se správností odpovědi respondenta. Nashromážděná data byla uspořádána do tabulky, kde sloupce představovaly jednotlivé subjekty a řádky pořadí měření. Správná reakce subjektu byla označena číslem 1, nesprávná hodnotou 0. Celkem bylo v průběhu měření získáno 1200 hodnot reakčního



času v rámci 20 subjektů. Pro statistické vyhodnocení dat byl zvolen software MATLAB R2022b s instalovaným rozšířením Statistics and Machine Learning Toolbox.

Procesu vyhodnocení dat předcházelo provedení korekce reakčního času o správnost odpovědi [4]. Reakční časy za jednotlivá měření byly zprůměrovány a tato hodnota byla hodnocena oproti správnosti pilotovy reakce, tj.:

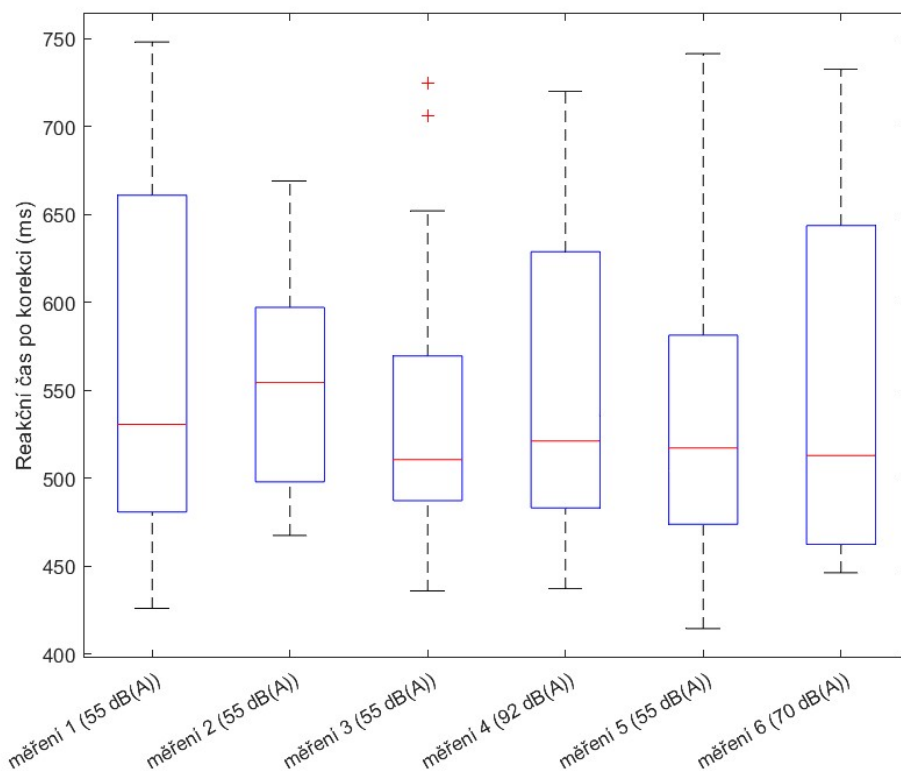
$$RT_{corr} = \frac{RT_{avg}}{CF} \quad (2.1)$$

kde  $RT_{avg}$  představuje průměrnou hodnotu reakčního času subjektu v rámci jednoho měření a  $CF$  korekční faktor získaný jako počet správných odpovědí v procentech v rámci jednoho měření. Výsledkem je jedna hodnota reprezentující reakční čas subjektu s korekcí o správnost  $RT_{corr}$  v rámci jednoho měření.

Pro otestování normality dat byl použit Andersonův-Darlingův test normality [67]. Jelikož některé skupiny nashromážděných dat nepocházely z normálního rozdělení bylo od použití parametrických testů upuštěno. Pro statistické zhodnocení byl proto využit Friedmanův test [68], a to s ohledem na párovost dat vycházející z podstaty experimentu. Naměřená data byla pro účely přehlednějšího zobrazení hodnocených dat prezentována formou boxplotu, kde je červenou horizontální linií označen medián jednotlivých skupin, modrým ohraničením první a třetí kvartil a šedými liniemi maxima a minima jednotlivých skupin. Odlehlé hodnoty jsou zobrazeny červenými kříži.

### 3 Prezentace výsledků

Výsledky Friedmanova testu neprokázaly významný statistický rozdíl na hladině významnosti  $\alpha = 0.05$  mezi jednotlivými měřeními, jelikož  $p = 0,795$ . I přesto, že výsledky Friedmanova testu neprokázaly významný statistický rozdíl mezi jednotlivými měřeními, byla pro jejich potvrzení provedena post-hoc analýza. Výsledky post-hoc analýzy potvrdily výsledky Friedmanova testu. Distribuce jednotlivých reakčních časů jsou prezentovány formou boxplotů na obrázku 3.1.



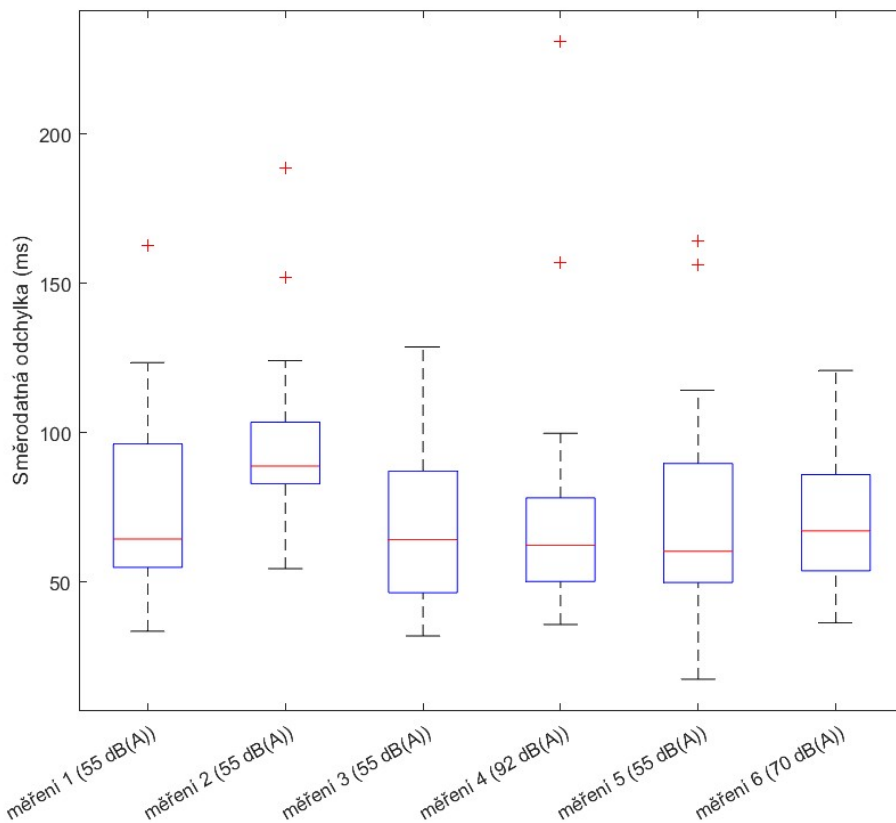
Obrázek 3.1: Porovnání reakčních časů v rámci jednotlivých měření

Z obrázku 3.1 plynou mediány reakčních časů po korekci v rámci jednotlivých měření nabývající hodnot  $530ms$ ,  $554ms$ ,  $510ms$ ,  $521ms$ ,  $517ms$  a  $512ms$ . Z přiložených boxplotů je vidět různá hodnota mezikvartilového rozpětí (IQR, interquartile range) dat mezi jednotlivými měřeními. Nejvyšších hodnot IQR dosahovala měření č. 1, 4 a 5 s hodnotami  $180ms$ ,  $146ms$  a  $181ms$ . Měření s referenční hladinou intenzity  $55\text{ dB(A)}$  (měření 1, 3 a 5) dosahovala zhruba polovičních hodnot IQR.



Jelikož se v rámci měření nepodařilo prokázat statisticky významný rozdíl mezi všemi měřeními, byl proveden ještě jeden Friedmanův test porovnávající pouze referenční hodnoty reakčních časů po korekci (měření 1, 3 a 5). Referenční měření byla provedena na hladině intenzity 55 dB(A). Výsledná  $p$ -hodnota  $p = 0,678$  v tomto případě podpořila tvrzení o absenci statisticky významného rozdílu reakčních časů v rámci referenčních měření.

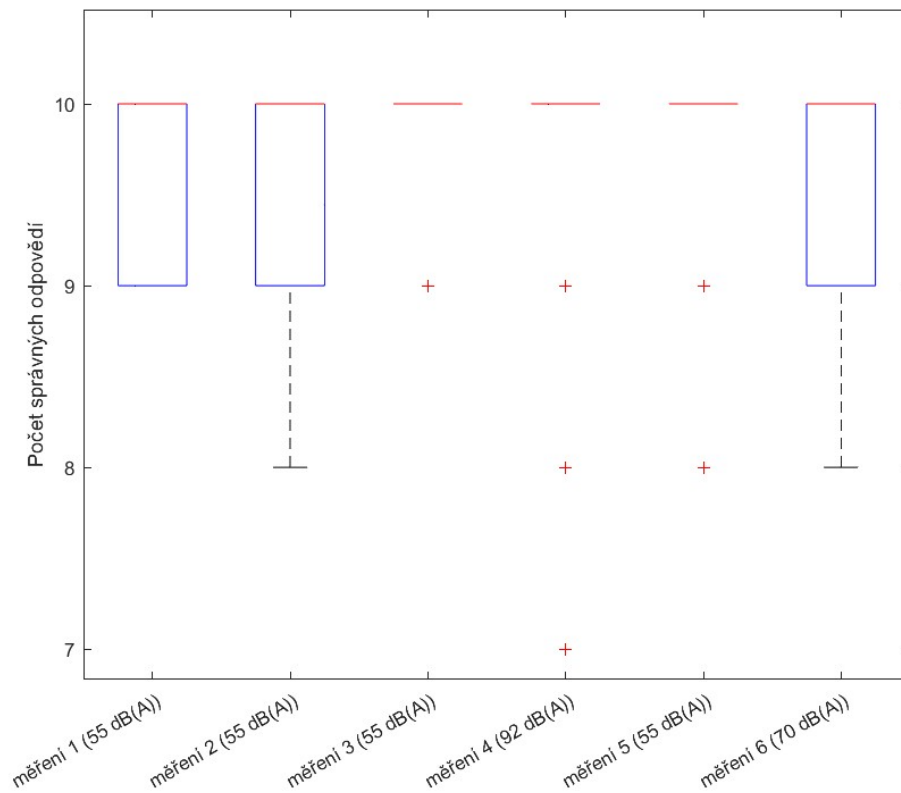
Testováním směrodatných odchylek jednotlivých skupin měření reakčního času byla na hladině významnosti  $\alpha = 0.05$  zjištěna  $p = 0,053$ . Stejně jako v předchozím případě byla pro potvrzení výsledku Friedmanova testu provedena post-hoc analýza, která nenalezla statisticky významný rozdíl mezi měřeními. Směrodatné odchylky shrnuje obrázek 3.2



Obrázek 3.2: Porovnání směrodatných odchylek v rámci jednotlivých měření



Správnost pilotovy reakce byla v rámci jednotlivých měření rovněž testována Friedmanovým testem. Ani v tomto případě však nebyl nalezen statisticky významný vztah mezi hlukem a správností pilotovy reakce, jelikož  $p = 0,209$  na hladině významnosti  $\alpha = 0.05$ . Post-hoc analýza byla provedena pro potvrzení výsledků Friedmanova testu a statisticky významný rozdíl mezi měřeními nebyl nalezen. Výsledky ve formě boxplotu jsou uvedeny na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Správnost pilotovy reakce v rámci jednotlivých měření



## 4 Diskuze výsledků

Nastavení experimentu bylo provedeno tak, aby umožnilo odhalení vlivu hluku na reakční čas pilota a správnost pilotovy reakce. Účastníci experimentu byli podrobena podmínkám srovnatelnými s hladinami intenzity, které se vyskytují v kokpitu dopravního letounu, přičemž byl každý subjekt vystaven stejným podmínkám, jako jeho kolegové v rámci dalších měření. Všichni piloti pocházeli z věkově podobné skupiny se srovnatelnými nálety a zkušenostmi. Prezentované výsledky by vzhledem k nízkému věku účastníků neměly být ovlivněny úpadkem kognitivních schopností pilota vlivem stárnutí. Tyto podmínky měly zajistit reprezentativnost zvoleného výběru.

I přes tyto snahy nebyl negativní vliv hluku na reakční čas a správnost pilotovy reakce nalezen. Nehledě na výsledky Friedmanova testu si však můžeme povšimnout zajímavých skutečností v prezentovaných výsledcích.

V rámci měření reakčního času na referenčních hladinách intenzity bylo mezikvartilové rozpětí menší než při měřeních zatížených vysokými hladinami intenzity. Toto naznačuje možnou degradaci pilotovy výkonnosti posunem horní hranice třetího kvartilu směrem k vyšším hodnotám. Medián dat ovšem nebyl vyššími hladinami intenzity zásadně ovlivněn s mírným nárůstem na hladině intenzity 92 dB(A) a mírným poklesem na hladině intenzity 70 dB(A). Na tomto základě lze tvrdit, že subjekty v rámci referenčních měření reagovaly přesněji, než pod hlukovou zátěží.

Velké mezikvartilové rozpětí v průběhu prvního referenčního měření (č. 1) bylo pravděpodobně způsobeno překvapením respondenta podobou aplikace. Pro přesnější zisk dat reakčního času s menším rozptylem mělo být přistoupeno k důslednějšímu seznámení nejen s ovládacími prvky simulátoru, ale i s aplikací samotnou. Před prvním měřením reakčního času byl respondent pouze seznámen s popisem ovládní aplikace a její funkčnost si nemohl nijak vyzkoušet. Jelikož však zbylá měření na hladině intenzity 55 dB(A) dosahovala podobných hodnot mediánu dat, není vysoká hodnota IQR považována za významnou.

Dalším faktorem, který mohl přispět ke zhoršení výsledků subjektů mezi prvním a druhým měřením mohla být nedostatečná soustředěnost respondenta na zaletění definované trati. Subjekt mohl trať letěnou bez hlukové zátěže vnímat jako letově snadnější a měření nevěnoval takový stupeň pozornosti, jako letům letěným pod zvýšenou hlukovou zátěží.

I přesto, že vliv hluku na reakční čas nebyl u zúčastněných subjektů prokázán, o negativních vlivech hluku na ostatní aspekty pilotovy výkonnosti není na základě pozorování v průběhu





experimentu pochyb. V průběhu měření byl několikrát zaznamenán případ, kdy pilot, i přes správné zopakování a potvrzení instrukce, opomenul provedení určitého prvku měření. Ve dvou případech pilot neprovedl zatáčku v posledním úseku měřené trati a v dalších dvou případech pilot nezahájil stoupání či klesání a absolvoval část letěné trati v horizontálním letu. Tento výsledek je podpořen nemalým počtem zdrojů, které popisují negativní vliv hluku na výkonnost člověka [5, 55, 63].

Výsledky bakalářské práce jsou v souladu se závěry studie z roku 2018 [59], kdy se nepovedlo prokázat statisticky významný vliv na výkonnost pilota v rámci vystavení pilotů kumulativním dávkám hluku. Oproti této studii je vzorek popsany v bakalářské práci považován za objemnější ovšem s menším počtem zkušeností v leteckém provozu. Výsledky bakalářské práce prokázaly jistý rozpor v kontextu se studií z roku 2019 [5]. Tento rozdíl byl ovšem pravděpodobně způsobem tím, že v rámci bakalářské práce byl reakční čas subjektu testován pouze jednoduchým způsobem, který spočíval ve stisknutí příslušné klávesy na klávesnici v závislosti na prezentovaném vizuálním podnětu. Ve zmíněné studii bylo k hodnocení pilotova reakčního času použito odpovědí z testu SAGAT obsahujícího otevřené otázky [5]. Rovněž oproti této studii je vzorek bakalářské práce objemnější.

Neprokázání vlivu hluku na reakční čas mohlo být zapříčiněno relativně nízkým počtem subjektů v experimentu. V rámci snahy o zachování jednotnosti statistického vzorku ovšem nebylo v dané době možné nashromáždění většího množství účastníků experimentu. Nehledě na tuto skutečnost se povedlo nashromáždřit větší počet subjektů než u měření, ze kterého tento experiment vycházel [2, 5, 59]. Dalším omezením byla krátká doba, po kterou byl účastník zvýšenému hluku vystaven. Tato doba se v rámci jednotlivých měření pohybovala kolem 30 minut. Pokud by bylo možné subjekty vystavit hluku déle, mohlo dojít k větším rozdílům mezi párovými měřeními. Panovala však obava z únavy jednotlivých subjektů v průběhu měření [69]. Výsledné ovlivnění reakčního času by tak nebylo způsobeno hlukovou zátěží, nýbrž únavou způsobenou zvýšeným hlukem. Značnou dobou trvání měření by pravděpodobně došlo k odrazení určitého už tak malého počtu subjektů.

Prezentované výsledky mohly být ovlivněny i jistou formou nevhodnosti použitého letového simulátoru. Opakovaně byla obdržena zpětná vazba týkající se nemožnosti nastavení komfortní polohy pilotního sedadla vůči monitorům s letovými a navigačními údaji. Jeden ze subjektů zmínil, že část zorného pole byla zakryta sloupkem řízení. Pilotní sedadlo bylo možné posouvat pouze dopředu nebo dozadu. Dostupný rozsah však nebyl dostatečný. Možnost vertikálního nastavení



chyběla. Zejména subjekty menšího vzrůstu mohly pociťovat určitý stupeň diskomfortu, neboť pro dosažení na sloupek řízení bylo nutné natáhnout paži více, než je u běžného letounu obvyklé.

Rovněž doba strávená adaptací na ovládání simulátoru mohla být u jednotlivých subjektů rozdílná a i přesto, že byl první let považován vlivem absence hlukové zátěže za nejjednodušší, výsledky některých subjektů mohly být tímto ovlivněny. Pokud se v rámci výsledků experimentu vyskytla chyba způsobená adaptací subjektu na simulátor, lze předpokládat její postupnou redukci v průběhu měření postupnou adaptací subjektů na ovládání letového simulátoru. Na tuto skutečnost bylo v průběhu návrhu experimentu pamatováno a před každým měřením účastník experimentu absolvoval seznamovací let. Délka seznamovacího letu ale pravděpodobně nebyla dostačující, byť byl každý účastník verbálně dotázán, zda je mu ovládání simulátoru jasné a zda mu ovládání simulátoru nečiní potíže. Měření reakčního času ovšem nebylo prováděno přímo v interakci s letovým simulátorem a dle názoru autora je tento vliv na získaná data minimální.

Uvážíme-li dostupné vybavení, nastavení experimentu bylo dostatečné pro provedení experimentu a na základě získaných dat lze tvrdit, že u zkoumaného výběru mladých pilotů nebyl vliv hluku na reakční čas prokázán. Podobné výsledky lze očekávat i u ostatních pilotů stejné věkové skupiny s obdobnými zkušenostmi.



## 5 Závěr

Bakalářská práce si kladla za cíl nalézt vztah mezi hlukem v pilotní kabině a reakčním časem pilota, který je tomuto hluku v průběhu letu vystaven. Pojem hluk v tomto kontextu označuje jakýkoliv nechtěný zvuk, kterému je posádka vystavena. V rámci rešerše jsou představeny základní právní dokumenty, které se věnují maximálnímu hluku na pracovišti v českém právním systému a rovněž standardy doporučené pro certifikaci letounů v evropském prostředí. V těchto dokumentech můžeme nalézt maximální možnou hladinu intenzity, které může být pracovník v průběhu své pracovní doby vystaven. Hodnoty, které byly v průběhu měření v kokpitu dopravního letounu B737-700 zjištěny, překračují legislativou zmíněnou hranici a pilotům je na tomto základě nutné poskytnout osobní ochranné pomůcky. Pilotní headsety slouží jako osobní ochranná pomůcka a zároveň jako nástroj ke komunikaci. Současná konstrukce je zastoupena dvěma typy pilotních headsetů – headsety s pasivním nebo aktivním tlumením. Někteří piloti však sluchátka nepoužívají vůbec a nebo je na značnou část letu odkládají. Takové jednání může vést k dlouhodobému poškození sluchu pilota. V rámci rešerše bylo zjištěno, že zvýšená hladina intenzity má vliv na výkonnost pilota. Většina zdrojů se přiklání k negativnímu ovlivnění výkonnosti pilota hlukem, ovšem tyto výsledky nejsou zcela konzistentní. Reakční čas byl v dostupných zdrojích řešen pouze jako jeden z indikátorů pilotovy výkonnosti.

Na základě zdrojů uvedených v teoretické části práce byl navržen experiment kladoucí si za cíl nalezení vlivu hluku na reakční čas pilota. Statisticky významný vliv hluku na reakční čas pilota nebyl nalezen. Neprokázaní vlivu hluku na reakční čas pilota mohlo být způsobeno úzkým vzorkem měřených subjektů sestávajícího z 20 mladých pilotů z věkové skupiny 21–24 let se srovnatelným náletem  $125,8 \pm 34$  hodin a krátkou expozicí subjektů vyšším hladinám intenzity popř. jistou formou nevhodnosti letového simulátoru. Prezentované výsledky jsou však v souladu se studii prezentujícími snížení pilotovy výkonnosti v závislosti na zvýšené hladině intenzity zvuku.

I přesto, že se nepovedlo prokázat negativní vliv hluk na reakční čas pilota, je používání pilotních headsetů doporučeno, neboť zvýšený hluk v pilotní kabině může způsobit postupné zúžení sluchového pole pilota a ovlivnit jeho výkonnost. V rámci dalšího zkoumání popsané tématiky by bylo vhodné zařazení většího množství subjektů do experimentu a utvoření průřezu z různých věkových skupin. Následný výzkum by se měl zaměřit na delší časové úseky. Tento krok



je logickým pokračováním zkoumání problematiky vlivu hluku na reakční čas, neboť standardní lety dopravních letounů nesestávají z třicetiminutových úseků, ale mnohdy dosahují značného trvání, což může v případě zaoceánských letů představovat časové úseky dlouhé i 18 hodin. Problematika hluku je navíc vnímána i samotnými piloty, kteří si jsou vědomi skutečnosti, že zvýšený hluk může ovlivnit bezpečnost letu.



## Seznam použité literatury

1. BECKER, Ami B; WARM, Joel S; DEMBER, William N; HANCOCK, Peter A. Effects of jet engine noise and performance feedback on perceived workload in a monitoring task. *The international journal of aviation psychology*. 1995, roč. 5, č. 1, s. 49–62.
2. IVOŠEVIĆ, Jurica; BUCAK, Tino; SUMPOR, Davor. Assessment Methodology of Interior Aircraft Noise Influence on Pilot Performance and Temporary Threshold Shift. *Promet-Traffic&Transportation*. 2016, roč. 28, č. 5, s. 487–496.
3. MCFADDEN, Kathleen L; TOWELL, Elizabeth R. Aviation human factors: a framework for the new millennium. *Journal of Air Transport Management*. 1999, roč. 5, č. 4, s. 177–184. ISSN 0969-6997. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(99\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(99)00011-3).
4. RACH, Stefan; DIEDERICH, Adele; COLONIUS, Hans. On quantifying multisensory interaction effects in reaction time and detection rate. *Psychological research*. 2011, roč. 75, s. 77–94.
5. BAO, Jun-Ping; SUN, You-Chao; LIU, Xin-Chao. Research on Pilot Situation Awareness in Noise Environment. In: *2019 4th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT)*. IEEE, 2019, s. 129–133.
6. LEPIL, Onřej; BARTUŠKA, Karel; ŠIROKÁ, Miroslava; ŠAMÁNEK, Stanislav; ŠEDIVÝ, Přemysl. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. 4. vydání. Praha: Prometheus Praha, 2001. ISBN 978-80-7196-387-5.
7. MALÁ, Zuzana. *Fyzika I*. Praha, 2008.
8. SALT, Alec N; KALTENBACH, James A. Infrasound from wind turbines could affect humans. *Bulletin of Science, Technology & Society*. 2011, roč. 31, č. 4, s. 296–302.
9. WIKISKRIPTA. *Práh sluchu a sluchové pole* —. 2019. Dostupné také z: [https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Pr%C3%A1h\\_sluchu\\_a\\_sluchov%C3%A9\\_pole&oldid=419781](https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Pr%C3%A1h_sluchu_a_sluchov%C3%A9_pole&oldid=419781). [Online; navštíveno 21. 06. 2023].
10. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky: Rychlost zvuku*. Praha, 2006. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/189-rychlost-zvuku>.



11. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky*. Praha, 2006. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/>.
12. BISHOP, Owen. *Understand electronics*. Elsevier, 2001.
13. *Hluk v pracovním prostředí*. Šrobárova 49/48 Praha 10, 100 00, 2022. Dostupné také z: <https://szu.cz/tema/pracovni-prostredi/factory-pracovniho-prostredi/fyzikalni/hluk-prac/hluk-v-prac-prost/>.
14. WRIGHT, Gavin. *A-weighted decibel (dBA or dB(A))*. 2022. Dostupné také z: [www.techtarget.com](http://www.techtarget.com).
15. *THE HUMAN HEARING RANGE - WHAT CAN YOU HEAR?* 18 Tai Seng Street, Singapore, 2016. Dostupné také z: <https://www.widex.com/en/blog/global/human-hearing-range-what-can-you-hear/%5C#:~:text=While%5C%20to%5C%20000Hz,2000%5C%20%5C%2D%5C%205000%5C%20Hz%5C%20frequency%5C%20range>.
16. *How A-weighting Reflects What We Hear*. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317 USA, 2022. Dostupné také z: <https://www.ansys.com/blog/what-is-a-weighting>.
17. *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. 2011. Dostupné také z: [zakonyprolidi.cz/cs/2011-272%5C#p1-1-a](http://zakonyprolidi.cz/cs/2011-272%5C#p1-1-a).
18. *Easy Access Rules for Large Aeroplanes (CS25)*. Amendment 27. 2023. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-large-aeroplanes-cs-25>.
19. MELLERT, Volker; BAUMANN, Ingo; FREESE, Nils; WEBER, Reinhard. Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots. *Aerospace Science and Technology*. 2008, roč. 12, č. 1, s. 18–25.
20. *Federal Aviation Regulations: Part25*. CFR, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2022-title14-vol1/pdf/CFR-2022-title14-vol1-part25.pdf>.
21. WU, Yuhang; AI, Yan-ting; ZE, Wang; JING, Tian; SONG, Xiang; CHEN, Yingtao. A novel aerodynamic noise reduction method based on improving spanwise blade shape for electric propeller aircraft. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2019, roč. 2019, s. 1–10.



22. HANSON, Donald B; FINK, Martin R. The importance of quadrupole sources in prediction of transonic tip speed propeller noise. *Journal of Sound and Vibration*. 1979, roč. 62, č. 1, s. 19–38.
23. PEIXUN, YU; JIAHUI, Peng; JUNQIANG, Bai; XIAO, HAN; XIANG, Song. Aeroacoustic and aerodynamic optimization of propeller blades. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2020, roč. 33, č. 3, s. 826–839.
24. MILJKOVIĆ, Dubravko. Fault detection for aircraft piston engine by exhaust noise analysis. In: *2011 Proceedings of the 34th International Convention MIPRO*. IEEE, 2011, s. 756–761.
25. MOSHKOV, Petr. Study of an aviation opposed piston engine noise. *Aerospace Systems*. 2022, roč. 5, č. 4, s. 607–613.
26. JAMES, S. *Defining the cockpit noise hazard, aircrew hearing damage risk and the benefits active noise reduction headsets can provide*. 2005. Tech. zpr. QINETIQ LTD FARNBOROUGH (UNITED KINGDOM).
27. *Principles of Flight: ATPL Ground Training Series*. 1. vyd. Oxford: CAE Oxford Aviation Academy, 2014.
28. HUFF, Dennis L. Noise reduction technologies for turbofan engines. In: *35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2006)*. 2007. Č. E-15787.
29. LIU, Xiran; ZHAO, Dan; GUAN, Di; BECKER, Sid; SUN, Dakun; SUN, Xiaofeng. Development and progress in aeroacoustic noise reduction on turbofan aeroengines. *Progress in Aerospace Sciences*. 2022, roč. 130, s. 100796.
30. *Aviation Benefits Beyond Borders: Chevron nozzles reduce noise*. Geneva, Switzerland, 2013. Dostupné také z: <https://aviationbenefits.org/newswire/2013/06/chevron-nozzles-reduce-noise/>.
31. *Bombardier.com: Flybe Takes Delivery of Its 50th Bombardier Q400 Airliner*. Toronto, 2009. Dostupné také z: <https://customer.aero.bombardier.com/webd/Bag/CustSite/BRAD/OpenSite.nsf/vwWebNews/19C28323AEED04E1852575BE0060369D?opendocument>.





32. FALCÃO, Taiana Pacheco; LUIZ, Ronir Raggio; SCHÜTZ, Gabriel Eduardo; MELLO, Márcia Gomide da Silva; CÂMARA, Volney de Magalhães. Audiometric profile of civilian pilots according to noise exposure. *Revista de Saúde Pública*. 2014, roč. 48, s. 790–796.
33. MÜLLER, Reinhard; SCHNEIDER, Joachim. Noise exposure and auditory thresholds of German airline pilots: a cross-sectional study. *BMJ open*. 2017, roč. 7, č. 5, e012913.
34. AL-OMARI, Abdulrhman S; AL-KHALAF, Hani M; HUSSIEN, Naglaa Fayek Mohamed. Association of flying time with hearing loss in military pilots. *Saudi Journal of Medicine & Medical Sciences*. 2018, roč. 6, č. 3, s. 155.
35. BERGER, ELLIOTT H. Hearing protector performance: How they work-and-what goes wrong in the real world. 1980.
36. PIRZANSKI, Chester; CHASIN, Marshall; KLENK, Mary; MAYE, Vince; PURDY, Julie. Attenuation variables in earmolds for hearing protection devices. *The Hearing Journal*. 2000, roč. 53, č. 6, s. 44–45.
37. *Fixed Wing Headsets (Passive)*. 360 Franklin Street, Box 15054, Worcester, 2017. Dostupné také z: <https://www.davidclarkcompany.com/aviation/fixed-wing-passive.php>.
38. *David Clark Letecká sluchátka H10-13.4 (2 Jack)*. Drásov 201, 261 01, Příbram, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.pilotshop.cz/produkt/david-clark-letecka-sluchatka-h10-13-4-2-jack/>.
39. *Telex Echelon 20*. Masarykovo nám. 354 66471, Veverská Bítýška, Česká republika, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.airteam.eu/cz/p/telex-echelon-20>.
40. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky*. Praha, 2006. Dostupné také z: <http://fyzika.jreichl.com/>.
41. BENOIT, B; CAMASTRA, Christopher; KENNY, Melissa; LI, Kimberly; ROMANOWSKI, Richard; KEVIN, S. Engineering silence: Active noise cancellation. *North Carolina State University*. 2012, s. 1–12.
42. LIEBICH, Stefan; FABRY, Johannes; JAX, Peter; VARY, Peter. Signal processing challenges for active noise cancellation headphones. In: *Speech Communication; 13th ITG-Symposium*. VDE, 2018, s. 1–5.



43. KUO, Sen M; CHEN, Yi-Rou; CHANG, Cheng-Yuan; LAI, Chien-Wen. Development and evaluation of light-weight active noise cancellation earphones. *Applied Sciences*. 2018, roč. 8, č. 7, s. 1178.
44. LINDVALL, Johan; VÄSTFJÄLL, Daniel. The effect of interior aircraft noise on pilot performance. *Perceptual and motor skills*. 2013, roč. 116, č. 2, s. 472–490.
45. MOHEBBI, Rayka; GRAY, Rob; TAN, Hong Z. Driver reaction time to tactile and auditory rear-end collision warnings while talking on a cell phone. *Human factors*. 2009, roč. 51, č. 1, s. 102–110.
46. BELLINGER, David B; BUDDE, Bradley M; MACHIDA, Moe; RICHARDSON, Gary B; BERG, William P. The effect of cellular telephone conversation and music listening on response time in braking. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2009, roč. 12, č. 6, s. 441–451.
47. ALIMOHAMMADI, Iraj; ZOKAEI, Mojtaba; SANDROCK, Stephan. The effect of road traffic noise on reaction time. *Health promotion perspectives*. 2015, roč. 5, č. 3, s. 207.
48. ZAJDEL, Radosław; NOWAK, Dariusz. Simple and complex reaction time measurement: a preliminary evaluation of new approach and diagnostic tool. *Computers in biology and medicine*. 2007, roč. 37, č. 12, s. 1724–1730.
49. SOEGAARD, Mads. Hick's Law: Making the choice easier for users. *The Interaction Design Foundation*. 2016.
50. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Pilots' role in collision avoidance* [Retrieved from [http://https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory\\_circular/ac\\_90-48d\\_chg\\_1.pdf](http://https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_90-48d_chg_1.pdf)]. 2016. Č. AC 90-48D.
51. LOFFI, Jon M; WALLACE, Ryan J; JACOB, Jamey D; DUNLAP, Jared C. Seeing the threat: Pilot visual detection of small unmanned aircraft systems in visual meteorological conditions. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 2016, roč. 3, č. 3, s. 13.
52. WANYAN, Xiaoru; ZHUANG, Damin; ZHANG, Huan. Improving pilot mental workload evaluation with combined measures. *Bio-medical materials and engineering*. 2014, roč. 24, č. 6, s. 2283–2290.



53. NOEL, Jeremy B; BAUER JR, Kenneth W; LANNING, Jeffrey W. Improving pilot mental workload classification through feature exploitation and combination: a feasibility study. *Computers & operations research*. 2005, roč. 32, č. 10, s. 2713–2730.
54. BOGGS, David H; SIMON, J Richard. Differential effect of noise on tasks of varying complexity. *Journal of Applied Psychology*. 1968, roč. 52, č. 2, s. 148.
55. BROADBENT, Do Eo. Effect of noise on an “intellectual” task. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1958, roč. 30, č. 9, s. 824–827.
56. ENDSLEY, MR. Aerospace and electronics conference. *Proceedings of the IEEE*. 1988, s. 789–795.
57. NWABEKE, Kelechi. *The effect of cockpit noise on aircraft pilot psychomotor performance*. Embry-Riddle Aeronautical University, 2001.
58. WHEALE, JOHN L; O'SHEA, NOREEN M. Noise and the performance of a four-choice psychomotor task. *Ergonomics*. 1982, roč. 25, č. 11, s. 1053–1064.
59. IVOŠEVIĆ, Jurica; BUCAK, Tino; ANDRAŠI, Petar. Effects of interior aircraft noise on pilot performance. *Applied Acoustics*. 2018, roč. 139, s. 8–13.
60. ENDSLEY, Mica R. Measurement of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*. 1995, roč. 37, č. 1, s. 65–84.
61. ENDSLEY, Mica R; ROBERTSON, Michelle M. Training for situation awareness. *Situation awareness analysis and measurement*. 2000, s. 349–365.
62. ACADEMY, CAE Oxford Aviation; AGENCY, European Aviation Safety. *Human Performance and Limitations*. CAE Oxford Aviation Academy, [b.r.]. ATPL Ground Training Series. ISBN 9781906202712. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=fZ37rQEACAAJ>.
63. ZEYDABADI, Alireza; ASKARI, Jafar; VAKILI, Mahmood; MIRMOHAMMADI, Seyyed Jalil; GHOVVEH, Mohammad Ali; MEHRPARVAR, Amir Houshang. The effect of industrial noise exposure on attention, reaction time, and memory. *International archives of occupational and environmental health*. 2019, roč. 92, s. 111–116.



64. *Four Choice Reaction Time Task: User Manual: Inquisit Four Choice Reaction Time Task*. Seattle, Washington, US: Millisecond Software, LLC, 2017. Dostupné také z: <https://www.millisecond.com/download/library/v6/fourchoicereactiontimetask/fourchoicereactiontimetask/fourchoicereactiontimetask.manual>.
65. *Airman 750: Most popular light-weight aviation headset with passive noise reduction*. Robert Bosch Ring 5-7, 85630, Grasbrunn, GERMANY, [b.r.]. Dostupné také z: <https://products.telex.com/na/en/airman-750/>.
66. *ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA: o odborném zjišťování příčin vážného incidentu letounu Boeing B737-800, poznávací značky OK-TVO letu TVS1125 z LGSM do LKPR ze dne 22. srpna 2019*. Beranových 130, 199 01, PRAHA 99, 2020. Dostupné také z: <https://uzpln.cz/pdf/20200723132803.pdf>.
67. *Anderson-Darling test*. Natick, USA: MathWorks, Inc, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/stats/adtest.html>.
68. *Friedman's test*. Natick, USA: MathWorks, Inc, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/stats/friedman.html>.
69. STAVE, Allan M. The effects of cockpit environment on long-term pilot performance. *Human Factors*. 1977, roč. 19, č. 5, s. 503–514.