

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA DOPRAVNÍ  
ÚSTAV DOPRAVNÍ TELEMATIKY



DISERTAČNÍ PRÁCE

**Identifikace a sledování aktuální míry únavy  
řídících letového provozu**

Rámcové téma:

**Využití metodiky EEG pro chování operátora v dopravě**

Školitel:

doc. Ing. Bc. Tomáš Tichý, Ph.D., MBA

Zpracoval:

Ing. Bc. Petr Kouba

Praha 2021

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRAKT.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
<b>PROHLÁŠENÍ.....</b>	<b>6</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>7</b>
1.1. Únava .....	7
1.2. Řízení rizik spojených s únavou .....	8
1.3. Systémy řízení rizik spojených s únavou.....	9
1.4. Kultura bezpečnosti .....	9
1.5. Řízení letového provozu České republiky, s. p. ....	11
1.6. Motivace.....	12
1.7. Cíle disertační práce .....	14
1.8. Struktura disertační práce.....	15
<b>2. ÚNAVA V KONTEXTU JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ DOPRAVY .....</b>	<b>17</b>
2.1. Legislativní rámec.....	17
2.2. Silniční doprava.....	19
2.3. Železniční doprava.....	23
2.4. Letecká doprava .....	26
<b>3. ŘÍZENÍ RIZIK SOUVISEJÍCÍCH S ÚNAVOU V LETECKÉ DOPRAVĚ .....</b>	<b>29</b>
3.1. Smysl řízení únavy .....	29
3.2. FRMS .....	31
3.3. Řízení rizik v rámci FRMS .....	32
<b>4. AKTUÁLNÍ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>37</b>
4.1. Specifika prostředí řízení letového provozu .....	37
4.2. Způsoby měření únavy .....	39
4.3. Odborné konzultace.....	43

<b>5. METODY A REALIZACE PRAKTICKÝCH MĚŘENÍ.....</b>	<b>44</b>
5.1. Příprava měření .....	44
5.2. Návrh průběhu měření .....	47
5.3. Popis vzorku a jejich specifika .....	49
5.4. Potřebné vybavení .....	51
5.5. Vlastní měření.....	63
5.6. Použité metody.....	64
5.7. Hypotézy .....	72
<b>6. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....</b>	<b>73</b>
6.1. Výsledky.....	73
6.2. Shrnutí výsledků jednotlivých metod.....	97
6.3. Korelace .....	98
6.4. Interpretace výsledků hlasové analýzy .....	104
<b>7. DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>106</b>
7.1. Možnosti využití hlasové analýzy .....	107
7.2. Přínosy .....	108
7.3. Limitace.....	109
7.4. Spolupráce a podpora .....	111
7.5. Publikace .....	112
<b>8. ZÁVĚR.....</b>	<b>114</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>116</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>118</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>129</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>129</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>130</b>
<b>PŘÍLOHA 1 .....</b>	<b>131</b>

## **Abstrakt**

Disertační práce se zabývá popisem výzkumu, návrhu a ověření metody pro zjišťování aktuální úrovně únavy řídicích letového provozu s využitím moderních technologií, které by přispěly ke zvýšení bezpečnosti letecké dopravy. Práce popisuje kontext a motivace k řešení této problematiky a popisuje jednotlivé cíle a metody jejich dosažení. Dále také popisuje současný stav zkoumané problematiky, doposud dosažené výsledky i související projekty, které se danou oblastí zabývají. Při zpracování byla použita česká i zahraniční literatura, konzultace s odborníky a poznatky z dosavadní činnosti.

Praktická část disertační práce se zabývá návrhem metodiky pro identifikaci a sledování aktuální úrovně únavy operátorů v dopravě se zaměřením na řídicí letového provozu, v jejichž prostředí není většina vědeckých metod detekce únavy použitelná kvůli významnému narušení běžného komfortu. Výzkum se proto zaměřuje na metodu hlasové analýzy, která nenarušuje standardní provoz, ale která však dosud nebyla dostatečně vědecky ověřena. Realizovaný výzkum využívá vědecky ověřenou metodu EEG a další podpůrné metody k validaci metody hlasové analýzy s cílem jejího využití pro účely identifikace a měření aktuální úrovně únavy operátorů v dopravě, konkrétně v prostředí řízení letového provozu, avšak s potenciálem pro použití ve všech druzích dopravy, kde se běžně využívá hlasová komunikace.

## **Klíčová slova**

únava, řízení rizik spojených s únavou, riziko, operátor, doprava, bezpečnost, řízení letového provozu, hlasová analýza, EEG

## **Abstract**

The thesis deals with the description of the research, design and verification of a method for determining the current level of fatigue of air traffic controllers using modern technologies that would contribute to improve safety of air traffic. The thesis describes the context and motivation to solve this problem and describes the individual goals and methods of achieving them. It also describes the current state of the researched issues, the results achieved so far and related projects that deal with the area. Czech and foreign literature, consultations with experts and knowledge from previous activities were used in the processing.

The practical part of the thesis deals with the design of a methodology for identifying and monitoring the level of fatigue of operators in transport with a focus on air traffic controllers. Many scientific methods of fatigue detection are not applicable in the environment of transport operators due to a significant disruption to the normal comfort of operators. The research therefore focuses on the method of voice analysis, which does not disrupt standard operation, but which has not yet been sufficiently scientifically verified. The described project uses a scientifically validated EEG method and other supporting methods to validate the voice analysis method in order to use it for identification and measuring the current fatigue level of operator, specifically in air traffic control, but with potential for use in all modes of transport, where voice communication is commonly used.

## **Keywords**

fatigue, fatigue risk management, risk, operator, transport, safety, air traffic control, voice analysis, EEG

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

## 1. ÚVOD

Únava je považována za nebezpečí, které předvídatelně degraduje různé typy lidské výkonnosti a které může přispět k výskytu chyb, které mohou z pohledu dopravy vyústit v dopravní nehody nebo jiné události v dopravě. Tato práce se s ohledem na autorovo profesní zaměření zabývá dopravou leteckou, konkrétně řízením rizik souvisejících s únavou u poskytovatelů letových provozních služeb.

V úvodní kapitole je představena problematika únavy a řízení rizik spojených s únavou včetně úvodu do formalizovaných systémů řízení rizik spojených s únavou a je zmíněn rovněž důležitý aspekt fenoménu tzv. kultury bezpečosti. Úvodní kapitola rovněž popisuje cíle disertační práce a její strukturu.

### 1.1. Únava

Únavou je nazýván fyziologický stav snížené duševní nebo fyzické způsobilosti vykonávat své povinnosti, vyplývající z nedostatečného spánku nebo delší nespavosti, denní fáze nebo pracovního zatížení (duševní nebo tělesné aktivity), který může narušit bdělost příslušného jedince a schopnosti zajistit bezpečné vykonávání jeho povinností. [40]

Unavený jedinec je méně pozorný, má horší schopnost zpracovávat informace, pomaleji reaguje, déle mu trvá rozhodování a nejeví zájem o práci ve srovnání s jedincem, který není únavou ovlivněn. Únava zvyšuje pravděpodobnost chyby a nepříznivě ovlivňuje výkon daného jedince.

Unavený personál nemusí dostatečně vnímat hrozby a může tolerovat rizika, která jsou obvykle chápána jako nepřijatelná, akceptuje nižší standardy výkonu a bezpečnosti. Komunikace personálu, monitorovací a koordinační aktivity jsou únavou nepříznivě ovlivněny. Lidé si často zcela neuvědomují, do jaké míry je jejich výkonnost snížena únavou, a nemusí si být vědomi poklesu pozornosti, či dokonce krátkého "klimbání". Únavu personálu je obtížné zjistit - na rozdíl od jiných příčin dočasné duševní poruchy, jako je vliv drog a alkoholu, neexistuje žádný "krevní test" prokazující únavu. Vzhledem k těmto vlastnostem je únava zvláštním problémem v jakékoliv bezpečnostně-kritické práci.

## 1.2. Řízení rizik spojených s únavou

Stejně jako všechny ostatní lidské aktivity je i oblast dopravy zatížena velkým množstvím rizik. U žádné lidské činnosti nebo u člověkem vytvořeného systému nelze vyloučit jeho selhání. V oblasti letecké dopravy se například s nadsázkou uvádí, že provozně nejbezpečnější letiště je letiště uzavřené. Je tedy zřejmé, že žádný provoz se neobejde bez souvisejících rizik, je tudíž nutné tato rizika znát a určit míru, do které je jejich výskyt přijatelný a za kterou už není vhodné se dostat. K tomuto účelu vznikají systémy řízení provozní bezpečnosti (Safety Management System). V každém druhu dopravy mohou mít tyto systémy svá specifika, avšak základní principy a požadavky jsou velmi podobné. Většinou se jedná o tři základní oblasti:

- dosažení provozní bezpečnosti,
- zajištění provozní bezpečnosti,
- podpora provozní bezpečnosti.

Jednou z hlavních součástí těchto systémů je identifikace možných nebezpečí, hodnocení souvisejícího rizika a možnosti jejich zmírňování. Systémy řízení provozní bezpečnosti se neobejdou rovněž bez systému hlášení provozních událostí, šetření incidentů, přijímání nápravných opatření, šíření poznatků a mnoha dalších procesů.

Únavu je možné chápat jako jeden z dalších zdrojů nebezpečí, mezi která řadíme například výpadky technických systémů, nestandardní provozní situace, selhání postupu a podobně. K únavě je však potřeba přistupovat specificky. Na únavu jakožto na jeden z lidských faktorů může mít vliv mnoho často i těžko identifikovatelných aspektů – kvalita a množství spánku, psychická a fyzická pohoda, denní doba, rodinná situace atd. V oblasti řízení rizik souvisejících s únavou je tedy velmi důležitá osobní zodpovědnost jednotlivce, který nejlépe zná svůj aktuální stav a měl by na základě něho přijímat příslušná opatření. Do jaké míry takto činí, již souvisí s úrovní kultury bezpečnosti, která je popsána dále v textu.

Avšak k tomu, aby mohl jedinec (v tomto případě operátor v dopravě) efektivně řídit svou únavu, musí mu být zajištěny dostatečně vhodné podmínky. Zde už hovoříme především o organizacích působících v oblasti dopravy, které by svým



zaměstnancům měly zajistit jako minimum vhodné rozvržení práce a dále s rostoucí kulturou bezpečnosti dané organizace vzdělávání v oblasti řízení únavy stejně jako ostatních rizik plynoucích z jejich povolání.

### **1.3. Systémy řízení rizik spojených s únavou**

Systém řízení rizik spojených s únavou (Fatigue Risk Management System) je možné definovat jako „na údajích založené prostředky průběžného sledování a řízení bezpečnostních rizik spojených s únavou na základě vědeckých principů a znalostí stejně jako provozních zkušeností, které směřují k zajištění toho, že příslušný personál vykonává své úkoly s odpovídající úrovní bdělosti.“ [40]

Velmi často je tento systém součástí již fungujícího systému řízení bezpečnosti (Safety Management System) a únava je považována za jedno z možných rizik. Nedochozí tak k vytváření speciálních postupů a procesů pro identifikaci nebezpečí, hodnocení souvisejících rizik a jejich omezování. Stejně tak je často využíván již zaběhlý způsob dokumentace a komunikace v daném podniku. Jednotlivé součásti a požadavky na systém řízení rizik souvisejících s únavou jsou popsány v kapitole 3, kde je uveden konkrétní případ pro poskytovatele letových provozních služeb. Popsané principy a pravidla je však možné využít při vytváření systému v jakémkoliv odvětví, samozřejmě s přihlédnutím k jeho specifikům, případně zákonným požadavkům. Zákonné požadavky uvedené v tomto dokumentu představují jakýsi absolutní základ pro řízení únavy. Jednou ze součástí systému řízení rizik souvisejících s únavou je totiž i vytváření rozpisů směn operátorů v dopravě tak, aby byl operátorům umožněn dostatečný čas mezi směnami na odpočinek, aby směny byly přiměřeně dlouhé a výkon práce operátorů tudíž byl přijatelně bezpečný.

### **1.4. Kultura bezpečnosti**

Úroveň, na které se řídí rizika související s daným provozem a samozřejmě tedy i únava, do značné míry souvisí s vyspělostí společnosti/organizace/podniku, kterou je možné vyjádřit jako kulturu bezpečnosti. Kulturu bezpečnosti představují postoje a hodnoty, sdílené v daném podniku, které se týkají provozní bezpečnosti (safety). Jinými slovy, kultura bezpečnosti ukazuje, jak je provozní bezpečnost důležitá pro daný podnik, do jaké míry je brána v úvahu a především:

- jaký je přístup managementu k provozní bezpečnosti,
- jak se management účastní procesů řízení provozní bezpečnosti,
- jaké mají pracovníci možnosti ovlivnit postoj a procesy organizace, týkající se provozní bezpečnosti, a
- jaké v podniku existují systémy hlášení.

Kulturu bezpečnosti nelze vytvořit nebo zrušit – existuje v povědomí lidí, avšak nelze ji institucionalizovat. Zároveň je jedním ze zásadních faktorů pro úspěšnost podniku, pokud jde o provozní bezpečnost. Lze říci, že v současnosti je vysoká úroveň kultury bezpečnosti důležitým předpokladem zvyšování provozní bezpečnosti. Přitom charakter a stav kultury bezpečnosti v daném podniku může hodně napovědět, kam je třeba soustředit úsilí a naopak odkud lze čerpat energii k zajištění a zlepšení provozní bezpečnosti.

Kultura bezpečnosti nemusí být samozřejmě omezena pouze na podniky, lze popsat kulturu bezpečnosti dopravy v daném státě. Tato pak představuje například postoje řidičů k dopravním předpisům a jejich respektování, zda dodržují pravidla kvůli bezpečnosti nebo naopak pouze kvůli předcházení postihu. Zpravidla je možné říci, že v silniční dopravě je kultura bezpečnosti velice nízká, protože je to doprava dostupná široké vrstvě obyvatel. Čím je náročnější získat oprávnění pro provozování určitého typu dopravy, tím bývá kultura bezpečnosti vyšší. Opět však závisí na jednotlivcích a na společnosti, pro kterou pracuje, či ve které se pohybuje. Obecně nejvyšší kultura bezpečnosti je v komerční letecké dopravě a v podnicích zajišťující její provoz. Je to dáno vysokou mírou kvalifikace zaměstnanců v tomto odvětví, vysokou mírou zodpovědnosti a do určité míry i prestiží těchto pozic. Požadavky na řidiče z povolání a pilota dopravního letadla jsou nesrovnatelné, získání pilotního průkazu (či kvalifikace řídicího letového provozu) je finančně i časově velice náročné a zodpovědnost práce mnohonásobně vyšší. Rovněž následky případné nehody v letecké dopravě mají výrazně závažnější dopady než u silniční dopravy, což má na úroveň kultury bezpečnosti také vliv. Nicméně je nutné podotknout, že i v letecké dopravě se vyskytují oblasti, kde je úroveň kultury bezpečnosti stále nízká. Jedná se především o takzvané všeobecné letectví, kde získání licence není tak náročné, průběžný výcvik je minimální a dochází zde často k porušování pravidel, jejichž dodržování prakticky není vymáháno.

## 1.5. Řízení letového provozu České republiky, s. p.

Dominantním poskytovatelem letových provozních služeb v České republice je státní podnik Řízení letového provozu ČR, který se stejně jako další evropští a světoví poskytovatelé letových provozních služeb aktivně zabývá řízením rizik včetně rizik plynoucích z únavy. Jedná se o prostředí s vysokou úrovní kultury bezpečnosti, ve kterém v posledních letech dochází vedle zavedeného systému řízení rizik (Safety Management System) k postupné implementaci systému řízení rizik souvisejících s únavou (FRMS). V rámci zavádění tohoto systému byly identifikovány problematické oblasti, které vedly k motivaci realizovat tento výzkum a formulaci jeho konkrétních cílů, které mají významný praktický přínos.

Řízení letového provozu České republiky, s. p. (ŘLP ČR, s. p.) je poskytovatelem moderních a bezpečných letových provozních služeb v českém vzdušném prostoru. Posláním ŘLP ČR, s. p. je podílet se na zajišťování bezpečných, nákladově efektivních a dlouhodobě udržitelných letových navigačních služeb v prostředí vytvářejících se funkčních bloků vzdušného prostoru, které naplní očekávání všech uživatelů z pohledu dnešní a budoucí poptávky v dynamicky se rozvíjejícím prostředí letecké dopravy jak na národní úrovni, tak v kontextu vývoje ATM v Evropě. [119]

Hlavním posláním Řízení letového provozu ČR, s. p. je poskytování letových provozních služeb. Tyto služby jsou poskytovány za účelem zabránění srážkám mezi letadly, mezi letadly a překážkami na provozní ploše a pro udržování rychlého a spořádaného toku letového provozu. Nejdůležitějším produktem podniku je bezpečnost letového provozu. [119]

V souladu s právními předpisy a mezinárodními standardy civilního letectví, poskytuje ŘLP ČR, s. p. veřejné letové provozní služby uživatelům ve vzdušném prostoru České republiky a na letištích Praha - Ruzyně, Brno - Tuřany, Ostrava - Mošnov a Karlovy Vary. Jedná se o tyto základní typy služeb:

- Služba řízení letového provozu (ATC), do níž patří:
  - Oblastní služba řízení
  - Přibližovací služba řízení
  - Letištní služba řízení / Služba řízení na odbavovací ploše

- Letová informační služba (FIS)
- Pohotovostní služba (ALRS)
- Ohlašovna letových provozních služeb [119]

## 1.6. Motivace

Jak plyne z poskytnutého teoretického úvodu, jako jedna z problematických oblastí FRMS se jeví způsob zjišťování únavy operátorů v dopravě (viz proaktivní způsob identifikace nebezpečí v kapitole 3.3). Pro tento účel existují subjektivní metody jako vyplňování dotazníků, spánkových diářů či různé škály stanovující přijatelnost únavy jedince. Tyto metody však mají značná omezení a je proto nutné nalézt objektivní metody měření únavy. Stanovení objektivní metody měření únavy je předmětem výzkumu této práce a je dále rozvíjeno v dalších kapitolách.

V současné době neexistuje žádná spolehlivá a v praxi řízení letového provozu použitelná metoda pro měření aktuální úrovně únavy. Prostředí řízení letového provozu klade na takové měření značně náročné požadavky (viz kapitola 4.1) a tudíž mnohé metody pro prokazatelnou identifikaci únavy, jejichž spolehlivost byla vědecky ověřena, není možné využít.

Z takovýchto metod je možné jmenovat elektroencefalografii (EEG), která využívá pro identifikaci únavy změny v elektrické aktivitě mozku (viz kapitola 4.2), ale její použití vyžaduje značný zásah do běžného komfortu měřeného jedince (nasazení elektrodové čepice, připojení k EEG přístroji), což i při počtu řídicích letového provozu ve směně v běžné provozní špičce není prakticky realizovatelné.

Jako další metodu je možné jmenovat sledování pohybu očí nebo konkrétně její dílčí metody – mechanické metody, videookulografii nebo elektrookulografii (EOG), která je založena na měření změn elektrického potenciálu pomocí elektrod umístěných okolo očí. Metody v této kategorii jsou opět založeny na vybavení pracoviště kamerami nebo přímo umístění elektrod v okolí měřeného jedince. I tato metoda je tím pádem příliš velkým zásahem do běžného provozu.

Dalšími metodami jsou měření fyziologických změn jako krevního tlaku a tepu, tyto jsou však doporučovány především jako metody doplňkové a opět se při jejich použití naráží na nevýhodu ovlivnění běžného výkonu funkce daného operátora.

Výše uvedené metody sledování únavy je však možné využití v rámci výzkumu jako podporu pro validaci ostatních, dosud neověřených metod.

Hlavním požadavkem na metodu je tudíž její „neintruzivnost“. Metoda, která by pro identifikaci únavy na stanovištích řízení letového provozu mohla být využita, musí co nejméně ovlivňovat běžný chod stanoviště. Průzkumem současného stavu v oblasti sledování únavy byla jako nejvhodnější metoda identifikována hlasová analýza.

Hlasová analýza je založena na skutečnosti, že hlasivky jsou sval, který je při různých situacích různě napínán. Technologie pro vrstvenou hlasovou analýzu, LVA™, je vyvíjena již od roku 1997 a detekuje změny v hlase, které jsou způsobeny různými aktivitami v mozku, protože různé emoce mají i různý vliv na lidský hlas. Vrstvená analýza hlasu tak poskytuje vhled do emočních a logických procesů, které se odehrávají v mozku a projevují se v lidském hlase. Fyzický proces tvorby hlasu (dýchání, napínání svalů) je ovlivněn mozkovou aktivitou a způsobuje změny v charakteristice hlasu a to jak ve formě, tak v plynulosti. [41] Tato metoda prozatím nikde nebyla využita pro měření únavy, na Letecké škole Řízení letového provozu ČR, s. p. byla však po dva roky s poměrně dobrými výsledky využívána pro identifikaci míry stresu žáků ve výcviku. [55] O spolehlivosti metody svědčí i recenze z oblasti call-center, odhalování pojistných podvodů či šetření trestných činů. V rámci disertační práce je blíže popsáno fungování této metody (viz kapitola 4.2), samozřejmě s ohledem na know-how a obchodní tajemství firmy, jež technologii vyvíjí.

Hlasová analýza je ideálním kandidátem na využití v prostředí řízení letového provozu a to z několika důvodů. Využití této metody je zcela „neintruzivní“, nijak neomezuje řídicí letového provozu, což je základní a zásadní předpoklad. Řídicí letového provozu nesmí být rušeni žádnými vnějšími vlivy z důvodu nutnosti naprostého soustředění a koncentrace na vykonávanou činnost. I z toho důvodu jsou jednotlivá řídicí pracoviště k tomuto účelu všelijak uzpůsobována z pohledu ergonomie. Prostředí řízení letového provozu se jeví jako zcela vhodné pro využití hlasové analýzy a to z důvodu nepřetržité komunikace mezi pozemními stanovišti a posádkami letadel (na rozdíl od jiných druhů dopravy, kde komunikace téměř neprobíhá). Další značnou výhodou je nutnost minimálních technických úprav v již používaných systémech. V současné době je veškerá komunikace nahrávána a to

včetně tzv. background noise, neboli komunikace, která neprobíhá prostřednictvím radiokomunikačních prostředků, ale pouze v rámci jednoho či více pracovišť v bezprostřední blízkosti. Z pohledu hlasové analýzy je tudíž postačující nahrávaná data v reálném čase analyzovat.

Nevýhodou této metody je však skutečnost, že hlasová analýza doposud nebyla dostatečně vědecky ověřena a její použití v prostředí řízení letového provozu prozatím nebylo nikde aplikováno.

## **1.7. Cíle disertační práce**

Cílem této disertační práce je validace hlasové analýzy s využitím EEG a případně dalších vědecky ověřených metod a návrh metodiky využití hlasové analýzy pro účely identifikace a měření aktuální míry únavy operátorů v dopravě, konkrétně v prostředí řízení letového provozu.

V rámci disertační práce jsou naplňovány následující dílčí cíle, které byly definovány ve studii k disertační práci, jež byla představena během rozpravy na Ústavu dopravní telematiky a v rámci státní doktorské zkoušky:

- Příprava a realizace série měření pro validaci metody hlasové analýzy s využitím EEG.
- Detekce reakčního času pro ověření správné korelace EEG i hlasové analýzy a jako vhodný marker pro sledování únavy.
- Identifikace a volba dalších vhodných vědecky ověřených metod pro validaci hlasové analýzy.
- Identifikace nejvhodnějších „emočních parametrů hlasu“ či jejich kombinace pro účely sledování únavy.
- Nalezení korelace mezi jednotlivými parametry hlasové analýzy a parametry jiných, vědecky ověřených metod.
- Využití metod subjektivního hodnocení únavy jako podpory pro ověření metody hlasové analýzy.

Následující kapitoly poskytují velmi zevrubné přiblížení problematiky. Detailně popisují přístup k řízení rizik souvisejících s únavou v jednotlivých druzích dopravy a v oblasti letecké dopravy přibližují procesy a nástroje, které se stávají součástí implementovaných systémů řízení rizik souvisejících s únavou.

## 1.8. Struktura disertační práce

Tato disertační práce je rozdělena do několika hlavních kapitol, které tvoří spolu související logické celky. Kapitola 1 slouží jako vhled do tématu vysvětlením hlavním pojmů a kontextu, který je pro další pochopení cílů práce nezbytný. V kapitole 2 je již problematika únavy operátorů v dopravě začleněna do kontextu legislativního rámce, jsou identifikovány nedostatky, které z řízení únavy pouze pomocí legislativních nástrojů plynou. Pro celkový přehled je uveden legislativní rámec pro všechny druhy dopravy, avšak od kapitoly 3 se práce detailně zabývá již pouze řízením rizik souvisejících s únavou v prostředí letecké dopravy.

Tato třetí kapitola detailně popisuje principy a smysl řízení rizik souvisejících s únavou v letecké dopravě s důrazem na poskytovatele letových provozních služeb a jejich operátory – především řídící letového provozu. V této kapitole je popsán možný praktický příklad podoby systému řízení rizik souvisejících s únavou (FRMS), jeho součásti a cíle. Zároveň tato kapitola identifikuje oblasti, které jsou v současné době v systémech řízení rizik souvisejících s únavou nedostatečně pokryty a to z důvodu chybějící metodiky. Jedná se o prostředky pro monitorování aktuální míry únavy řídících letového provozu. Identifikace takových prostředků a stanovení metodiky jejich použití je hlavním cílem této disertační práce.

Kapitola 4 dále do hloubky fenomén únavy ve vysoce specifickém prostředí, jakým poskytování letových provozních služeb bez pochyb je, a popisuje aktuální poznatky týkající se způsobu měření únavy s cílem nalézt metodu vhodnou pro použití v tomto prostředí. Nejvhodnější metodou pro sledování aktuální míry únavy se jeví hlasová analýza.

Kapitolou 5 začíná praktická část disertační práce, která popisuje návrh a realizaci měření pro validaci hlasové analýzy pomocí EEG a dalších vědecky ověřených metod. Tato kapitola popisuje přípravu měření, které proběhlo v podmínkách téměř reálného řízení letového provozu, s kvalifikovaným personálem a reálným provozem, což se považuje za největší přínos této práce. V kapitole 5 je popsána náročná několikaletá příprava tohoto měření, jeho podmínky, potřebné vybavení, použité metody a hypotézy, které byly před realizací tohoto projektu stanoveny.

Kapitola 6 představuje detailně výsledky měření, jejich interpretaci a v kapitole 7 jsou uvedeny přínosy, limitace a autor v této kapitole rovněž stanovuje na základě diskuse těchto výsledků konkrétní doporučení.

Závěr je formulován v kapitole 8.



## 2. ÚNAVA V KONTEXTU JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ DOPRAVY

Tato kapitola má za cíl začlenit problematiku únavy operátorů v dopravě do kontextu legislativního rámce a zároveň identifikuje nedostatky, které z řízení únavy pouze pomocí legislativních nástrojů plynou. Pro celkový přehled je uveden legislativní rámec pro všechny druhy dopravy, zacílení na leteckou dopravu pak následuje od kapitoly 3.

### 2.1. Legislativní rámec

Obecně bez ohledu na druh dopravy je problematika únavy okrajově ošetřena v prostředí České republiky v *Zákoníku práce (zákon 262/2006 Sb.)* [131] a v *zákoně č. 475/2001 Sb., o pracovní době a době odpočinku zaměstnanců s nerovnoměrně rozvrženou pracovní dobou v dopravě* [134].

#### 2.1.1. Zákoník práce

Tento zákon upravuje právní vztahy vznikající při výkonu závislé práce mezi zaměstnanci a zaměstnavateli; tyto vztahy jsou vztahy pracovněprávními. Hovoříme zde tedy o operátorech v dopravě, kteří jsou v pracovněprávním vztahu k nějakému zaměstnavateli, v tomto případě se jedná o profesionály – řidiče, strojvedoucí, piloty. Vyjma železniční dopravy se však ve všech ostatních druzích dopravy vyskytují taktéž operátoři „amatéři“, kteří při výkonu své dopravní činnosti tomuto zákonu přirozeně nepodléhají. Mimo personál zajišťující provoz vlastního dopravního prostředku mezi operátory v dopravě řadíme také operátory zajišťující bezpečnost a plynulost provozu – dispečery, řídící letového provozu a podobně.

Konkrétně se *Zákoník práce (zákon 262/2006 Sb.)* [131] vztahuje na následující kategorie zaměstnanců:

“ČÁST ČTVRTÁ

*PRACOVNÍ DOBA A DOBA ODPOČINKU*

*HLAVA IX ZMOCŇOVACÍ USTANOVENÍ*

§ 100

(1) *Vláda stanoví nařízením odchylky úpravy pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě, jimiž jsou*

- a) členové osádky nákladního automobilu nebo autobusu,
- b) zaměstnanci údržby pozemních komunikací,
- c) zaměstnanci drážní dopravy na dráze celostátní, regionální a vlečce,
- d) zaměstnanci městské hromadné dopravy,
- e) **členové posádky letadla a zaměstnanci zajišťující provozování letiště,**
- f) členové posádky plavidla,
- g) zaměstnanci obsluhující plavidlo v přístavu,

*přítom blíže vymezí okruh zaměstnanců uvedených v písmenech a) až g) a upraví postup a další povinnosti zaměstnavatele a zaměstnanců při úpravě pracovní doby a doby odpočinku.“ [131]*

Zákon definuje dobu odpočinku jako dobu, která není pracovní dobou. O jejím využití se rozhoduje každý individuálně. Zákon v tomto smyslu upravuje pracovní poměr mezi zaměstnancem a zaměstnavatelem, únavou se nijak hlouběji nezabývá.

### **2.1.2. Zákon č. 475/2001 Sb.**

*Zákon č. 475/2001 Sb., o pracovní době a době odpočinku zaměstnanců s nerovnoměrně rozvrženou pracovní dobou v dopravě „upravuje odchylně od ustanovení § 83 odst. 4, § 85 odst. 2 a 3, § 89, 90, 92, 95, 99 a § 102 odst. 5 zákoníku práce pracovní dobu a dobu odpočinku zaměstnanců v dopravě, jejichž pracovní doba je nerovnoměrně rozvržena a jejichž zaměstnavatel je dopravcem nebo správcem pozemních komunikací nebo provozovatelem dopravní infrastruktury podle zvláštních právních předpisů.“ [134]*

Opět únavou se nijak hlouběji nezabývá, navíc je nutné upozornit na zvláštnost tohoto zákona. Zákon totiž nezahrnuje zaměstnance poskytovatele letových navigačních služeb, kteří poskytují oblastní a přibližovací službu řízení. V § 1 odst. 3, jsou vyjmenovány profese, na které se zákon vztahuje. Mimo jiné uvádí pod písmenem g) členy posádky letadla, h) zaměstnance zajišťující provozování letiště, i) zaměstnance záchranné a hasičské služby na letišti. Ani jedna z těchto kategorií však nezahrnuje řídicí letového provozu na oblastním (ACC) a přibližovacím (APP) středisku.

Oba výše uvedené zákony je možné chápat jako absolutní základ pro vytvoření podmínek pro řízení únavy operátorů v dopravě. Bez dalších prvků (využití vědeckých principů, vzdělávání, hodnocení rizik apod.) však nemůže být řízení únavy efektivní.

## **2.2. Silniční doprava**

Únava řidičů silničních vozidel je vážný problém vedoucí každoročně k tisícům dopravních nehod. Není možné stanovit přesný podíl nehod způsobených únavou, nicméně výzkumy ukazují, že únava řidiče může být přispívajícím faktorem téměř ve 20 % silničních nehod a až ve čtvrtině všech tragických a vážných nehod. [30], [37], [6]

U těchto typů nehod je až o 50 % větší pravděpodobnost že povedou k usmrcení nebo vážnému zranění, jelikož se ve většině případů jedná o nárazy ve vysoké rychlosti, neboť řidič, který usne, nemůže brzdit případně uhnout a zabránit či snížit následky nárazu.

Únava snižuje reakční dobu, která je kritickým prvkem bezpečného řízení. Snižuje bdělost, ostražitost a soustředění, čímž je narušena schopnost vykonávat aktivity založené na pozornosti (jako řízení vozidla). Rychlost, kterou je zpracovávána informace, je při ospalosti rovněž snížena. Stejně tak může být ovlivněna kvalita rozhodování.

Je zřejmé, že řidiči jsou si vědomi, když začínají být unaveni, a měli by učinit uvědomělé rozhodnutí, zda pokračovat v jízdě nebo zastavit a odpočinout si. Je možné konstatovat, že ti, kteří pokračují v jízdě, podceňují riziko usínání při jízdě. Nebo to může být dokonce tak, že se někteří řidiči rozhodnou ignorovat rizika (obdobně jako v případě jízdy pod vlivem alkoholu nebo drog). Zatímco vliv alkoholu a drog na řízení vozidla si řidiči uvědomují a je klasifikováno jako porušení pravidel, vliv únavy se zejména vzhledem k nemožnosti únavu řidičů objektivně prokázat postihnout nedá. Záleží tak na osobní zodpovědnosti a kultuře řidičů. [85]

### **2.2.1. Zákonné požadavky**

Mimo zákony uvedené v kapitole 2.1 se na operátory v silniční dopravě vztahují další legislativní požadavky, jako například:

- *Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů [133]*
- *Nařízení Rady (EHS) č. 3820/85 ze dne 20. prosince 1985 o harmonizaci určitých sociálních právních předpisů v silniční dopravě. [83]*
- *Evropská dohoda o práci osádek vozidel v mezinárodní silniční dopravě (AETR), vyhlášená pod č. 108/1976 Sb. [39]*
- *Nařízení vlády č. 168/2002 Sb., kterým se stanoví způsob organizace práce a pracovních postupů, které je zaměstnavatel povinen zajistit při provozování dopravy dopravními prostředky. [84]*
- *Vyhláška č. 478/2000 Sb., kterou se provádí zákon o silniční dopravě, ve znění vyhlášky č. 55/2003 Sb. [118]*
- *Zákon č. 247/2000 Sb. o získávání a zdokonalování odborné způsobilosti k řízení motorových vozidel a o změnách některých zákonů [130]*

Tyto legislativní akty upravují a dále zpřesňují především požadavky na pracovní dobu a dobu odpočinku, což je opět možné pokládat za nezbytný základ pro řízení rizik souvisejících s únavou. Opět je nutné konstatovat, že tento základ nepostačuje pro dostatečné řízení rizik souvisejících s únavou.

### **2.2.2. Programy upozorňující na nebezpečí únavy v silničním provozu**

V rámci prevence existují různé osvětové programy, brožury, televizní spoty nebo články upozorňující na nebezpečí únavy v silničním provozu. V rámci České republiky se osvětou v této oblasti zabývá především BESIP. BESIP je dle [61] hlavní koordinační subjekt bezpečnosti silničního provozu v ČR, expertní orgán v oblasti působení na lidského činitele, samostatné oddělení Ministerstva dopravy ČR. V rámci bezpečného řízení vozidla se zabývá tématy jako vliv alkoholu a drog na řízení vozidla, telefonování za jízdy, použití bezpečnostních pásů a v neposlední řadě také upozorňuje na nebezpečí únavy. Zde se zaměřuje především na rizika plynoucí z jízdy v noci, kdy je větší pravděpodobnost výskytu nehody z důvodu únavy řidiče. Výzkumy totiž dokládají, že nebezpečí nehody je v noci větší než ve dne, přestože v nočním řízení je statistický počet nehod menší. Upozorňuje rovněž na důležitost spánku, jeho délku a kvalitu. BESIP v této kampani také radí řidičům, jak svou únavu řídit, jak ji včas rozeznat a jaké hlavní zásady dodržovat.

Jako hlavní nevýhodu v této oblasti lze uvést nedostatečné rozšiřování těchto informací mezi běžné řidiče. V současné době neexistuje povinnost průběžného vzdělávání řidičů amatérů, kteří se poprvé a často naposledy se zásadami bezpečné jízdy seznámí během absolvování autoškoly. Rozšiřování povědomí o rizicích souvisejících s únavou v silničním provozu je zajišťováno například právě již zmíněnými televizními spoty společnosti BESIP a dalšími kampaněmi na internetu, billboardech či přímo v reálném provozu.

Řízení rizik souvisejících s únavou by bylo v této oblasti potřeba řešit komplexněji. Jako řešení se nabízí vytváření systémů řízení bezpečnosti u jednotlivých automobilových dopravců, ti v současné době svým zaměstnancům poskytují různá školení řidičů (pravidelná školení dle zákona [130]) – např. sdružení ČESMAD BOHEMIA - Bezpečná a defenzivní jízda, Pracovní režimy řidičů apod. Je to další prvek zvyšování úrovně bezpečnosti, avšak stále zde chybí komplexní systémové řešení. U řidičů – amatérů je pak situace ještě složitější.

V zahraničí je praxe obdobná, jako příklad je možné uvést článek The Royal Society for the Prevention of Accidents nazvaný *DRIVER FATIGUE AND ROAD ACCIDENTS* vydaný jako součást Road Safety Information. [42]

Článek na stránkách Observatoř bezpečnosti silničního provozu shrnuje tuto oblast následovně: *„Možnosti nějak ovlivnit únavu v silničním provozu jsou omezené. Informace (informační kampaně) mohou běžné řidiče upozornit na možná nebezpečí. Pro profesionální řidiče existuje regulace doby za volantem a odpočinku. Jejich dodržování a splňování musí být motivovány celým průmyslem nákladní přepravy, pokud možno v kombinaci s širším postojem k bezpečnosti (kultura bezpečnosti – safety culture).*

Článek z roku 2007 [115] uvádí následující: *„V budoucnosti je také očekávána implementace technických pomůcek automaticky zaznamenávající únavu řidiče. Tyto systémy mohou řidiče varovat prostřednictvím akustických signálů nebo dokonce zasahovat do řízení tím, že opraví směr řízení. V danou chvíli nejsou tyto systémy dosud vhodné pro aplikaci v praxi.“* I z tohoto je vidět rychlý vývoj v této oblasti při porovnání s technologiemi v roce 2021.

### 2.2.3. Systémy rozpoznání únavy

V současné době se i z důvodu výše uvedených nedostatků preventivních opatření vývoj ubírá směrem rozvoje reaktivních prostředků. To znamená především systémů rozpoznávajících únavu řidiče vozidla.

O jejich fungování se lze opět více dočíst na webových stránkách BESIPu v kategorii Bezpečné vozidlo. *„Systém sledování bdělosti řidiče na základě dat o úhlu řízení nepřetržitě analyzuje jeho chování při řízení. Systém 15 minut po nastartování motoru analyzuje chování řidiče a výsledek uloží jakožto základ pro další sledování. Rozpoznání únavy je sledováno při rychlostech nad 65 km/h. Pokud řidič na chvíli přestane řídit a poté provede náhlou korekci řízení – je to často známkou ztráty koncentrace a zvyšující se únavy. Systém pomocí kombinace četnosti a intenzity těchto reakcí s ostatními údaji, jako je rychlost vozidla či denní doba a pomocí dalších ukazatelů vypočítává index únavy. Při překročení konkrétní hodnoty, vizuální nebo zvukový signál upozorní řidiče na jeho únavu a na nebezpečí usínání za volantem. Na palubní desce se zobrazí varovný symbol a doporučí vám přestávku v jízdě.“* [106]

Vzhledem k tomu, že vývoj těchto systémů je zatím stále v počátcích, spekuluje se o jejich užitečnosti a skutečné schopnosti únavu detekovat. Systém se například rovněž automaticky aktivuje po čtyřech hodinách nepřetržité jízdy, řidiče stejným způsobem vyzve k přestávce. Toto je velmi jednoduchá funkce, která však může často být vnímána jako obtěžující. V budoucnu se předpokládá širší využití vědeckých poznatků z oblasti únavy jako například systémy sledující pohyb očí (elektrookulografie) a podobně.

Doposud byli zmiňováni především řidiči. Jako operátory v dopravě však rozumíme i další profese v silniční dopravě jako zaměstnanci na různých dispečerských pracovištích. V silniční dopravě se však nejedná z pohledu bezpečnosti provozu za příliš kritickou roli a případná únava a její následky by neměly u těchto profesí zásadní dopady. To ovšem neznamená, že bychom se neměli v těchto druzích provozu únavou zabývat, jelikož dlouhodobá únava může mít vliv na zdraví a výkonnost jednotlivců.

## 2.3. Železniční doprava

Na rozdíl od silniční dopravy se v dopravě železniční vzhledem k omezenému přístupu k infrastruktuře prakticky nesetkáváme s jinými operátory než profesionály. Únavu je tím pádem možné do jisté míry systematicky řídit. Přesto se vyskytuje velké množství případů, kdy únava byla příčinou vážné nehody. Většinou se jednalo o únavu strojvedoucích. [49]

Na webových stránkách Drážní inspekce je možné nalézt závěrečné zprávy z mimořádných událostí. Například za rok 2016 byly evidovány 4 mimořádné události, z nich u žádné z nich nebyla jako přispívající faktor uvedena únava. Přesto se vyskytují hlasy, že zaměstnancům některých dopravců v železniční dopravě v České republice není poskytována dostatečná příležitost k odpočinku [98] případně ji tito nevyužívají vhodným způsobem [81] a únava tak může být pouze nevysloveným faktorem. Tento rozpor stejně jako fakt, že v České republice prozatím jak v silniční dopravě, tak ani v železniční dopravě nevznikají systémy řízení rizik souvisejících s únavou, souvisí s již zmíněnou poměrně nízkou kulturou bezpečnosti v dopravě.

Na studie zabývající se vlivem únavy na železniční provoz je nutné se podívat do zahraničí. Poměrně vysokou kulturu bezpečnosti dopravy má Velká Británie. Vyčerpávající přehled o únavě a jejím vlivu na železniční nehody ve Spojeném království podává článek *Fatigue and its contribution to railway incidents* zpracovaný RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD v roce 2015. Únava podle tohoto článku představuje vážné riziko provozu na železnici.

Trendem je i u společností zabývajících se provozem na železnici vytváření systému řízení bezpečnosti, jejichž součástí se postupně stává i řízení rizik souvisejících s únavou. Oproti silniční dopravě je zde již vzhledem ke kritičnosti nutné pamatovat kromě strojvedoucích i na ostatní profese zajišťující provoz – výpravčí, dispečeri apod.

Na nutnost „komplexního přístupu řízení bezpečnosti v dopravě obecně, což už dnes dobře funguje třeba v civilním letectví nebo některých průmyslových provozech“ upozornil v roce 2017 i ministr dopravy Daniel Ťok v souvislosti s hledáním řešení ke zvýšení bezpečnosti na železničních přejezdech. [114]

### 2.3.1. Zákonné požadavky

Aspekty železniční dopravy v České republice upravuje zákon č. 266/1994 Sb. *Zákon o dráhách*. Tento zákon však opět z pohledu řízení únavy postihuje pouze maximální dobu řízení drážního vozidla a dobu odpočinku. Nikterak nedefinuje povinnost zavádět systém pro řízení rizik souvisejících s únavou. Přesto i vytváření rozpisů směn, které respektují tato pravidla a dále uvažují cirkadiánní rytmy lidského organismu, mohou být považovány jako základ řízení únavy.

„HLAVA DRUHÁ

ZPŮSOBILOST K ŘÍZENÍ DRÁŽNÍCH VOZIDEL

Díl 1

*Řízení drážního vozidla na dráze tramvajové, trolejbusové, speciální, lanové a vlečce*

§ 45

*(7) Maximální dobu řízení drážního vozidla, dobu bezpečnostních přestávek a dobu odpočinku osob, které řídí drážní vozidlo, stanoví pro jednotlivé druhy drážních vozidel prováděcí předpis.“ [132]*

Dalším dokumentem, který upravuje požadavky na bezpečnost železniční dopravy je Směrnice o bezpečnosti železnic. Jedná se o *Směrnici Evropského parlamentu a Rady 2004/49/ES ze dne 29. dubna 2004 o bezpečnosti železnic Společenství a o změně směrnice Rady 95/18/ES o vydávání licencí železničním podnikům a směrnice 2001/14/ES o přidělování kapacity železniční infrastruktury, zpoplatnění železniční infrastruktury a o vydávání osvědčení o bezpečnosti*. Směrnice EU je závazná pro každý stát, kterému je určena, pokud jde o výsledek, jehož má být dosaženo, přičemž volba formy a prostředků se ponechává vnitrostátním orgánům.

*„Účelem této směrnice je zajistit rozvoj a zvyšování bezpečnosti na železnicích Společenství a zlepšit přístup k trhu služeb železniční dopravy:*

- a) harmonizací regulační struktury v členských státech,*
- b) vymezením odpovědnosti jednotlivých subjektů,*



- c) *přípravou společných bezpečnostních cílů a společných bezpečnostních metod s cílem více harmonizovat vnitrostátní předpisy,*
- d) *povinným zřízením v každém členském státě bezpečnostního orgánu a orgánu pro vyšetřování nehod a mimořádných událostí,*
- e) *definováním společných zásad pro zajišťování a regulaci bezpečnosti železnic a pro dozor nad bezpečností železnic.“ [100]*

V této směrnici je již poměrně zřetelně patrný vývoj směrem k vytváření systémů řízení provozní bezpečnosti na železnici. Obsahuje popis většiny prvků, které byly zmíněny v kapitole 1.2 jako součást systému řízení provozní bezpečnosti. Popisuje požadavky na rozvoj a zvyšování bezpečnosti železnic, stanovuje společné bezpečnostní ukazatele, společné bezpečnostní metody, společné bezpečnostní cíle, upravuje vnitrostátní bezpečnostní předpisy, pojednává o systémech zajišťování bezpečnosti apod.

Přestože ani tato směrnice neupravuje problematiku řízení únavy, je možné ji považovat za velmi kvalitní základ pro řízení provozní bezpečnosti na železnici obecně (opět s přihlédnutím ke kultuře bezpečnosti v daném státě), jehož součástí se v budoucnu může poměrně snadno stát i řízení rizik souvisejících s únavou. Uvádí se totiž, že pokud je poskytovatel služeb schopný dokázat vyspělé postupy v rámci SMS pro efektivní řízení rizik souvisejících s únavou, je na dobré cestě, aby byl schopen na těchto postupech stavět a přejít na pevně zavedený schválený FRMS, chce-li se přesunout mimo předepsané limity (o možných přístupech k řízení rizik souvisejících s únavou více v kapitole 3).

### **2.3.2. Vlakový zabezpečovač**

Stejně jako u silniční dopravy byly uvedeny systémy rozpoznání únavy jako reaktivní prostředek zajištění bezpečnosti, je možné uvést systém, který zajišťuje bezpečnost na železnici.

V první řadě se jedná o líniový vlakový zabezpečovač LS a s tím spjaté tzv. tlačítko bdělosti. *„Strojvedoucí je povinen před jízdou vlaku zapnout zařízení vlakového zabezpečovače, je-li jím vozidlo vybaveno. V případě jízdy po nekódované trati musí periodicky (po 13 až 22 s, u LS90 po 20 s) obsluhovat tlačítko bdělosti. Při jízdě po kódované trati musí periodicky obsluhovat tlačítko*

*bdělosti pouze při červeném světle nebo žlutém mezikruží. Pokud nestiskne příslušné tlačítko v daném intervalu, ozve se houkačka a, pokud ani poté nezareaguje, dojde k samočinnému zabrzdění vlaku. Obsluha tlačítka není vyžadována při zabrzdění přídatnou brzdou.“ [122] Tímto by mělo být zajištěno, že v případě, kdy strojvedoucí usne, následuje opravný mechanismus. Je ale patrné, že to je již poslední bariéra, která zabrání případné nehodě a navíc tímto zabezpečovačem nejsou vybaveny zdaleka všechny železniční tratě.*

Tlačítko bdělosti (slangově „živák“) je elektronické zařízení, součást vlakového zabezpečovače, používaného na železničních řídících (tj. zpravidla hnacích) vozidlech. Jeho úkolem je zajištění bezpečnosti jízdy vlaku a železničního provozu vůbec. Dosahuje toho periodickou kontrolou bdělosti strojvedoucího lokomotivy v pohybu. Ověření bdělosti se děje přibližně jednou za minutu, pokud rychlost jízdy překračuje 10 % maximální rychlosti. Pokud strojvedoucí nereaguje na světelný signál a ani na zvukový signál, následující po 3 sekundách, spustí se za dalších 6 sekund automatické brzdění vlaku. [123]

### **2.3.3. Moderní dispečinky**

Abychom neopomněli profesi zajišťující řízení provozu, i zde se objevují případy prevence únavy. Nejde prozatím o systematické řízení souvisejícího rizika, ale vedle plánování směn jsou dalším prvkem prevence únavy na některých pracovištích moderní dispečinky. Nemusí se jednat pouze o dispečinky v železniční dopravě, ale v jakémkoliv provozu. K prvkům způsobujícím únavu je možné řadit nesprávné osvětlení, hlučnost, nesprávnou strukturu provozu, nevhodnou vzájemnou vzdálenost operátorů a nevhodné úhly viditelnosti. Faktory pro zvládnutí únavy mohou sahat také nad rámec místnosti dispečinku a mohou zahrnovat i odpočinkové místnosti, malé tělocvičny a dostupnost zdravého občerstvení a potravin. [91] Při návrhu nového dispečerského pracoviště je tudíž nutné dodržovat veškeré ergonomické požadavky a zásady popsané v příslušné technické normě.

## **2.4. Letecká doprava**

V oblasti řízení únavy je ze zmíněných druhů dopravy prozatím nejdále doprava letecká. V současné době je již povinností provozovatelů letadel, aby měli

zavedený systém řízení rizik souvisejících s únavou, a obdobný vývoj čeká i poskytovatele letových provozních služeb.

Je známým faktem, že letectví je nejbezpečnějším druhem dopravy. V případě nehody jsou však většinou následky fatální. I z tohoto důvodu se do systémů řízení provozní bezpečnosti investuje velké množství financí i úsilí. Díky tomu jsou tyto systémy v dnešní době na již poměrně vysoké úrovni.

Oblast únavy však byla dlouhou dobu opomíjena, jako jakýsi impuls pro systematické řešení i této oblasti se uvádí nehoda letu Colgan Air 3407. V únoru 2006 se při přistávání v Buffalu zřítíl Bombardier Dash 8 (verze Q 400) s 49 lidmi na palubě, kde po důkladném prošetření této události byla jako jeden z přispívajících faktorů uvedena únava posádky letadla. Tato tragédie měla alespoň jeden pozitivní výsledek – přiměla leteckou federaci k zavedení nových pravidel pro závazný odpočinek posádek.

Nejedná se o jediný případ, kdy se na letecké nehodě podílela únava posádky. Další případ popisuje například článek *Pilot was snoring before Air India crash* [120]. Je však nutné pro vysvětlení rovněž uvést, že spánek pilotů na dlouhých trasách je jedním z prostředků zmírňování rizik souvisejících s únavou. Musí k tomu však docházet kontrolovaně a podle předem stanovených pravidel. Na rozdíl od silniční dopravy a železniční dopravy je nutné u pilotů na dlouhých tratích brát v úvahu rovněž vliv překračování časových pásem.

Postupným vývojem se v letectví řízení rizik souvisejících s únavou postupně dostalo i k profesi řídicích letového provozu. Jedná se o další typ operátora v dopravě, který poskytuje služby 24 hodin denně, 7 dní v týdnu a tudíž je vystaven rizikům plynoucím z únavy, navíc se jedná o povolání vyžadující vysokou míru koncentrace a neustálou pozornost, tudíž je tento vývoj více než logický.

#### **2.4.1. Zákonné požadavky**

*Zákon č. 49/1997 Sb. o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů v § 22c uvádí:*

*„(2) Člen posádky letadla nesmí vykonávat letovou službu, je-li si vědom, že vlivem jeho únavy nebo aktuálního zdravotního stavu by mohlo dojít k ohrožení*

*bezpečnosti letového provozu.*“ [135] Jedná se tak o první případ, kde je již v zákoně zmíněna únava.

Letectví je oproti ostatním druhům dopravy poměrně silně svázáno regulací, proto bude uvedeno pouze rámcově, kde je konkrétně řešena problematika řízení rizik souvisejících s únavou se zaměřením na poskytovatele letových provozních služeb. Je však možné konstatovat, že pravidla pro posádky letadel a letecké dopravce jsou velice obdobná. Oblast všeobecného letectví je přirozeně regulací svázána méně.

Na mezinárodní úrovni je letectví regulováno Chicagskou úmluvou o mezinárodním civilním letectví. Přílohy k Chicagské úmluvě (Annexes ICAO) č. 1 až 19 specifikují činnosti a normy v mezinárodním civilním letectví. Ministerstvo dopravy České republiky je vyhláší formou výnosů jako tzv. letecké předpisy. Základní řada leteckých předpisů má označení L1 až L19. FRMSTF navrhla doplnění Annexu 11 – Air Traffic Services (Předpis L11 LETOVÉ PROVOZNÍ SLUŽBY, SLUŽBA ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU, LETOVÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA, POHOTOVOSTNÍ SLUŽBA) o řízení únavy. Doplnění Annexu 11 (The amendment No. 50-B to the International Standards and Recommended Practices Annex 11 - AIR TRAFFIC SERVICES) byl přijat Radou ICAO 22. února 2016 s účinností od 5. listopadu 2020. Toto doplnění zahrnuje:

- doplnění definic v kapitole 1 souvisejících s FRM,
- doplnění článku 2.28 Fatigue Management,
- nový doplněk 6 (Prescriptive Fatigue Management Regulations) a doplněk 7 (Fatigue Risk Management System (FRMS) Requirements).

Na evropské úrovni je letectví regulováno řadou nařízeních. Problematiku únavy obsahuje nově přijaté Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 2017/373 [90] (Common requirements for service providers and the oversight in ATM/ANS and other ATM network functions), jehož účinnost je od 2. ledna 2020.

### **3. ŘÍZENÍ RIZIK SOUVISEJÍCÍCH S ÚNAVOU V LETECKÉ DOPRAVĚ**

Zmíněná nařízení a předpisy stanovují pravidla pro řízení rizik souvisejících s únavou v letecké dopravě. Obdobná pravidla platí jak pro systém řízení rizik souvisejících s únavou u provozovatelů letadel, tak pro poskytovatele letových provozních služeb. Smysl a přístupy k řízení rizik souvisejících s únavou a základní součástí systému řízení rizik souvisejících s únavou jsou popsány v následujících kapitolách.

#### **3.1. Smysl řízení únavy**

Letecký průmysl poskytuje jeden z nejbezpečnějších druhů dopravy na světě. Stejně jako ostatní bezpečnostně kritická odvětví musí aktivně řídit bezpečnost. Únava je nyní považována za nebezpečí, které předvídatelně degraduje různé typy lidské výkonnosti, a které může přispět k výskytu letecké nehody nebo jiné události v leteckém provozu. Únava je nevyhnutelná v provozu 24/7, protože lidský mozek a tělo fungují optimálně s neomezovaným nočním spánkem. Proto vzhledem k tomu, že únavu nelze zcela vyloučit, musí být stejně jako ostatní rizika řízena.

Řízením únavy se rozumí způsoby, kterými poskytovatelé služeb a provozní pracovníci řeší bezpečnostní důsledky únavy. Obecně platí, že ICAO normy a doporučené postupy (SARP) v různých přílohách podporují dvě rozdílné metody pro řízení únavy:

1. Poskytovatel služeb je v souladu s limity pracovní doby a minimy pro dobu mimo výkon pracovní činnosti vymezenými regulátorem a řídí rizika související s únavou za využití procesů SMS, které jsou již zavedené pro řízení ostatních druhů nebezpečí; nebo
2. Poskytovatel služeb vytvoří a implementuje systém řízení rizik souvisejících s únavou (Fatigue Risk Management System - FRMS), který je schválen regulátorem.

Tyto přístupy (normativní a FRMS) sdílejí dva důležité základní rysy. Oba jsou založeny na jedné straně na vědeckých principech a znalostech a na druhé straně

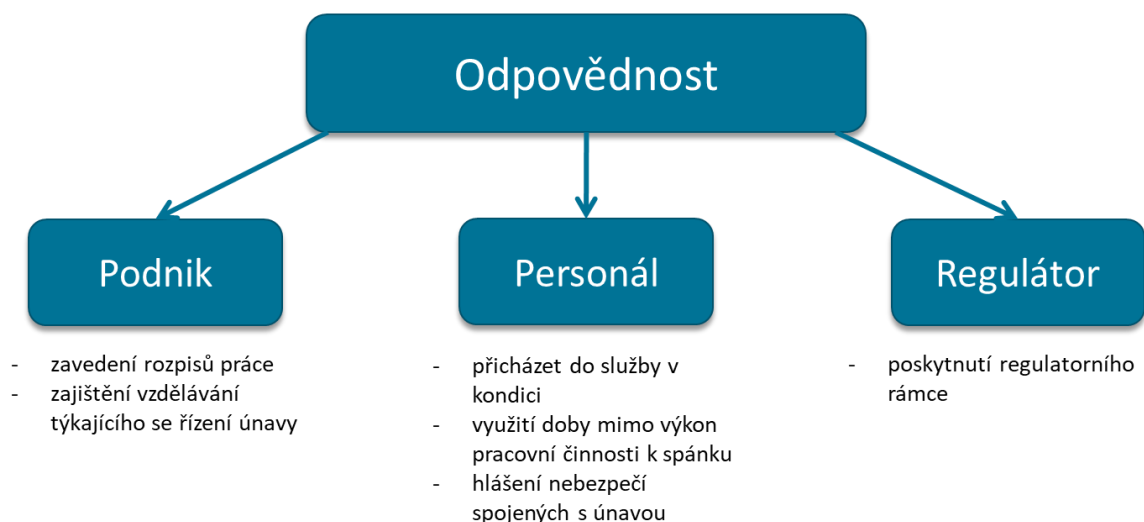
na provozní znalosti a zkušenosti. Oba přístupy by měly vzít v úvahu následující aspekty:

- potřebu patřičného spánku (ne jen odpočívání v bdělém stavu), s cílem obnovit a udržet všechny aspekty aktivit bdění (včetně bdělosti, fyzické a duševní výkonnosti a nálady),
- denní rytmy ve schopnosti provádět duševní a fyzické práce, a ve sklonu ke spánku (schopnost usnout a zůstat spící), které jsou poháněny cirkadiánními hodinami v mozku,
- příspěvek pracovní zátěže k únavě a fyzickému a duševnímu snížení výkonu,
- provozní podmínky a bezpečnostní riziko, které v této souvislosti představuje únavou postižený jedinec.

Efektivní řízení únavy vyžaduje nejen zvážení vědeckých principů, ale rovněž musí být založeno na provozních znalostech a zkušenostech, které byly získány vykonáváním určitých činností v průběhu času a řízením rizik souvisejících s únavou při těchto činnostech. Tyto dva zdroje odborných znalostí se vzájemně doplňují.

Vzhledem k tomu, že je únava ovlivněna všemi aktivitami bdění (nejen pracovními nároky), řízení únavy musí být sdílenou odpovědností mezi regulátory, poskytovateli služeb a jedinci.

- Regulátor je odpovědný za poskytnutí právního rámce, který umožní náležité řízení únavy, a zajištění, že poskytovatel služeb řídí rizika související s únavou za účelem dosažení přijatelné úrovně bezpečnosti.
- Poskytovatelé služeb jsou odpovědní za zajištění vzdělání týkajícího se řízení únavy, zavedení rozpisů práce, které umožňují jednotlivcům bezpečnému vykonávání jejich povinností, a za zavedení procesů pro monitorování a řízení nebezpečí souvisejících s únavou.
- Provozní pracovníci jsou odpovědní za to, že přijíždějí do služby v kondici, včetně zajištění vhodného využití doby mimo výkon pracovní činnosti k spánku, a za hlášení nebezpečí spojených s únavou.



Obrázek 1 – Rozdělení odpovědností v rámci FRMS; upraveno podle [40]

V případě normativního přístupu k řízení únavy musí provoz probíhat v mezích předepsaných limitů pracovní doby a minim pro dobu mimo výkon pracovní činnosti pro příslušné provozní pracovníky vymezených regulátorem. Kromě toho by poskytovatel služeb měl řídit rizika související s únavou pomocí procesů SMS, které jsou zavedeny pro řízení ostatních druhů rizik.

V rámci normativního přístupu je únava jedním z možných nebezpečí, které by měl SMS brát v úvahu. Poskytovatel letových provozních služeb reaguje ve chvíli, kdy je nebezpečí související s únavou identifikováno. Při využití FRMS však musí poskytovatel letových provozních služeb dodatečně identifikovat a hodnotit možná rizika související s únavou před vlastním prováděním výkonu podléhajícímu FRMS stejně jako identifikovat a hodnotit možná rizika související s únavou proaktivně během vlastního provozu.

### 3.2. FRMS

FRMS je specializovaný systém využívající zásady a postupy SMS pro řízení nebezpečí souvisejících s únavou řídicích letového provozu. V souladu se SMS, FRMS se snaží dosáhnout realistické rovnováhy mezi bezpečností, produktivitou a náklady. Avšak FRMS zahrnuje důležité rysy, které jej odlišují od pouhého řízení rizik souvisejících s únavou s využitím SMS v mezích nařizujících limitů.

FRMS přístup představuje příležitost pro poskytovatele letových provozních služeb využívat pokrok ve vědeckém poznání pro zvýšení bezpečnosti, efektivnější využívání zdrojů a zvýšení provozní flexibility. FRMS je speciální typ systému

řízení bezpečnosti zaměřený na řízení skutečného rizika souvisejícího s únavou v činnostech, na které se vztahuje (spíše než zaměření se na riziko související s únavou obecně, což je základem normativních limitů). FRMS má další požadavky pro zajištění, že úroveň bezpečnosti je přinejmenším rovnocenná té, které by bylo dosaženo provozováním v rámci předpisujících omezení a používání obecných procesů SMS pro řízení nebezpečí souvisejících s únavou.

Řízení únavy, ať už normativním přístupem nebo prostřednictvím FRMS, se opírá o identifikaci nebezpečí souvisejících s únavou a efektivní hlášení událostí týkajících se bezpečnosti. Musí být přípustné upozornit na legitimní otázky týkající se únavy bez strachu z odplaty nebo trestu jak zevnitř, tak i vně organizace. Problémy spojené s únavou je obtížné zjistit, pokud nejsou lidé ochotni nebo schopni je nahlásit. [40]

FRMS se musí sestávat minimálně z následujících čtyř součástí:

- FRMS politika a dokumentace,
- postupy pro řízení rizika souvisejícího s únavou,
- postupy pro zajištění bezpečnosti FRMS,
- postupy pro podporu bezpečnosti FRMS.

Mezi postupy a procesy pro řízení rizika souvisejícího s únavou patří především průběžné monitorování dat, identifikace nebezpečí, hodnocení rizika a jeho zmírňování. Procesy pro řízení rizik souvisejících s únavou jsou předmětem další kapitoly.

### **3.3. Řízení rizik v rámci FRMS**

Jedním z požadavků na FRMS plynoucím z doplněného ICAO Annexu 11 je identifikace nebezpečí souvisejících s únavou. Metody identifikace nebezpečí souvisejících s únavou je možné rozdělit do tří kategorií.

Prediktivní metody využívají k identifikaci možných nebezpečí souvisejících s únavou analýzu rozdělovníků směn před jejich vlastní aplikací, přičemž berou v úvahu faktory ovlivňující spánek a únavu.

Pravidla pro tvorbu rozdělovníků směn by měla být založena na vědeckých principech a měla by využívat předchozí provozní zkušenosti. Podporou pro vyhodnocení těchto pravidel mohou být různé bio-matematické modely, které jsou



na základě v modelu stanovených pravidel schopny identifikovat možná nebezpečí související s únavou a pomocí definovaných škál rovněž vyhodnotit související riziko.

Proaktivní metody měří úroveň únavy v aktuálním provozu. Neexistuje měření, které by dávalo celkový obrázek o aktuální únavě daného jedince. Z tohoto důvodu ICAO doporučuje využití několika zdrojů dat pro proaktivní identifikaci nebezpečí. Úspěšnost proaktivních procesů závisí do značné míry na ochotě ATCOs účastnit se sběru dat. Ta je dána i pochopením jejich role a odpovědností v rámci FRMS a důvěrou v to, že účelem sběru dat je zvýšení bezpečnosti. Účast na sběru dat by měla být dobrovolná.

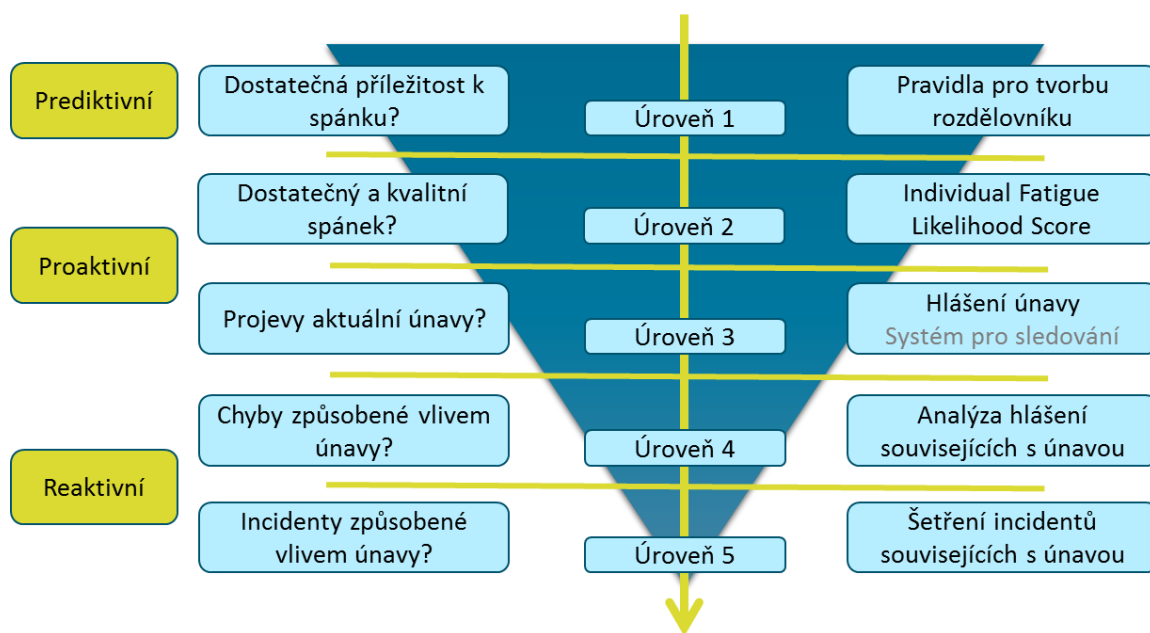
Základem proaktivních metod je hlášení únavy jednotlivými provozními pracovníky. Hlášení o velké míře únavy nebo o situacích vedoucích k únavě poskytuje zásadní informace o nebezpečích souvisejících s únavou v dennodenním provozu. Předpokladem je však efektivní a fungující systém dobrovolného hlášení, který je zaváděn v rámci Just Culture. Podmínkou je tedy vysoká důvěra v Just Culture a s tím související vysoká úroveň kultury bezpečnosti daného poskytovatele služeb. Informace identifikující únavu jako tzv. „contributing factor“ by měla být zahrnuta i v povinném hlášení. Dalšími metodami v této kategorii jsou různé průzkumy (spánkové diáře, dotazníky týkající se aktuální únavy apod.), jejichž nevýhodou je časová náročnost a značná subjektivita získaných dat.

Samostatnou kategorií je získávání aktuálních dat o únavě provozních pracovníků a jejich vyhodnocování v reálném čase. Cílem je na rozdíl od průzkumů, které poskytují pouze subjektivní data, získat objektivní data o únavě. Existuje několik možností, jak taková data získat (jednoduché testy vyvinuté a validované laboratorně pro sledování výkonnosti, využití provozních dat jako měřítko únavy, vycvičení pozorovatelé hodnotící výkonnost apod.), nevýhodou většiny z nich je však narušování běžného provozu. V této oblasti v současné době probíhá intenzivní výzkum s cílem vytvořit metodiku sledování aktuální úrovně únavy bez nutnosti ovlivnit běžný provoz stanovišť poskytujících letové provozní služby. Tato oblast je rovněž předmětem výzkumu této disertační práce.

Reaktivní metody slouží k identifikaci možného přispění únavy k výskytu události v leteckém provozu. Cílem je identifikovat, jak by mohly být následky únavy omezeny, aby byla snížena pravděpodobnost výskytu podobné události v budoucnu.

Mezi reaktivní metody je možné zařadit zejména šetření událostí v leteckém provozu, se zaměřením na to, zda příčinou či jedním z přispívajících vlivů (contributing factors) byla únava. Opět je nutné zdůraznit, že i v těchto metodách je nutné respektovat pravidla Just Culture a rozlišovat tudíž mezi jednáním, opomenutím nebo rozhodnutím, která provozní pracovníci učiní a která odpovídají jejich zkušenostem a výcviku, a mezi hrubou nedbalostí a úmyslným porušením pravidel. Mezi reaktivní metody je možné zařadit rovněž využití provozních dat a jejich analýzu s ohledem na únavu, provozní audity a podobně.

Další možností je rozdělení FRM procesů podle jednotlivých úrovní, na kterých jsou aplikovány – viz Obr. 2.



Obrázek 2 – Schéma jednotlivých úrovní řízení rizik v rámci FRMS; upraveno podle [40]

Ve velké míře se jedná o procesy výše uvedené, pouze jinak seřazené. V tomto dělení je základním aspektem úrovně, na které se únava projevuje. Schéma uvedené na Obr. 1 velice úzce souvisí s Reasonovým modelem rizika (tzv. model švýcarského sýra), jelikož jednotlivé úrovně reprezentují bariéry, které v rámci modelu zabraňují výskytu stavu vedoucímu k incidentu (který by mohl nastat po překonání všech bariér). Opět je v této souvislosti nutné zdůraznit, že

předpokladem pro efektivní FRMS je uvědomění si sdílené odpovědnosti na jednotlivých úrovních.

### **3.3.1. Úroveň 1**

Úroveň 1 je reprezentována především zavedeným systémem pro tvorbu rozdělovníků směn a s tím souvisejícími nastavenými pravidly. V této úrovni hovoříme o odpovědnosti poskytovatele služeb (do jisté míry i regulátora – poskytnutí legislativního rámce) za vytvoření tohoto systému a jeho dodržování. Pokud pravidla respektují doporučení odborníků z oblasti chronobiologie, jsou podpořena provozní zkušeností a metodami bio-matematického modelování, jedná se o velmi silnou bariéru k výskytu akutní únavy na provozních pracovištích. V jednoduchosti lze tuto úroveň vyjádřit otázkou, zda je provozním pracovníkům poskytnuta dostatečná příležitost ke spánku.

### **3.3.2. Úroveň 2**

Na úrovni 2 tedy uvažujeme, že příležitost k spánku byla dostatečná. Dostáváme se tudíž k odpovědnosti daného provozního pracovníka a klademe otázku, zda byl jeho spánek dostatečný a kvalitní a zda je tudíž připraven a v kondici pro nástup do směny a výkon služby. K tomuto mohou sloužit různé škály, dotazníky, testy, pomocí kterých si každý pracovník může sám pro sebe určit, jaká je pravděpodobnost, že ho během služby ovlivní únava. Požadavkem na tyto metody je jejich jednoduchost a rychlost vyplnění i vyhodnocení. Mezi takovéto metody lze zařadit tzv. *Individual Fatigue Likelihood Score*, kde se na základě délky spánku v posledních 24 a 48 hodinách a době bdělosti v porovnání se spánkem určí výsledek, který dává návod, jak dále postupovat – od ujištění, že spánek byl dostatečný a není vysoká míra pravděpodobnosti, že by únava ovlivnila výkon povinností, přes doporučení hlídat příznaky únavy, až po výraznou výstrahu, aby daný pracovník informoval nadřízeného a směnu nenastupoval. Zde však velice záleží na přístupu poskytovatele letových provozních služeb a na nastavených interních pravidlech.

### **3.3.3. Úroveň 3**

Přestože se v úrovni 2 pracovník přesvědčí, že spánek byl dostatečný a směnu nastoupí, může se vyskytnout situace, kdy se únava v průběhu výkonu směny

projeví. V takovém případě je na řadě přijmout vhodná opatření. Pracovník má možnost únavu nahlásit pomocí systému dobrovolného hlášení, pokud má například pocit, že únava plyne z nevhodné souslednosti směn, z vysoké míry zátěže nebo z jiných provozních důvodů.

Samostatnou kapitolou je v této úrovni zavedení systému pro sledování aktuální úrovně únavy provozních pracovníků. Tato problematika byla uvedena výše u proaktivních metod na začátku kapitoly 3.3. Na tomto místě je však vhodné uvést jiný aspekt této problematiky. Únava je velmi citlivé téma, proto i rozhodnutí, jak s daty o únavě nakládat, velice záleží na důvěře v Just Culture a celkově na atmosféře u daného poskytovatele služeb. Poskytovatel se musí rozhodnout, zda o aktuální únavě informovat konkrétního jedince (který si únavy nemusí být vědom, jelikož se nemusí nijak výrazně projevovat) nebo vedoucího směny či jiného odpovědného pracovníka, a nastavit postupy, jak s unaveným jedincem nakládat. Toto je zřejmě nejnáročnější otázka celého FRMS a stejně jako u kultury bezpečnosti obecně i zde platí, že důvěra se velmi dlouze a těžko buduje, avšak stačí jedno nesprávné rozhodnutí a tato důvěra se může ztratit.

I přes bariéry, které jsou reprezentovány úrovněmi 1 až 3, může dojít k chybám či incidentům, na jejichž výskytu měla podíl únava.

#### **3.3.4. Úroveň 4 a 5**

Úroveň 4 a 5 již spadají do kategorie reaktivních procesů a liší se zejména mírou vlivu na poskytované služby. V úrovni 4 ještě nedošlo k výraznému vlivu na bezpečnost letového provozu, jedná se tudíž zejména o procesy analýzy hlášení související s únavou, úroveň 5 již reaguje na události v letovém provozu. Pro tyto případy existují v rámci systému managementu bezpečnosti zavedené procesy šetření událostí, které je však v souvislosti s implementací FRMS nutné doplnit o aspekty únavy.

## **4. AKTUÁLNÍ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

V souvislosti s realizací zamýšleného záměru byla nejprve provedena rešerše dostupné literatury. Bylo analyzováno velké množství dostupných zdrojů, vědeckých publikací, výstupů z konferencí, legislativních dokumentů a činností mezinárodních pracovních skupin zabývajících se problematikou únavy a aktuálním stavem řešení zkoumané problematiky. Na základě této analýzy bylo zjištěno, že metoda hlasové analýzy doposud nebyla pro sledování míry únavy v prostředí řízení letového provozu použita. Analýzou dostupných zdrojů, výzkumů a vědeckých studií byly identifikovány různé metody, které slouží k identifikaci únavy a byly zhodnoceny jejich výhody a nevýhody. Tato analýza je obsahem následujících kapitol a stala se základem pro praktickou část výzkumu.

### **4.1. Specifika prostředí řízení letového provozu**

V prostředích kritických z hlediska bezpečnosti je únava významným rizikovým faktorem. Je obtížné určit přesný podíl nehod způsobených únavou, ale vědci studující bezpečnost a prevenci nehod se shodují v tom, že únava je největší identifikovatelnou a preventabilní příčinou nehod v dopravě, což představuje přibližně 15 – 20 % všech nehod [2]. Únava je stejně významným rizikem v dalších bezpečnostně kritických prostředích, kde je důležitá bdělost, jako je letectví [92] či vesmírné lety.

Studie zabývající se spánkovou deprivací ukázaly, že únava má tendenci zhoršovat kognitivní a motorický výkon [89], což vede k ovlivnění reakčních časů (RT), bdělosti a paměti [53], [71], [76], [104]. Hlavními příčinami únavy jsou fáze, latence spánku, doba spánku, doba práce, faktory specifické pro daný úkol a jakékoli relevantní patologie spánku [2], [126].

Prostředí řízení letového provozu je velmi specifické. Řídící letového provozu musí zajistit bezpečné, systematické, rychlé a efektivní řízení toku letového provozu a jsou odpovědní za poskytování důležitých informací pilotům letadel, jako jsou navigační pokyny, informace o význačném počasí a nouzové výstrahy. Úkoly řídících letového provozu jsou složité a kognitivně náročné. [113]

Činnosti řízení letového provozu vyžadují splnění vysokých úrovní kognitivních schopností a vytrvalosti. Provádění těchto úkolů po dlouhé hodiny může

potenciálně vést k psychické únavě, která by mohla být překážkou pro správné plnění úkolů. [66]

Tyto úkoly podrobují řídící vysokému vytížení, které po určité době mohou způsobit duševní únavu. Tato únava může být pro výkon řídících škodlivá, jelikož vede k selháním při plnění úkolů nebo chybám v pozornosti [15]. Duševní únava, definovaná jako neschopnost lidského mozku alokovat dostatečné zdroje k provedení úkolu při normální kapacitě [102], může narušit celou řadu kognitivních funkcí, které jsou zásadní pro účinné provedení úkolu [13], [72], [95].

Současná grafická uživatelská rozhraní pro řízení letového provozu (ATC) používají vizuální podněty ke komunikaci různých informací řídícím. ATCO se při hodnocení rizika významně spoléhají na tyto vizuální podněty, zatímco verbální komunikace je běžným způsobem řešení provozních situací a výměny informací s piloty a ostatními ATCO. [1]

Analýza systému hlášení bezpečnosti letectví NASA (Aviation Safety Reporting System - ASRS) odhalila, že 3,8 % chybových hlášení členů letecké dopravy bylo přímo spojeno s únavou [46]. Pokud se však vezmou v úvahu faktory spojené s únavou, jako je nepozornost nebo nesprávná komunikace, počet se zvýší na 21,1 %. Únava také vede ke zvýšení toho, co by člověk mohl považovat za přijatelné riziko ve snaze vyhnout se dodatečnému úsilí [46].

Jak je patrné ze závěrů výše uvedených výzkumů, už v 70. letech 20. století bylo zřejmé, že únava je problém a významné riziko pro bezpečnost letectví, a proto se od té doby začaly vyvíjet systémy pro řízení rizik souvisejících s únavou, ve kterých však dodnes chybí spolehlivý nástroj pro měření aktuální míry únavy.

Aby bylo možné určit dobu, po kterou může řídící letového provozu účinně vykonávat pracovní činnost, musí být vyvinuta metoda, která dokáže určit změnu duševních stavů a sledovat vývoj duševní únavy, nejlépe v reálném čase, aby se zabránilo chybám, které mohou způsobit nehody letadel nebo ztráty na lidských životech [26].

Existuje celá řada bezpečnostně kritických prostředí, pro která je únava operátorů významným rizikovým faktorem, jako je doprava, těžební průmysl či jaderná energetika. V reakci na toto riziko tudíž byla vyvinuta řada metod pro odhad úrovně únavy operátorů [9].

## **4.2. Způsoby měření únavy**

### **4.2.1. Subjektivní metody**

Únavu lze měřit a kvantifikovat různými způsoby. Subjektivní metody měření jsou z nich nejjednodušší. Mezi běžně používané metody patří Epworth Sleepiness Scale (ESS) [58] a Karolinska Sleepiness Scale (KSS) [3]. KSS se běžně používá, částečně díky své jednoduchosti a rychlosti, s jakou ji lze spravovat (jednoduchá 9 bodová stupnice s anotovanými kotvami). Gillberg et al. [45] prokázali, že u subjektů, které zůstaly vzhůru přes noc, korelovala skóre KSS s výkonem u úlohy vizuální vigilance a úlohy na reakční čas (RT) s  $r = -0,62$ , respektive  $0,71$ . To naznačuje, že přibližně 38 – 50 % rozdílů ve výkonu bylo vysvětleno subjektivním hodnocením. Existují však určité problémy související s používáním subjektivních nástrojů pro měření ospalosti. Zejména fakt, že subjektivní pocity mohou být z různých důvodů zkresleny a výsledkem je značná variabilita individuálních schopností rozpoznat únavu [52], [60].

### **4.2.2. Objektivní metody**

Místo subjektivních hlášení o ospalosti lze ke kvantifikaci únavy použít také širokou škálu objektivních metod. Jedním ze způsobů objektivního měření únavy je použití měření výkonu jako přibližné míry. Psychologické nebo fyziologické testy tohoto typu zahrnují reakční čas (RT), bdělost nebo kognitivní testy [56].

Odhad úrovně únavy ze subjektivních metod nebo z výsledků psychologických a fyziologických testů (PPT) může být využit jako informativní ve vědeckém studiu ospalosti a spánkových patologií. Nicméně v prostředích kritických z hlediska bezpečnosti, kde by bylo užitečné sledovat nebo předvídat únavu, aby se snížilo související riziko, jsou tyto přístupy neproveditelné. Z tohoto důvodu se v posledních několika desetiletích zvyšuje zájem o generování modelů pro předpovídání únavy na základě objektivních měření [9].

Ještě přesnější způsoby sledování únavy jsou možné pomocí rušivějších (intrusivních) fyziologických měření. Begum [11] tak zkoumá možnosti elektroencefalografie (EEG), elektrokardiografie (EKG), elektrookulogramu (EOG) a měření pulzní oxymetrie k popisu únavy.

Ukázalo se, že moderní fyziologická měření, jako je elektrokardiografie (EKG), dýchání, mrkání očí a elektroencefalografie (EEG), jsou při sledování únavy spolehlivější a účinnější v reálném čase více než subjektivní metody [19].

## EEG

Data EEG jsou považována za jednu z nejspolehlivějších metod detekce duševní únavy. Některé studie EEG se zaměřují na vývoj účinných měření EEG pro hodnocení duševní únavy. Uvádí se, že výkonová spektrální měření EEG vytvářejí vzorce, které lze použít k identifikaci změn bdělosti [66].

I když snímá potenciály z pokožky hlavy, mohou odhalit důležité kognitivní a behaviorální informace vysokého řádu [1]. Každý signál EEG lze pro analýzu rozdělit do různých pásem, standardně označovaných jako Delta (1 – 4 Hz), Theta (4 – 8 Hz), Alpha (8 – 12 Hz), Beta (14 – 30 Hz) a Gamma (32 – 42 Hz). Síla signálu EEG udává počet neuronů vybitých synchronně; síla EEG má tedy potenciál odrážet kapacitu zpracování kortikální informace [62].

Je rovněž známo, že různé oblasti mozku jsou spojeny s jedním nebo více kognitivními úkoly na vysoké úrovni. Identifikované koreláty EEG jsou závislé na frekvenci a oblasti [1]. Například změny síly v pásmu theta, které byly nalezeny na frontálních středových kanálech, byly obvykle spojeny s rozvojem duševní únavy [128], [43], [88], [23], změnami duševního úsilí a duševní pracovní zátěží [128].

Jako příklady ze studií, zabývajících se problematikou EEG je možné uvést následující poznatky.

Pro měření duševní zátěže nebo únavy bylo navrženo mnoho indexů EEG z různých frekvenčních pásem a oblastí mozku [59]. Mezi takovými indexy EEG se uvádí, že frontální theta aktivita má silný nárůst při mentálním úsilí, zvýšení pracovní zátěže, účinku času na úkol a zpracování únavy [24], [112], [59]. Frontální theta aktivita je také pozorována u mnoha kognitivních úkolů, které vyžadují soustředění, pozornost, sledování konfliktů, monitorování výkonu a pracovní paměť s neurálními substráty v prefrontální kůře, konkrétně v přední cingulární kůře (anterior cingulate cortex - ACC) [22], [75], [57], [88], [96]. Takové kognitivní funkce jsou u úkolů ATC rozhodující.

Několik studií, zejména v oblasti letectví, vyvinulo účinné indexy duševní zátěže založené na EEG. Předběžné výsledky Brookingse [19] ukázaly, že vliv



požadavků konkrétních činností byl patrný ve změnách rytmů EEG. Výkonová spektra EEG vzrostla v pásmu theta, zatímco významně poklesla v pásmu alfa, jak se zvýšila obtížnost úkolu nad parietálními a frontálními mozkovými oblastmi.

Byly nalezeny silné korelace mezi správnými odpověďmi na vizuální podnět a aktivitou v pásmu theta v čelním laloku, celkovou silou ve středu parietálního laloku a poměrem theta k beta v levé části týlního laloku. [1]

V jiných studiích bylo pozorováno zvýšení spektrální hustoty EEG zejména nad frontální kůrou v pásmu theta (4 – 7 Hz) a pokles EEG PSD v pásmu alfa (8 – 12 Hz) nad temenní kůrou, když byla požadována duševní zátěž. [17]

EEG signály jsou bohužel velmi slabé a vždy kontaminované očními a svalovými aktivacemi. Také signály EEG měřené na pokožce hlavy jsou generovány z více neurálních zdrojů, které vykonávají různé kognitivní funkce. Navíc v činnosti ATC je EEG nepřetržitě zaznamenáván bez opakujících se přesně definovaných událostí / podnětů jako v klasických kognitivních úlohách. [12]

Dále je nezbytné určit vztah mezi změnami kognitivního výkonu a EEG vzorci svědčícími o duševní únavě, aby bylo možné vyvinout spolehlivou metodu pro detekci únavy při plnění úkolů v reálném čase. Abychom toho dosáhli, předpokládali jsme, že výrazná změna ve spektrální síle EEG může být markerem pro změnu duševního stavu, jak uvádějí jiné studie [43].

Jak bylo uvedeno výše, byla vyvinuta řada metod pro odhad úrovně únavy operátorů. Některé z nich jsou přesné, ale založené na získávání fyziologických měření, která vyžadují drahé nebo rušivé vybavení. Vzhledem k tomu, že v některých prostředích kritických z hlediska bezpečnosti jsou operátoři zapojeni do pravidelné verbální komunikace, může metoda odhadu únavy založená na analýze řeči poskytnout levnější a méně rušivou alternativu. [9]

Automatické systémy pro odhad únavy operátorů mají uplatnění v prostředích kritických z hlediska bezpečnosti. Systém, který by dokázal odhadnout úroveň únavy z řeči, by měl uplatnění v doménách, kde se operátoři v rámci svých povinností zapojují do pravidelné verbální komunikace. Předchozí studie zabývající se identifikací únavy z řeči byly omezené kvůli jejich spoléhání se na subjektivní hodnocení a kvůli tomu, že jim chybělo srovnání s jinými metodami hodnocení únavy. [9]

## Hlasová analýza

Produkce zvuků řeči je proces, který se spoléhá na přesné interakce mezi smyslovým a motorickým systémem. Ovládání hlasových artikulátorů se provádí pomocí procesu biofeedbacku, který zahrnuje snímání a sledování vibrací hlasivek prostřednictvím zvuku a pocitu, který vytvářejí. Se zvyšující se únavou nebo poškozením způsobeným alkoholem je tento systém narušen. [46]

Řada výzkumníků uvádí různé projevy tohoto narušení založené na řeči. Předchozí práce spojující změny hlasu s únavou se obecně zaměřily na diskrétní charakteristiky hlasu mluvčího. Patří mezi ně výška tónu a slova [121] a načasování mezi artikulovanými zvuky [117]. Změny ve spektrálních parametrech hlasu byly spojeny s poruchou související s alkoholem [18] a hypoxií [93]. Významné účinky cirkadiálních vlivů na hlasové charakteristiky byly pozorovány v řadě studií [121].

Stávající výzkum identifikoval řadu hlasových korelátů únavy. Vogel et al. [116] prokázali, že když subjekty zůstaly vzhůru po dobu 24 hodin, doba jejich pauz se postupně zvyšovala pro čtenou řeč a variace ve čtvrté frekvenci formantů se snížila pro trvalé samohláskové zvuky. Studie dospěla k závěru, že analýza řeči poskytuje objektivní údaje o fungování centrálního nervového systému, a tedy o únavě.

Rozvoj spolehlivých prostředků předpovídání únavy z řeči vyžaduje objektivní měření úrovně únavy pro použití při tréninku modelů. Předchozí studie, které zkoumaly predikci únavy z řeči, však spoléhaly na subjektivní hodnocení ospalosti jako výstupního parametru a tato hodnocení ne vždy dobře korelují s objektivními měřeními realizovanými pomocí behaviorálních úkolů. [9]

Identifikace konkrétních akustických vlastností hlasu, které jsou relevantní pro rozpoznávání emocí, je složitý proces, který není dobře pochopen. Existující literatura navrhuje nesčetné způsoby, jak kombinovat různé akustické vlastnosti ke klasifikaci emocí, a tato literatura se stále vyvíjí bez konsensu o vhodném režimu. [78]

Navzdory odrazujícímu výkonu komerčních softwaru pro vokální analýzu [36], proměnné, které jsou základem těchto klasifikací, slibují předvídání únavy, pokud jsou správně kalibrovány na konkrétní prostředí. Předchozí výzkum [34] poskytuje

podporu v tom, že hlas je potenciálně spolehlivým a platným měřením emocí a klamání vhodným pro integraci do budoucích technologií, jako jsou automatizované bezpečnostní kontroly a pokročilé interakce člověk-počítač.

V této práci diskutujeme o důsledcích pro použití hlasu jako prostředku ke sledování účinků únavy na kognitivní výkon a ověřujeme hlasovou analýzu pro použití hlasu jako prostředku pro identifikaci a sledování únavy v praktických aplikacích, pro operátory v dopravě, konkrétně pro řídící letového provozu.

### **4.3. Odborné konzultace**

Problematika identifikace únavy a jejího řízení byla průběžně diskutována s odborníky z oblasti psychologie, chronobiologie, neurologie a s experty na hlasovou analýzu. Spolupráce byla navázána s následujícími institucemi:

- ANIS Group s.r.o. (dříve Screening Solutions s.r.o.) – středoevropský zástupce izraelské společnosti Nemesysco, jež je autorem technologie emoční hlasové analýzy.
- Ústav leteckého zdravotnictví – Oddělení psychiatrie a psychologie, které se mimo jiné zabývá vědecko-výzkumnou, výcvikovou, expertizní a posudkovou činností a vzděláváním v oblasti lidských faktorů v letectví a psychologie dopravy.
- CANSO FMEG – mezinárodní pracovní skupina „Fatigue Management Expert Group“ při mezinárodní organizaci CANSO, zabývající se implementací FRMS u poskytovatelů letových provozních služeb.
- Katedra fyziologie, Univerzita Karlova – spolupráce navázána s odborníky na oblast chronobiologie.
- NÚDZ – výzkum konzultován s odborníky z výzkumného programu VP5 - Spánková medicína a chronobiologie.

## **5. METODY A REALIZACE PRAKTICKÝCH MĚŘENÍ**

V následujících kapitolách jsou uvedeny realizované aktivity v oblasti výzkumu a jednotlivé praktické kroky související s měřením pro validaci hlasové analýzy.

### **5.1. Příprava měření**

Vlastnímu měření předcházelo několik kroků, jejichž realizace trvala téměř 5 let. Nejprve bylo realizováno pilotní měření na Letecké škole (viz kapitola 5.1.1), na jehož základě probíhala jednání s vedením podniku ŘLP ČR, s. p. a konkrétně se skupinou FSAG (Fatigue Safety Action Group), která má u podniku za cíl implementaci a rozvoj FRMS. Byly diskutovány jednotlivé aspekty plánovaného měření – organizační záležitosti týkající se umožnění účasti provozního personálu na simulacích, využití simulátoru IATCC (Integrated Air Traffic Controller Centre) včetně personálního zajištění, výběr vhodného simulačního cvičení, zajištění potřebného vybavení (EEG zařízení, brýle emitující modré světlo, notebook), diskutovalo se nakládání s výsledky, způsob jejich vyhodnocení a následné využití.

#### **5.1.1. Pilotní měření na LŠ**

V rámci ověření realizovatelnosti plánovaných měření v podmínkách Řízení letového provozu ČR, s. p. bylo provedeno pilotní měření na Letecké škole.

Cílem tohoto pilotního měření bylo zaprvé seznámení se s technologií hlasové analýzy, s přístrojem pro měření EEG, a ověření, že je takovéto měření reálně provádět se žáky ve výcviku na řídicí letového provozu na radarových simulátorech Letecké školy.

Pilotní měření proběhlo ve dnech 19. a 20. 6. 2018 na simulátoru Rose na Letecké škole. Měření se účastnili dva probandi se znalostí problematiky řízení letového provozu. Pro účely měření byli probandi první den měření odpočatí, ve druhém dni byli po spánkové deprivaci, aby bylo možné rozlišit stavy s různou mírou bdělosti/únavy.

Pro pilotní měření bylo využito následujícího technického vybavení:

- Nástroj pro hlasovou analýzu – tablet, který odesílá hlasová data na server k vyhodnocení. V tomto případě nebylo nutné provádět jakékoliv zásahy do

vybavení, jelikož v době provádění pilotního měření byly všechny simulátorové pozice vybaveny těmito tablety, které v dané době sloužily pro sledování aktuální míry stresu žáků ve výcviku. Vyhodnocení dat provedla firma Screening Solutions s.r.o.

- Simulátor Rose – jedná se o výcvikovou platformu využívanou pro různé druhy radarového výcviku (simulátorem“ se dle [82] rozumí syntetické výcvikové zařízení, které představuje důležité prvky skutečného provozního prostředí a reprodukuje provozní podmínky, za nichž osoba podstupující výcvik může přímo plnit praktické úkoly v reálném čase)., která slouží pro tuzemské i zahraniční kurzy řídicích letového provozu, v podmínkách ŘLP ČR, s. p. je tento simulátor využíván v počátečních fázích výcviku. Bylo zvoleno cvičení s poměrně monotónním průběhem s předpokladem, že takovéto cvičení povede k narůstající únavě probandů, na závěr cvičení byla zařazena nestandardní situace (nouze na palubě letadla), která měla za cíl opět probanda „aktivovat“ a jeho únavu přechodně snížit.
- EEG přístroj zapůjčený z ČVUT v Praze, Fakulty dopravní, Ústavu dopravní telematiky, pomocí kterého bylo zaznamenáváno EEG v průběhu celého experimentu. Vyhodnocení dat provedli odborníci z NÚDZ.

**Vlastní pilotní měření** proběhlo následujícím způsobem. Každý z probandů absolvoval v každém dni měření dvě simulátorová cvičení, jejichž trvání bylo cca 50 minut. Cvičení byla rozdělena na tři části (poslední část zahrnovala nestandardní situaci), před každou částí byl zjišťován subjektivní pocit ospalosti pomocí standardní škály Karolinska Sleepiness Scale, dále byl měřen reakční čas probandů pomocí testu reakce na vizuální podnět (Psychomotor Vigilance Task). V průběhu simulátorového cvičení byl zaznamenáván hlas komunikace probanda s pseudopilotem (v rámci simulace představuje piloty letadel, která jsou řízena, zadává instrukce řídicího do simulátoru a tím ovládá cíle, dále simuluje komunikaci pilota – více viz kapitola 5.4.1) a zároveň byl prováděn kontinuální záznam EEG.



Obrázek 3 – Realizace pilotního měření na Letecké škole ŘLP ČR, s. p.; zdroj: vlastní

**Vyhodnocení naměřených dat** z hlasové analýzy proběhlo firmou Screening Solutions s.r.o. a vyhodnocení EEG záznamu, reakčního času (PVT) a subjektivního pocitu ospalosti odborníky z NÚDZ. Výsledky obou metod byly porovnány a byla snaha nalézt korelace mezi parametry hlasové analýzy a EEG, resp. KSS či PVT.

V rámci vyhodnocení byla nalezena určitá míra korelace některých hlasových parametrů (parametry nazvané „Stressed“ a „Energy“) s mírou subjektivní ospalosti (KSS). Současně korelují i s relativním množstvím alfa a beta aktivity v průběhu simulovaných cvičení. Vyhodnocení EEG proběhlo formou spektrální analýzy na frontálních elektrodách (F3 a F4) a bylo počítáno s relativními zprůměrovanými výkony. Toto vyhodnocení bylo ještě dále diskutováno zejména z pohledu vhodnosti zvolených elektrod a způsobu vyhodnocení EEG záznamu. Způsob vyhodnocení získaných dat je jedním z dílčích cílů disertační práce (viz kapitola 1.7).

Výsledky je však „vzhledem k charakteru pilotního měření a minimálnímu počtu probandů nutné brát s rezervou a považovat je pouze za možná vodítka k případným budoucím měřením. Až měření s větším množstvím probandů umožní adekvátní použití statistických metod pro validní zhodnocení významnosti případných rozdílů.“ [103]

I závěry hlasové analýzy upozorňují, že „vzhledem k faktu, že byly hodnoceny pouze čtyři nahrávky, během dvou dnů u dvou probandů a tyto nahrávky byly pořízeny během nestandardního průběhu výcviku, je nutné brát všechny závěry nebo interpretace s rezervou, Více než o závěry se jedná o ilustraci možností, jak by mohla být zpracována data při relevantním vzorku nahrávek z reálného provozu.“ [129]

Cíl pilotního měření byl přesto naplněn. Bylo ověřeno, že je reálné podobné měření provést bez výraznějšího narušení běžného výcviku. Zároveň byly získány cenné poznatky a zkušenosti týkající se časové a personální náročnosti provedení takového měření. Tyto závěry byly prezentovány představitelům Letecké školy a byly dále zohledněny při přípravě měření na významnějším počtu probandů.

Na základě vyhodnocení výsledků pilotního měření byla identifikována potřeba významného zjednodušení přípravy účastníků a samotné realizace měření (zejména s ohledem na zapojení kvalifikovaných řídících letového provozu a měření na velmi vytíženém radarovém simulátoru určenému pro výcvik nových i stávajících řídících a na finanční a personální náročnost celého měření).

Výsledky pilotního měření a návrh úprav pro umožnění realizace experimentu s větším množstvím probandů byly prezentovány v rámci konference *Smart City Symposium Prague 2020* (viz kapitola 7.5).

Na základě těchto výsledků proběhla v rámci ŘLP ČR, s. p. řada diskusí, na nichž se s ŘLP ČR, s. p. projednalo a upřesnilo organizační uspořádání plánovaných měření. Důležitým krokem bylo schválení měření zástupci podniku (členy Fatigue Safety Action Group, která se zabývá riziky souvisejícími s únavou). Poté následovala identifikace vhodných skupin účastníků měření s ohledem na harmonogram směn řídících letového provozu, zátěž a obsazenost simulátoru a výběr konkrétních termínů pro provedení měření. Před samotnou realizací proběhl s každým účastníkem briefing, na kterém byl seznámen s procesem měření, jeho cíli a očekávanými výstupy.

## **5.2. Návrh průběhu měření**

Ve spolupráci s experty z Národního ústavu duševního zdraví, kteří mají v přípravě a realizaci tohoto druhu měření bohaté zkušenosti a jejichž zástupce se

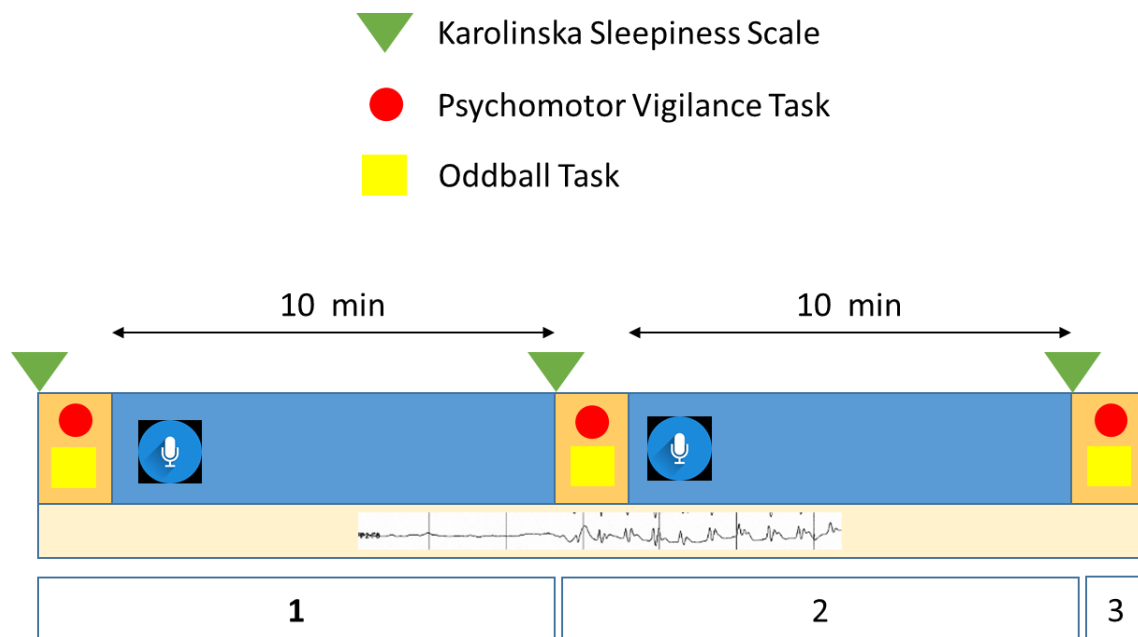
rovněž účastnil pilotního měření na Letecké škole, byl na základě pilotního měření navržen průběh experimentu s ohledem na časovou a personální náročnost tak, aby během co nejkratší možné doby bylo získáno co největší množství dat o úrovni bdělosti/únavy za stanovených podmínek.

Bylo potřeba zohlednit následující závěry pilotního měření na Letecké škole:

- zkrátit na minimum přípravu probandů, tzn. nasazení EEG čepice, příprava simulace a doplňkových měření,
- zajistit reálné podmínky, tzn. měření provést na simulátoru E2000, který je věrnou kopií reálně využívaného systému pro řízení letového provozu a zasazení experimentu do rozpisu směn v době, kdy jsou řídící vystavení největšímu riziku únavy,
- zajistit prostředky pro možnosti vyhodnocení naměřených dat.

Během každého měření účastník podstoupil simulační cvičení, které za podmínek velmi blízkých reálnému prostředí simuluje skutečný letový provoz, včetně veškerého vybavení stanoviště skutečných letových provozních služeb. Během simulace byl prováděn nepřetržitý záznam EEG a záznam hlasu, subjektivní pocit ospalosti byl zaznamenáván pomocí škály ospalosti Karolinska (KSS) a byl sledován reakční čas v předem určených okamžicích. Během určitých částí měření byly ke zvýšení bdělosti jednotlivce použity také brýle vyzařující „modré světlo“ (Luminette ©). [21] Testovací baterie PEBL (The Psychology Experiment Building Language, v 2.1) - konkrétně testy Perceptual Vigilance Task (PVT) a Oddball Task - byla vybrána s ohledem na relativně nízkou časovou náročnost testu. Tyto testy byly provedeny při každém měření před, během a po simulaci. Průběh experimentu je znázorněn na obrázku a jednotlivé použité metody jsou popsány v následujících kapitolách.





Obrázek 4 – Průběh experimentálního měření; zdroj: vlastní

Obrázek 4 ukazuje průběh experimentu. Měření se skládalo ze dvou částí. Červená kolečka představují časové body, kdy byl prováděn test na vizuální reakční podnět, zelené trojúhelníky znamenají záznam subjektivního pocitu ospalosti pomocí Karolinska Sleepiness Scale a žluté čtverečky ukazují, kdy byl prováděn úkol Oddball. Během experimentu bylo kontinuálně zaznamenáváno EEG a hlas byl zaznamenáván během obou simulačních fází (modré oblasti).

Vzhledem k tomu, že základní hypotézou (viz kapitola 5.7) celého výzkumu byl předpoklad vyšší únavy po noční směně oproti stavu před směnou, byla zvolena druhá noční směna v řadě, jelikož tato byla diskusemi s provozním personálem označena jako nejproblematictější (více než dvě noční směny nejsou na zvoleném stanovišti povoleny) a tudíž rozdíl mezi bdělostí a únavou by měl být největší.

### 5.3. Popis vzorku a jejich specifika

Všichni účastníci průzkumu byli kvalifikovaní řídicí letového provozu s minimálně 10 letou praxí. Jak je pro výkon povolání vyžadováno podle ICAO a evropské legislativy, jsou všichni řídicí letového provozu pravidelně lékařsky kontrolováni, včetně psychologických vyšetření. Tato skupina účastníků má některá specifika související s výběrovým procesem. Výběrové řízení je zaměřeno na hledání individuálních profesních a osobních kvalit. Jeho konkrétní kola, včetně počtu, se mohou v různých státech ECAC (European Civil Aviation Conference) mírně lišit.

Rozdíly v požadavcích a přístupu jsou také v případě civilních nebo vojenských poskytovatelů letových provozních služeb. V realizovaném experimentu se jednalo o civilní řídicí letového provozu. Proces výběru by však měl splňovat alespoň tyto aspekty:

- stanovení minimálního a maximálního věku pro zahájení výcviku řídicího letového provozu (ATCO),
- požadovaná úroveň vzdělání,
- testování schopností,
- lékařské testování,
- hodnocení jazykových znalostí - anglický jazyk. [69]

Cílem výběrového řízení je najít uchazeče, kteří jsou dostatečně vyspělí z pohledu vzdělání, ve fyzické a psychické kondici, aby byli schopni získat, udržet a prokázat požadované relevantní teoretické a praktické dovednosti.

Logické uvažování nabízí hypotézu, že jednotlivci způsobilí pro výcvik ATCO by měli mít společný profil, který je funkcí charakteristik jednotlivců vykonávajících tuto profesi. [32]

Všichni účastníci vyplňovali spánkový deník po dobu tří dnů před měřením, aby bylo možné ověřit délku a kvalitu spánku, a také vyplnili dotazník „morningness–eveningness“ (MEQ), aby byl ověřen chronotyp účastníků a toto mohlo být vzato v potaz v rámci vyhodnocení výsledků.

Výzkumu se zúčastnilo 10 probandů, z nichž u 3 není vyhraněný chronotyp, 4 jsou ranní typ (1 z nich zcela vyhraněný) a 3 večerní typ. Rozložení chronotypů je rovnoměrné (s ohledem na počet probandů), nepřevládá ani jeden z extrémních typů. Všichni účastníci jsou muži, věk od 28 do 52 let (průměr 42 let), kvalifikovaní řídicí letového provozu pro přibližovací radarové služby s doložkou pro stanoviště APP Praha a TWR Ruzyně (LKPR) a 5 z nich rovněž vykonávající roli WS (Watch Supervisor). Délka praxe účastníků se v době experimentu pohybovala mezi 2 do 25 let (průměrná délka praxe 13 let). Všichni probandi se podíleli na výzkumu ve stejné fázi svého cyklu směn - před zahájením druhé noční směny na APP Praha v řadě a bezprostředně po jejím ukončení.

## 5.4. Potřebné vybavení

### 5.4.1. Radarový simulátor

Zatímco pilotní měření bylo provedeno na simulátoru ROSE na Letecké škole, měření pro ověření hlasové analýzy bylo realizováno na hlavním radarovém simulátoru ŘLP ČR, s. p. v IATCC Jeneč.

#### Popis SIMU

SIMU IATCC je platforma umožňující pro účely výcviku a vývoje simulovat zobrazení radarových, koordinačních a informačních dat letového provozu. Dále také funkce a chování jednotlivých ATM systémů, postupy a reakce posádek letadel, jakožto i interakci okolních ATC stanovišť na tok letového provozu. Pro dosažení maximální věrohodnosti zobrazení je simulátor sestaven ze stejných ATM systémů, jaké se používají v reálném provozu. Jejich funkce je však z koncepčních, technických a finančních důvodů místy omezena. Oproti reálnému systému je simulátor obohacen o systémy pro jeho ovládání, systémy pro tvorbu a archivaci cvičení a systémem virtuálního času. Základním rozdílem je způsob generování vstupních dat pro tyto systémy.

Vstupní data jsou zčásti připravena off-line během tvorby scénáře cvičení nebo datasetu a následně automaticky generována systémy simu, částečně vkládána ručně přes pozice: pseudopilot (ovládání pohybu tracků, hlasová a datalinková korespondence), vedoucí cvičení (FDO a koordinace žákem neřízených sektorů, ATC služeben) a dále obsluhou simulátoru (konfigurace systémů, obsluha FDO, OPSUP, JETI). [101]

Z výše uvedeného plyne i potřebné personální obsazení SIMU pro realizaci takového cvičení a s tím související personální náročnost.

**Pseudopiloti**, jejichž rolí je simulovat piloty letadel tak, aby byla simulace totožná s reálným provozem. Pseudopilot komunikuje s řídicím letového provozu (hlasově pomocí příslušné frazeologie a rovněž datově pomocí datalinku), reaguje na příkazy řídicího, které vkládá do simulátoru a tím zajišťuje pohyb cílů na radarovém zobrazení, postupuje v simulaci podle předem připravených scénářů popsaných v tzv. Pilot logu a v příslušných okamžicích podle tohoto scénáře vyžaduje akci od řídicího – např. letadlo vyžaduje stoupání/klesání, ohlašuje

nestandardní situaci a s tím související požadavky na asistenci, žádá od řídicího meteorologické a další informace. V simulaci pro validaci hlasové analýzy bylo potřeba zajistit vysokou frekvenci komunikace, aby bylo dostatek hlasových dat pro analýzu. Za tímto účelem byli pseudopiloti průběžně, nad rámec instrukcí v pilot logu, žádáni o začlenění dalších mimořádných hlasových relací – nejčastěji byla začleněna situace oslnění laserem (pilot oznámí oslnění laserem a řídicí podle platného postupu od pilota požaduje detailní informace o barvě laseru, směru a místě, ze kterého laserový paprsek přicházel, případné ovlivnění schopnosti letu vlivem oslnění apod.), případně technickou závadu letadla s požadavkem návratu na Letiště Praha (pilot oznámí technickou závadu a požadovanou asistenci, řídicí letového provozu získává od pilota dodatečné informace o povaze závady a koordinuje postup s dotčenými ATS stanovišti – i tato telefonická koordinace byla v některých případech zaznamenávána a byla součástí hlasové analýzy) či další situace zvyšující frekvenci hlasové komunikace, avšak nikterak závažné, aby příliš neovlivnily bdělost/únavu probanda. Každá takováto nestandardní situace byla zaznamenána v záznamu z průběhu simulace. V některých případech (zaznamenaných v záznamu ze cvičení) byla rovněž komunikace prováděna v českém jazyce oproti standardní komunikaci v angličtině. Zátěž cvičení byla totiž zvolena s cílem stereotypnějšího provozu bez výrazných výkyvů, aby byl podpořen pocit únavy během ranního měření. Pro každé cvičení na simulátoru byli k dispozici 2 pseudopiloti, jejichž přítomnost na SIMU byla pro tyto účely koordinována s vedoucím oddělení pseudopilotů na každé měření zvlášť.

**Administrátor SIMU** připravuje a zabezpečuje data potřebná pro provoz simulátoru, dále v plné míře konfiguruje všechny systémy, tak aby odpovídaly požadavkům výcviku a cílům prováděného cvičení. Během realizovaných měření byl vždy přítomen minimálně jeden administrátor SIMU, který před započítím měření připravil simulátor a požadované cvičení, aby bylo možné měření včas a bez problémů zahájit. Čas pro provedení každé simulace byl omezen, zejména při večerním měření byl čas limitován nástupem zúčastněného řídicího na noční směnu. Po noční směně byl naopak čas limitován zahájením běžného výcviku na simulátoru. Příprava simulátoru obnášela změnu konfigurace pracovišť, nahrání požadovaného cvičení a nestandardní nastavení VCS pro zajištění požadovaného

způsobu nahrávání hlasové komunikace v systému RRS. Po každém ranním cvičení pak bylo potřeba uvést simulátor do původní konfigurace, aby byl simulátor připraven pro potřeby standardního výcviku.

**Koordinátor cvičení** během výcviku řídí a koordinuje simulovaný letový provoz na žákem neobsazených sektorech a ATC služebnách. To znamená, že prakticky simuluje všechna okolní stanoviště, se kterými žák/řídící na simulátoru komunikuje. V případě realizovaných měření byla tato pozice s cílem úspory zdrojů realizována administrátorem SIMU.

### **Vybavení SIMU**

Simulátor je rozdělen na dvě samostatné části (SIMU APP / SIMU ACC). Měření proběhlo na části APP. Jak již bylo zmíněno výše, jsou na simulátoru použity stejné ATM systémy jako v reálném provozu. Konkrétně se jedná zejména o následující systémy:

- SIMU E2000 – Základní systém simulátoru umožňující zpracování a prezentaci radarových dat.
- SIMU ESUP – Systém pro zpracování neradarových letových dat. Data pro ESUP na simulátoru jsou připravována předem, při tvorbě cvičení. Datasetsy se kopírují při startu simulátoru, jednotlivé konkrétní scénáře pak při startu cvičení.
- SIMU IDP – Systém prezentující radarové zobrazení a umožňující vstup do letových dat z pozice PC (Planning Controller). Na pozici EC (Executive Controller) je použit jako záložní radarové zobrazení. Funkčnost IDP (IDP Bypass, Lite) je z pohledu ATC na simulátoru plně totožná se systémem použitým v reálu. Scénáře pro IDP se připravují off-line při tvorbě cvičení. Sektorizace IDP se nastavuje společně se sektorizací ESUPu před startem cvičení.
- SIMU WALDO – Systém poskytující doplňkové informace potřebné k výkonu činnosti ATC. WALDO na simulátoru je z hlediska funkčnosti plně identické s verzí použitou v živém systému. Z hlediska použitých dat se pro dané cvičení připravují pouze tabulky INFO. V omezené míře pak zprávy TAF, SIGMET, Výstraha, NOTAM a SNOWTAM. Ostatní data jsou statická a jsou zkopírována ze živého systému.
- SIMU AWOS – Systém zobrazující meteo data a podmínky na letišti. Data pro AWOS jsou připravována při tvorbě cvičení, jednotlivé scénáře se do

systemu kopírují při startu cvičení. Pozice koordinátora výcviku umožňuje tato data on-line měnit.

- SIMU AMS – Systém zobrazující stav světelných a radionavigačních zařízení na letišti. Data pro AMS nejsou součástí scénáře cvičení, ale jsou podle potřeb on-line modifikována z pozice koordinátora cvičení. Zobrazením AMS jsou vybavena pouze dvě APP stanoviště.
- SIMU VCS-GAREX – Systém umožňující radiové spojení ATC – letadlo a telefonní spojení mezi jednotlivými sektory a ATS služebnami. Oproti realu je obohacen o řídicí panely na pozicích pseudopilotů a koordinátorů cvičení. Takto je simulováno radiové spojení s letadlem a telefonní spojení s ostatními služebnami (sektory).
- SIMU-RRS – Systém záznamu a jeho přehrávání – Recording and Replay System lokalit SIMU IATCC. Systém je chápán jako soubor prvků, zajišťujících záznam komunikace A/G a G/G, prostorových mikrofónů a vybraných obrazovek a vstupních zařízení (myš, klávesnice, touchscreen) v lokalitě SIMU. Pro účely měření byl zásadní pouze záznam komunikace.

### **Zvolené cvičení**

Jednou z diskutovaných otázek byla rovněž volba cvičení. Cílem bylo zvolit takové cvičení, které bude bohaté na hlasovou komunikaci mezi piloty (tj. pseudopiloty) a řídicím letového provozu, avšak při poměrně nízké provozní zátěži a stereotypním druhu provozu, která by podpořila zvýšenou únavu během měření po noční směně. Po konzultaci s vedoucím výcviku stanoviště APP Praha bylo zvoleno cvičení používané během místního výcviku, během fáze tzv. Transition Training.

- Cvičení z místního výcviku – č. 505 (večerní měření) a č. 506 (ranní měření).
- Tématem cvičení je seznámení s TMA Praha, přílety, odlety a různé druhy přiblížení na Letiště Praha. Cílem je řízení příletů a odletů z bodů předání řízení a vektorování pro různé druhy přiblížení, přičemž hustota provozu nevyžaduje vytváření sekvence. Během večerního cvičení byla aktivní dráha 24, během ranního dráha 06. Obě cvičení obsahovala do 20 letadel.

### **5.4.2. Mobilní EEG**

V průběhu pilotního měření se jako nejproblematičtější částí ukázala příprava účastníků na realizaci měření (nasazení EEG čepice a zajištění kontaktu skalpu

s elektrodami pomocí gelu) a příprava potřebného souvisejícího příslušenství (připojení k PC). Z tohoto důvodu byla pro nalezení vhodnějšího řešení provedena analýza trhu a možností, jak tuto přípravu co nejvíce zkrátit. Jako ideální řešení bylo vyhodnoceno zakoupení mobilního zařízení EEG. Za tímto účelem byla podána žádost o grant ze *Studentské grantové soutěže* (viz kapitola 7.4). V rámci výběru konkrétního řešení bylo osloveno několik společností a vzhledem ke schválenému rozpočtu bylo zakoupeno vybavení - mobilní EEG EMOTIV EPOC+ 14 včetně potřebného softwarového příslušenství (popis zvolené technologie je součástí následujících podkapitol). V průběhu realizace měření v další fázi projektu vyšlo najevo, že bez tohoto zařízení by měření v ŘLP ČR, s. p. nebylo realizovatelné v zamýšleném rozsahu – nepodařilo by se během vyčleněné jedné hodiny probanda k měření připravit a měření provést. Díky tomuto vybavení byla zkrácena příprava účastníků z přibližně 20 minut na přibližně 2 minuty.

Jednoduchý návod k použití zakoupeného EEG zařízení je součástí *Přílohy 1* této práce.

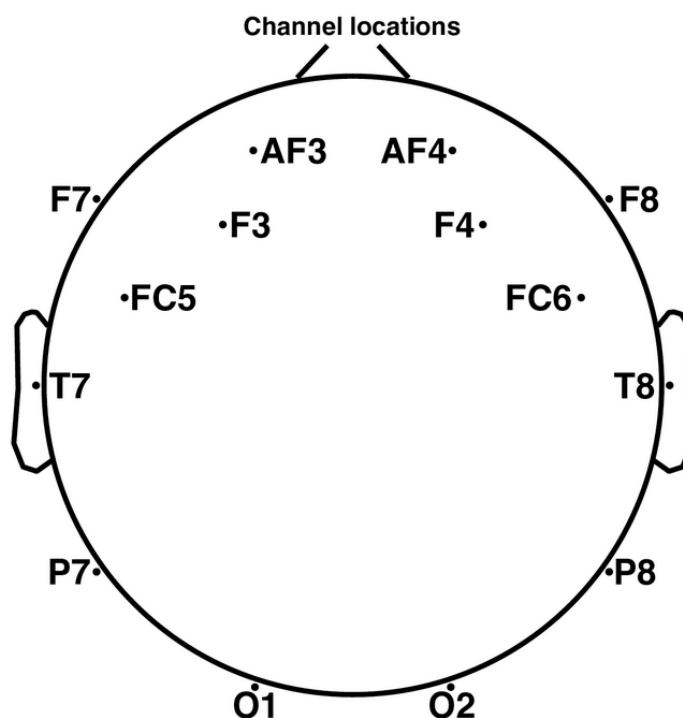


Obrázek 5 – EMOTIV EPOC+ 14 kanálové mobilní EEG zařízení použité během výzkumu; zdroj: <https://www.emotiv.com/epoc>

## **Emotiv**

V této studii bylo jako zařízení mEEG (mobilní EEG) použito Emotiv EPOC + (<https://www.emotiv.com/epoc>). Emotiv EPOC je herní náhlavní souprava EEG,

která byla vyvinuta pro pokročilé aplikace rozhraní mozku a počítače (BCI). [110] Model EPOC použitý pro studii má interní vzorkovací frekvenci 2048 Hz. Data jsou poté převzorkována na 128 Hz, než jsou k dispozici systému pro zachycení signálů EEG. Má šířku pásma od 0,2 do 45 Hz s digitálními zářezovými filtry při 50 a 60 Hz. [110] Elektrody sestávají z pozlaceného kontaktního snímače a plastových nástavců, které jsou navlhčovány ve fyziologickém roztoku, každá elektroda má rozlišení 0,51  $\mu\text{V}$ . [80] MEEG byl připojen pomocí 2,4 GHz pásma Bluetooth (BLE) k notebooku HP Elite Book 820, který byl používán pro sběr dat. Emotiv EPOC + používá modifikovanou kombinatorickou nomenklaturu mezinárodního systému 10 – 20 s následujícími 14 kanály: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4 a dvěma referencemi: P3 a P4. Tyto polohy elektrod jsou pevné díky konstrukci hardwaru a nelze je individuálně upravit podle velikosti hlavy probanda. [110]



Obrázek 6 – EMOTIV EPOC+ 14 umístění elektrod; zdroj: [80]

V rámci výběru vhodného zařízení byla provedena rešerše dostupné literatury s ohledem na vhodnost využití daného EEG zařízení pro výzkumné účely. Byly zhodnoceny závěry jednotlivých vědeckých studií, které kvalitu zařízení EPOC hodnotí, níže jsou vyjmenovány hlavní výhody a naopak i slabé stránky, se kterými se při využití mobilního EEG a konkrétně pak systému EPOC musí počítat.



## **Výhody mobilního EEG**

### ***Bezdrátové řešení***

Systémy EEG jsou tradičně omezeny tím, že vyžadují použití vodičů pro připojení jednotlivých skalpových elektrod nebo EEG čepic k zesilovačům [74], [109]. Takové pevné systémy EEG mohou být problematické pro získávání EEG v případech, kdy není možné nebo proveditelné omezit pohyb, jako je tomu v případě výkonu činnosti ATCO. [8] I v případě pilotního měření na Letecké škole se ukázal tento fakt jako jeden z problematických aspektů vedoucích k úvahám o pořízení mobilního řešení.

Mobilní EEG umožňuje pohyb probanda bez omezení (pouze s limitací dosahu Bluetooth) – v případě měření v prostředí řízení letového provozu je pohyb sice minimální, ale přesto při určitých činnostech nezbytný (ATCO musí být schopen pohybu pro letové stripy, k dotyku na VCS, navíc využívá mikrofon a klíčovací zařízení pro komunikaci), jakékoliv další omezení v podobě vodičů vedoucích z EEG čepice k EEG zařízení by práci ATCO značně znesnadnila a výsledky průzkumu by tak mohly být tímto ovlivněny.

### ***Usnadnění přípravy***

Další nespornou výhodou se během experimentu ukázala rychlost přípravy probanda. Na rozdíl od EEG využívaného během pilotního měření, mobilní EEG EPOC lze připravit i bez přítomnosti probanda – nasazení elektrod na čepici, jejich zvlhčení pomocí solného roztoku a propojení s notebookem či jiným zařízením obsahujícím potřebné softwarové vybavení pro záznam EEG prostřednictvím technologie Bluetooth. Příprava probanda se tudíž zkrátila na nezbytné minimum (cca 2 – 3 minuty na správné nasazení již připravené čepice a kontrolu kontaktu všech elektrod) oproti zdlouhavé přípravě pomocí EEG vyžadujícího nasazení EEG čepice, aplikaci gelu k zajištění kontaktu elektrod za přítomnosti probanda, které v rámci pilotního měření zabralo i více než 20 minut.

### ***Nížší náklady na vybavení***

Jako další výhodou se ukazují náklady, protože systémy zaměřené na výzkum často stojí desítky tisíc dolarů, a jsou tak mimo dosah mnoha nedostatečně financovaných výzkumných pracovníků. Spotřebitelské systémy EEG nabízejí potenciální řešení těchto problémů.

Několik společností vydalo relativně levné systémy EEG zaměřené na trh her a neurofeedbacků, které jsou obvykle přenosné a jejich nastavení je mnohem snazší než u systémů pro výzkum. Například Emotiv EPOC, Muse2 a NeuroSky MindWave stojí méně než 700 USD, jsou bezdrátové a jako vodivé médium používají buď suché elektrody, nebo plstěné podložky nasáklé solným roztokem.

To je v kontrastu s výzkumnými systémy, které stojí mnohem více a často používají kovové senzory, které vyžadují aplikaci elektricky vodivého gelu. Kromě toho systémy pro výzkum často vyžadují těžké zesilovače, které omezují jejich přenositelnost (viz předchozí odstavce).

V poslední době došlo k vývoji a komercializaci řady mobilních bezdrátových systémů EEG, jako jsou systémy EPOC od společnosti Emotiv Inc. Tato zařízení byla původně vyvinuta jako zařízení pro rozhraní mozek-počítač, ale vzbudila zájem výzkumných pracovníků vzhledem k jejich cenové dostupnosti a potenciálu provádět výzkum EEG mimo laboratoř. Je třeba zmínit, že trh zařízení EEG vykazuje rychlý rozvoj. Některé studie [8] prokázaly, že systém Emotiv lze použít k získání rozeznatelných ERP vln, které jsou srovnatelné s vlnami ze systémů EEG v kvalitě používané ve výzkumu.

## **Nevýhody mobilního EEG**

### ***Sporná kvalita záznamu***

Některé studie však uvádí, že se zdá, že systém Emotiv má horší poměr signál/šum než standardní, nepřenosné výzkumné EEG systémy. Dalším problémem je, že elektrody Emotiv EPOC jsou schopné zaznamenávat pouze ze 14 pevných pozic elektrod. Elektrody jsou distribuovány na mezinárodním systému 10 – 20 v pozicích po celém obvodu pokožky hlavy, ale nezaznamenávají ze středních linií, což je problematické pro studium MMN, P300 a dalších komponent ERP, jejichž výkon je nejvyšší na středové linii [8]. Další obavou je, že hlášení systému Emotiv o úrovních impedance [74] nemusí být pro výzkumné účely dostatečné.

Ačkoli tato nízkonákladová náhlavní souprava dokáže uspokojivě zaznamenat data EEG, měla by být podle některých autorů zvolena pouze pro nekritické aplikace, jako jsou hry, komunikační systémy atd. Pro výzkumné účely by měl být zvolen lékařský systém, kromě případů, kdy je k dispozici velké množství pokusů

nebo když je poměr signálu k šumu vysoký. To také naznačuje, že je stále zapotřebí návrh specifického nízkonákladového záznamového systému EEG pro kritické aplikace a výzkum.

Levná zařízení EEG trpí podle těchto autorů ve srovnání s lékařskými EEG několika nedostatky včetně nižší kvality signálu a nepřesného časování. Nedávná práce [31] naznačuje, že poměr signálu k šumu (signal to noise ratio - SNR) je slabou stránkou těchto aparátů ve srovnání s poměry přítomnými v lékařských systémech.

Jiná studie ukazuje, že levný bezdrátový EEG systém může získávat EEG data v dostatečné kvalitě a že následující ERP (průběh, komponenty N200 a P300) jsou podobné vybavení na úrovni výzkumu.

### ***Horší možnosti přizpůsobení hlavě probanda***

Další nevýhodou uváděnou ve vědeckých studiích je fakt, že náhlavní souprava neposkytuje dobré přizpůsobení pro různé velikosti hlav subjektů. V těchto případech elektrody nedosahují dobrého kontaktu s pokožkou a zaznamenané signály zahrnují interferenci šumu při 23 a 28 Hz. Uvádí se, že v případě uvolněného kontaktu elektrody zařízení způsobuje aliasingové artefakty z elektrické sítě. Některé studie tak dochází k závěru, že rozptyl v poměru artefaktů mezi subjekty byl velký kvůli obtížnosti přizpůsobení zařízení různým velikostem hlavy. Zařízení EPOC se však vyrábí pouze v jedné velikosti, což vede ke špatným výsledkům ohledně kvality signálu. Podle těchto studií zařízení EPOC trpí velkým podílem artefaktů způsobených špatným přizpůsobením, v závislosti na velikosti a formě hlavy subjektu. V případě našeho provedeného experimentu jsme se však s ničím podobným nesetkali. Kontinuálně byla sledována úroveň kontaktu pomocí aplikace Emotiv, kde při ztrátě kontaktu u dané elektrody toto bylo indikováno a byla okamžitě sjednána náprava a obnovení kontaktu. Při následném zpracování dat byl šum a artefakty odstraněny. U jednoho probanda se však projevila nevýhoda nemožnosti upravit velikost náhlavní soupravy tím, že si na konci měření stěžoval na bolesti hlavy.

### **Vývoj v oblasti mobilního EEG a recenze použitého EEG EPOC**

Během posledního desetiletí upoutaly pozornost výzkumných pracovníků spotřebitelské systémy EEG. Například nedávný průzkum rozsahu aplikací Emotiv

EPOC zjistil 382 článků v časopisech a sbornících publikovaných v letech 2009 až 2019, včetně 51 experimentálních výzkumných studií a 31 validačních studií [124].

Jedním z komerčně nejúspěšnějších mobilních zařízení EEG je Emotiv EPOC®, neinvazivní zařízení pro získávání informací o aktivitě mozku v reálném čase se 14 elektrodami, které pomocí komunikace Bluetooth přenáší zaznamenaná data do PC. Je ergonomický, bezdrátový a levný ve srovnání s jinými mobilními systémy EEG.

Duvinage a kol. [31] prokázali, že výkonnost EPOC je vyšší než náhodná a že EPOC lze použít pro nekritická použití. I přes nižší přesnost lze zařízení EEG na úrovni spotřebitele nasadit uživatelům v přirozeném prostředí a v reálných systémech BCI. [77] Díky zmírnění finančních, metodologických a praktických překážek může mobilní EEG usnadnit neurovědecký výzkum na tématech a na místech, kde by to jinak nebylo možné. [126]

### **Ověřovací měření na FD**

Vzhledem ke sporným závěrům jednotlivých studií zabývajících se použitím mobilního EEG EPOC bylo provedeno rovněž ověřovací měření na Fakultě dopravní. V rámci tohoto ověření došlo k porovnání záznamů z EEG Laboratoře řízení a modelování dopravy a pořízeného mobilního EEG EPOC. Ověřovací měření proběhlo v rámci výuky předmětu TRAS 4. 12. 2019, kdy byla obě řešení představena studentům tohoto předmětu a se dvěma z nich proběhlo rovněž demonstrační měření (ukázka rozdílů v EEG záznamu při otevřených očích, zavřených očích, jednoduché, složité počty, Ravenův test apod.). První z nich bylo realizováno pomocí EEG Laboratoře řízení a modelování dopravy a druhé pomocí mobilního EEG EPOC. Výsledky těchto dvou měření byly kvalitativně porovnány za účasti doc. Tichého a prof. Fabera v software Truescan od společnosti Alien a bylo konstatováno, že oba záznamy jsou kvalitativně srovnatelné a zařízení EPOC je pro zamýšlené měření v podmínkách ŘLP ČR, s. p. využitelné bez omezení a bez obav ze zásadního zkreslení výsledků.

### **5.4.3. LVA**

Hlasy účastníků z každého experimentu byly zaznamenány a odeslány do moderního softwaru pro hlasovou analýzu ke zpracování. Hlas byl zaznamenán systémem záznamu a přehrávání (RRS), který zaznamenává všechny

komunikační relace mezi řídicími letového provozu a piloty. V našem výzkumu byly přenosy realizovány hlasovým komunikačním systémem (VCS), který je součástí simulátoru IATCC. Data z RRS byla anonymizována, aby se zabránilo identifikaci času měření, a byla předána k analýze zástupci výrobce LVA (společnost ANIS Group). Technologie LVA byla zvolena z důvodu jejího využití na Letecké škole a s ohledem na dobré zkušenosti při její aplikaci pro účely sledování aktuální míry a vývoje stresu u žáků ve výcviku na pozici řídicího letového provozu. Ovšem pro účely tohoto experimentu byla provedena analýza odborné literatury pro pochopení a popis fungování této technologie. Závěry této rešerše jsou obsahem následujících odstavců.

Hlasová analýza byla provedena pomocí softwaru Layered Voice Analysis (LVA). Tento software využívá celé spektrum hlasu, je snadno ovladatelný a může analyzovat hlasy jak online (zatímco zkoumaný mluví), tak offline (práce se zaznamenaným materiálem). Pro tuto studii jsme použili pouze „offline analýzu“. LVA analyzuje proměnné základní vrstvy, což jsou hrubé hodnoty získané z jedinečných měření celého hlasového spektra.

Technologie LVA je rozvíjející se a neprokázaný komerční nástroj, který se používá jen omezeně v oblasti finančních trhů, a jako u většiny komerčních produktů je jeho vnitřní fungování chráněno. Ačkoli výsledky některých studií naznačují, že metriky únavy LVA zachycují aspekty úrovně únavy ve vztahu k EEG nebo psychologickým proměnným, nejsou v současné době dokumentovány mechanismy, kterými je LVA schopna tyto výsledky dosahovat. [51]

LVA se skládá ze sady patentovaných algoritmů zpracování signálu, které extrahují a kombinují atributy z hlasu za účelem identifikace různých typů stresu, kognitivních procesů a emocionálních reakcí. Software provádí analýzu a poskytuje výstup na úrovni hlasového segmentu. Hlasový segment je logická část spojitého hlasu (jedno slovo až několik slov), jejíž délka se může pohybovat od 0,4 sekundy do 2 sekund. [78]

Původním cílem technologie LVA bylo měřit několik různých emocí, které by v kombinaci umožnily uživateli dospět k závěru, zda je řečový segment vystaven nízkému riziku nebo vysokému riziku, že bude klamný. Za tímto účelem software založený na LVA vytváří výstup založený na různých úrovních analýzy. Základní

vrstva extrahuje a kombinuje syrové hlasové atributy, další vrstva vytváří základní emoční proměnné a poslední vrstva vytváří závěrečné proměnné, které jsou výsledkem kombinace výsledků z předchozích vrstev. [79]

Technologie LVA je základem různých softwarových produktů pro komerční účely. Protože byl software původně navržen k detekci podvodu, studie běžně získávají vzorky hlasu od subjektů říkajících pravdu a lhářů v experimentech nebo terénních studiích a zkoumají, zda závěrečné proměnné algoritmu LVA mohou úspěšně rozlišovat mezi pravdivými a klamnými řečovými segmenty. Několik studií dokumentuje, že algoritmické metriky LVA pro detekci klamů nejsou o nic lepší než náhodné úrovně. [25], [48]

Některé studie [67] a [38] zpochybňují obecně platnost LVA a naznačují, že v literatuře týkající se detekce lži vyvstávají nedostatečné výsledky, protože (1) LVA neextrahuje relevantní informace z řeči a (2) variace ve výsledcích LVA jsou jednoduše artefaktem digitalizace analogových řečových signálů.

Další výzkumy naznačují, že by bylo předčasné zavrhnout LVA jako nefunkční. Novější výzkum zaměřující se na identifikaci podvodu zjistil, že proměnné LVA z primitivnějších vrstev statisticky rozlišují mezi pravdou a podvodem [33], [35].

Tato zjištění jsou podobná výsledkům studie [20], kde byla prováděna výzkumná logistická regresní analýza pro predikci podvodu, a bylo zjištěno, že detekční schopnosti jsou výrazně vylepšeny použitím primitivnějších proměnných LVA namísto předem připravených algoritmických proměnných.

Elkins a Burgoon [35] navíc ukazují, že tyto primitivnější proměnné LVA mohou rozlišovat mezi odpověďmi na nabitě a neutrální otázky a že se zdá, že celá kolekce primitivních proměnných LVA identifikuje skryté konstrukty, které korelují se subjektivním zhodnocením emocionálního stavu. Na základě těchto důkazů docházejí k závěru, že LVA může rozlišovat hlasové reakce charakterizované stresovým a emocionálním tónem.

Tato práce má za cíl realizovaným experimentem podpořit či vyvrátit výše uvedené závěry již provedených studií. Prakticky však nikterak technologii LVA neanalyzuje, pouze porovnává její výsledky dodané firmou ANIS Group s výsledky získanými jinými metodami v průběhu experimentu.

#### **5.4.4. Notebook**

Nezbytným vybavením pro realizaci měření byly dva notebooky. Jeden (HP Elite Book 820) sloužil pro záznam EEG, za tímto účelem byl zakoupen SW pro záznam EEG – jedná se o komerční SW dodávaný k mobilnímu EEG EPOC s názvem EmotivPRO. Pro účely měření bylo nutné zakoupit placenou studentskou licenci umožňující záznam EEG, jeho přehrání, uložení a export do několika formátů (pro další zpracování bylo využito formátu .edf). Tato licence byla prvních několik měsíců pořízena rovněž z podpory SGS.

Na notebooku HP Elite Book 820 byla rovněž provedena příprava hlasových záznamů dodaných správcem SIMU po každém měření – v prvních měřeních byl zaznamenáván jak hlas řídícího, tak hlas pseudopilotů, což se při zpracování ukázalo jako nežádoucí a proto bylo nutné hlas pseudopilotů z těchto záznamů odstranit. To bylo provedeno pomocí freeware nástroje Audacity. Po identifikaci tohoto nedostatku byla již následná měření realizována tak, aby v záznamu byl již pouze hlas řídícího, což vyžadovalo nestandardní konfiguraci SIMU VCS.

Druhý notebook (Toshiba TECRA Z40) byl využíván pro realizaci testů PVT a Oddball (viz kapitola 5.6.2 a 5.6.3), jelikož se během prvního měření ukázalo jako nepraktické pro obě činnosti využívat totožné zařízení z důvodu vysokého nároku na výpočetní kapacitu. V jednom případě byl pro realizaci testů využit jiný notebook, což se negativně projevilo na výsledcích z tohoto měření, a tato data bylo nutné z dalšího vyhodnocení vynechat (viz kapitola 6.1).

#### **5.4.5. Baterie testů PEBL**

Pro realizaci měření reakčního času bylo využito baterie testů Psychology Experiment Building Language (verze 2.1), což je freeware dostupný na: <http://pebl.sourceforge.net/download.html>.

### **5.5. Vlastní měření**

Měření probíhala v období od listopadu 2019 do července 2020. Měření byla přerušena omezeními plynoucími z opatření proti šíření nákazy COVID-19, která v podmínkách ŘLP ČR, s. p. znamenala výrazné organizační dopady znemožňující provádění měření na SIMU v době nejpřísnějších restrikcí. Termíny jednotlivých měření jsou uvedeny v následující tabulce.

Měření	Datum
1	7. – 8. 11. 2019
2	19. – 20. 11. 2019
3	26. – 27. 11. 2019
4	10. – 11. 12. 2019
5	14. – 15. 1. 2020
6	21. – 22. 1. 2020
7	18. – 19. 2. 2020
8	9. – 10. 6. 2020
9	23. – 24. 6. 2020
10	27. – 28. 7. 2020

Tabulka 1 – Termíny realizovaných měření; zdroj: vlastní

Na obrázku níže již je zachycena vlastní realizace prvního ze série měření na SIMU IATCC. Jedná se o druhou část měření, ve které měl proband mimo EEG čepice nasazeny rovněž brýle emitující modré světlo (viz kapitola 5.6.7). Z fotografie je patrné vybavení popsané v předchozích kapitolách – radarový simulátor, EEG čepice, notebook se SW pro záznam EEG.



Obrázek 7 – Realizace prvního experimentálního měření; zdroj: vlastní

## 5.6. Použité metody

### 5.6.1. Subjektivní pocit ospalosti

Subjektivní ospalost byla měřena škálou **Karolinska Sleepiness Scale (KSS)** [3], 9 bodovou Likertovou škálou založenou na subjektivním hodnocení úrovně ospalosti subjektu v té době. Skóre KSS bylo měřeno ve 3 různých časových



bodech během obou experimentálních sezení: před noční směnou a po ní. Během měření bylo využito anglické verze KSS, viz následující tabulka.

Rating	Verbal description
1	Extremely alert
2	Very alert
3	Alert
4	Fairly alert
5	Neither alert nor sleepy
6	Some signs of sleepiness
7	Sleepy, but no effort to keep awake
8	Sleepy, some effort to keep awake
9	Very sleepy, great effort to keep awake, fighting sleep

Tabulka 2 – Karolinska Sleepiness Scale; upraveno podle: [3]

### 5.6.2. Perceptual Vigilance task (PVT)

Po každém měření KSS proband absolvoval vizuální PVT úlohu. Úloha byl zadána na obrazovce počítače (Toshiba TECRA Z40) pomocí freeware PEBL (viz kapitola 5.4.4) spuštěním testu Perceptual Vigilance Task, jež byl nastaven na 20 stimulů během jednoho měření. Cílem bylo stisknout klávesu, jakmile se na obrazovce objevila červená tečka. Reakční časy nižší než 200 a vyšší než 700 ms byly během vyhodnocení následně vyloučeny ze statistických analýz (celkově se jednalo o méně než 5 % výsledků). PVT testují trvalou pozornost, tj. schopnost udržovat pozornost po delší dobu [29].

### 5.6.3. Oddball task

Vedle testování pozornosti, stejně jako v případě úkolu PVT, v úloze Oddball Target Detection reagují subjekty na cílové podněty, které se vyskytují zřídka a nepravidelně v rámci řady standardních podnětů. Výkon v úloze Oddball je spojen s dynamickými změnami v mapování podnětů k odpovědím, které jsou nezbytné pro rychlé provedení úkolu v prostředí s vysokými požadavky. [54] Výkon byl měřen v reakčním čase a chybovosti odpovědí subjektu. Prakticky se v této úloze jedná o rozlišení čtverce a kolečka a jeho umístění na obrazovce a podle toho reakci stisknutím příslušné klávesy. Stejně jako u úlohy PVT se v každém měření jednalo celkově o 20 podnětů.

#### **5.6.4. Měření EEG**

Během celého průběhu experimentu byl prováděn kontinuální záznam EEG pomocí mobilního EEG EPOC (viz kapitola 5.4.2). Pomocí markerů bylo v záznamu rozlišeno, která fáze měření aktuálně probíhá (PVT, SIMU). Následovalo zpracování zaznamenaných EEG dat. Toto zpracování bylo provedeno odborníky z NÚDZ.

#### **Analýza výkonového spektra**

K provedení spektrální analýzy byla použita Welchova metoda (frekvenční rozsah 0,5 - 50 Hz, rozlišení 1 Hz). Tato metoda rozdělí signál na překrývající se segmenty a pro každý segment vypočítá upravený periodogram. Průměr těchto odhadů je odhadem spektrální hustoty výkonu. Tato technika snižuje rozptyl periodogramu. Výkonová spektrální hustota v definovaném frekvenčním rozsahu byla zprůměrována v čase, aby bylo možné provést srovnání mezi skupinami subjektů. Po přepočtu na průměrnou referenci byla provedena spektrální analýza pro kontinuální EEG epochy s daty digitálně filtrovanými do 6 frekvenčních pásem: delta (0,5 - 3,5 Hz), theta (4 - 7 Hz), alfa 1 (7,5 - 9,5 Hz), alfa 2 (10–12 Hz), beta 1 (13–16 Hz a 17–23 Hz), beta 2 (24–34 Hz) a gama (35–50 Hz) podle konvenčních mezinárodních pokynů pro klinickou neurofyzilogii (International Federation of Clinical Neurophysiology guidelines). [86]

#### **Předzpracování EEG dat**

Předzpracování veškerých dat bylo provedeno v BrainVision Analyzer 2.1 (Brain Products GmbH) odborníky na tuto problematiku z NÚDZ. Data byla filtrována pomocí pásmového filtru 0,1 – 20 Hz, opětovně odkazovaného na Avg, segmentovaného v epochách 1 s. Artefakty byly detekovány vizuální kontrolou a odstraněny pomocí poloautomatického odstranění artefaktu (maximální sklon 50  $\mu\text{V}$ , max-min 100  $\mu\text{V}$ , minimální povolený amp – 100  $\mu\text{V}$ , maximální povolený amp 100  $\mu\text{V}$ , nejnižší povolená aktivita 0,05  $\mu\text{V}$ ). Následně byly po pečlivé kontrole vyškoleným výzkumným pracovníkem NÚDZ odstraněny epochy kontaminované potem, technickými nebo nepřetržitými svalovými artefakty. Artefakty z pohybů očí nebo mrknutí očí byly odstraněny pomocí algoritmu nezávislé komponenty (independent component algorithm - ICA).

### 5.6.5. Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ)

Dotazník na chronotyp Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ) původně vyvinutý Hornem a Östbergem [107] obsahuje 19 otázek s výběrem odpovědí, které se dotazují na individuálně preferovaný čas pro různé aktivity. Skóre MEQ se pohybuje od 16 do 86, přičemž nižší hodnoty odpovídají večernímu typu chronotypového spektra (večerní typy neboli „sovy“) a vyšší hodnoty představují jedince s tendencí k rannímu typu („skřivany“). Každý účastník vyplnil tento dotazník před realizací měření, aby k chronotypu daného subjektu bylo možné přihlídnout v rámci vyhodnocení naměřených dat.

Score	Result
16 – 30	Definitely Evening Type
31 – 41	Moderately Evening Type
42 – 58	Neither Type
59 – 69	Moderately Morning Type
70 – 86	Definitely Morning Type

Tabulka 3 – Skóre Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ); upraveno podle: [107]

### 5.6.6. Statistická analýza

Naměřená data byla vyhodnocena v MS Excel použitím **popisné statistiky** a výsledky zpracovány graficky.

Ke statistickým analýzám naměřených dat byl použit software IBM SPSS Statistics (v 23.0).

Vhodné metody pro statistickou analýzu byly s ohledem na velké množství získaných dat (zejména z EEG) konzultovány se zástupci Fakulty dopravní, Ústavu aplikované matematiky.

K porovnání dat z večerního a ranního měření pro identifikaci statisticky významných rozdílů byly použity **neparametrické párové testy** (Wilcoxonův párový test). Wilcoxonův test je obdobou znaménkového testu s tím rozdílem, že se nejen zkoumá, zda je daná hodnota větší nebo menší než medián, ale že se v úvahu berou i velikosti odchylek. Používá se pro hodnocení párových pokusů, kdy sledovaná veličina neodpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení. Porovnává 2 měření provedená u jednoho výběrového souboru. Testuje hypotézu rovnosti distribučních funkcí na základě ověření symetrického rozložení sledované náhodné veličiny. [50]

Výpočet testu vychází z párových hodnot dvou měření na jednom výběrovém souboru: veličiny  $X$  a  $X'$  (obvykle měření před a po pokusném zásahu). V našem případě byly porovnávány hodnoty jednotlivých použitých metod z večerního a ranního měření, aby bylo možné stanovit, ve kterých metodách se projevila spánková deprivace – tzn. hodnoty kterých metod vykazují statisticky významné rozdíly v bdělosti před a po absolvování noční směny.

Výpočty byly realizovány v softwaru IBM SPSS Statistics (v 23.0). Výstupem z funkce *Wilcoxon matched paired test* je tabulka, obsahující následující hodnoty:

- $Z$  – hodnota testové statistiky
- $p$  –  $p$ -hodnota (Asymp. Sig.)

	KSS1_Mor - KSS1_Eve	KSS2_Mor - KSS2_Eve	KSS3_Mor - KSS3_Eve
Z	-2,682 <sup>b</sup>	-2,699 <sup>b</sup>	-2,694 <sup>b</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,007	0,007	0,007

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on negative ranks.

c. The sum of negative ranks equals the sum of positive ranks.

d. Based on positive ranks.

Tabulka 4 – Ukázka výstupu Wilcoxonova párového testu ze software IBM SPSS Statistics; zdroj: vlastní

Ukázka v tabulce 4 prezentuje výstup z Wilcoxonova testu pro hodnoty subjektivního pocitu ospalosti (KSS) v jednotlivých fázích experimentu (1, 2 a 3) mezi večerním (Eve) a ranním měřením (Mor). Jedná se pouze o příklad výstupu ze statistického zpracování. Celkové výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.6.1.

$p$ -hodnota udává pravděpodobnost realizace hodnoty testovací statistiky, pokud nulová hypotéza platí. Statisticky významné jsou ty rozdíly, u kterých na zvolené hladině významnosti  $\alpha$  zamítáme nulovou hypotézu, tzn. hypotézu o shodnosti rozdělení veličiny  $X$  a  $X'$  tj. symetrického rozložení  $+a$  -  $-a$  rozdílů párových hodnot. Jestliže  $p$ -hodnota je menší než hladina významnosti  $\alpha$  (chyba  $\alpha$ ), zamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ . [68] Symbolicky lze použít závěr:

- $p < 0,05$  „statisticky významný rozdíl“ nebo
- $p < 0,01$  „statisticky vysoce významný rozdíl“

Jestliže je p-hodnota větší než hladina významnosti  $\alpha$  (chyba  $\alpha$ ), nulovou hypotézu  $H_0$  nemůžeme zamítnout a tedy předpokládáme, že platí. Symbolicky lze psát:

- $p > 0,05$  („statisticky nevýznamný rozdíl“).

V našem případě byla hodnota  $\alpha$  zvolena standardně 0,05. V případech, kdy výsledek Wilcoxonova testu udával  $p < 0,05$ , byly tyto rozdíly statisticky významné, neboli hodnoty před a po pokusu se liší ve svém rozdělení (tzn. vliv spánkové deprivace byl účinný).

Dále byly analyzovány **Pearsonovy korelační koeficienty** pro zjištění vztahů mezi výsledky jednotlivých metod, zejména pro srovnání hodnot z metody EEG s hodnotami z LVA.

Korelace znamená vzájemný vztah mezi dvěma procesy nebo veličinami. Pokud se jedna z nich mění, mění se korelativně i druhá a naopak. Pokud se mezi dvěma procesy ukáže korelace, je pravděpodobné, že na sobě závisejí, nelze z toho však ještě usoudit, že by jeden z nich musel být příčinou a druhý následkem. Pearsonův korelační koeficient  $r$  je statistický ukazatel síly lineárního vztahu mezi párovými daty. Jedná se o výběrový korelační koeficient. [50]

Výpočty byly realizovány v softwaru IBM SPSS Statistics (v 23.0). Výstupem z funkce *Pearson correlation* je tabulka, obsahující následující hodnoty:

- $r$  – Pearsonův korelační koeficient
- $p$  – p-hodnota (Sig.)
- $N$  – rozsah souboru

		Average_Voice_Energy_SIM2_Mor	Stress_perc_SI M2_Mor	Upset_perc_SI M2_Mor
AF3_delta_SIM2_Mor	Pearson Correlation	0,527	,668*	-0,243
	Sig. (2-tailed)	0,117	0,035	0,498
	N	10	10	10
AF3_theta_SIM2_Mor	Pearson Correlation	0,417	,712*	-0,225
	Sig. (2-tailed)	0,230	0,021	0,533
	N	10	10	10
AF3_alpha_SIM2_Mor	Pearson Correlation	0,345	,680*	-0,246
	Sig. (2-tailed)	0,329	0,030	0,494
	N	10	10	10

Tabulka 5 – Ukázka výstupu analýzy korelací ze software IBM SPSS Statistics; zdroj: vlastní

Ukázka v tabulce 5 prezentuje výstup z analýzy korelace mezi 3 parametry hlasu (Average Voice Energy, Stress % a Upset %) a PSD EEG pro elektrodu AF3 během druhé části simulace (SIM2) v průběhu ranního měření (Mor). Opět se jedná pouze o příklad výstupu ze statistického zpracování, celkové výsledky jsou uvedeny v kapitole 6.3.1.

V našem případě byla hodnota  $\alpha$  zvolena standardně 0,05. V případech, kdy výsledek testu udával  $p < 0,05$ , byly tyto korelace statisticky významné (v software IBM SPSS Statistics označeny příslušné korelační koeficienty jednou hvězdičkou, např. 0,785\*). V případě, kdy  $p < 0,01$ , jsou tyto korelace označeny jako statisticky velmi významné (v software IBM SPSS Statistics označeny příslušné korelační koeficienty dvěma hvězdičkami, např. 0,843\*\*). Hodnota  $r$  vypovídá o síle korelace. Další použití Pearsonova korelačního koeficientu pro analýzu výsledků měření je uvedeno v kapitole 6.3.

#### 5.6.7. Expozice „modrým“ světlem

Pro úplnost popisu experimentu je nutné zmínit rovněž využití brýlí emitujících „modré světlo“, neboli světla s výraznou modrou složkou. Tento aspekt měření byl do experimentu zařazen po dohodě s výzkumníky z Národního ústavu duševního zdraví, kteří se na realizaci experimentu výraznou měrou podíleli, a výsledky využijí pro probíhající zkoumání [99], [97] vlivu modrého světla na bdělost ve chvílích, kdy je jedinec vystavený modrému světlu odpočatý a ve chvílích spánkové deprivace. Využilo se tak výhod reálných podmínek pro výzkum další oblasti nad rámec této disertační práce.



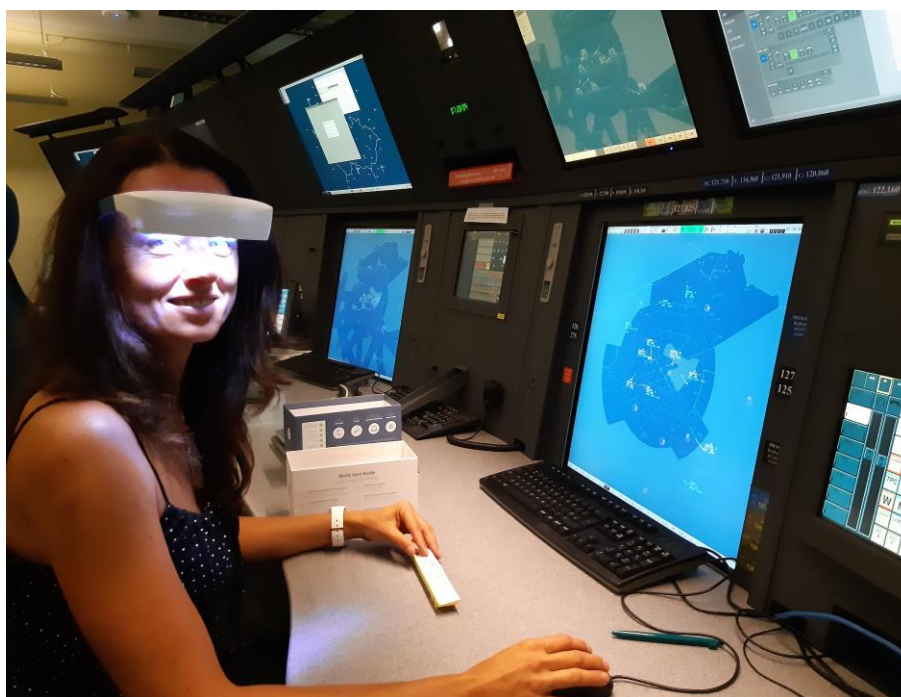
Obrázek 8 – Brýle Luminette; zdroj: vlastní

Ve druhé fázi měření, tzn. od ukončení druhé úlohy Oddball až do konce experimentu tak bylo pro ověření vlivu „modrého“ na bdělost účastníků využito brýlí emitujících výraznou modrou složku světla – Luminette. Druhá fáze měření tak vždy (během večerního i ranního měření) proběhla při použití těchto brýlí.

Cílem bylo sledovat vliv tohoto modrého světla na bdělost/únavu. Tento vliv by mohl být tudíž patrný v rozdílech mezi:

- subjektivním pocitem ospalosti uprostřed a na konci měření, tzn. hodnotami KSS2/KSS3,
- reakčními časy v druhých a třetích úlohách PVT a Oddball (PVT2/PVT3 a ODD2/ODD3),
- PSD EEG v částech experimentu bez modrého světla a ve fázích s nasazenými brýlemi.

Vyhodnocování vlivu expozice „modrým“ světlem však nebylo cílem této práce, pouze se využilo příležitosti, kdy byl tento experiment realizován, a bylo tak možné ověřit i další hypotézy plynoucí z jiných výzkumů. Pro ŘLP ČR, s. p. budou navíc výsledky tohoto vlivu „modrého“ světla na bdělost rovněž zajímavé a to z pohledu, zda by se modré světlo mohlo využít pro eliminaci spánkové opilosti během nočních směn apod.



Obrázek 9 – Použití brýlí Luminette; zdroj: vlastní

## 5.7. Hypotézy

S ohledem na výše uvedené byly stanoveny hypotézy celého výzkumu. Jako základní hypotéza bylo stanoveno, že úroveň bdělosti/únavy se bude lišit během večerního a ranního měření – konkrétně, že únava během ranního měření bude výrazně vyšší. Tato hypotéza je zřejmá z pohledu narušení cirkadiánního rytmu účastníků měření tím, že se jedná o absenci spánku v době, kdy je to pro organismus fyziologicky přirozené, a navíc šlo o druhou noční směnu v řadě a tudíž efekt nedostatku spánku je umocněn.

V datech získaných měřeními by se tato základní hypotéza měla projevit:

- vyšším reakčním časem v úlohách PVT a Oddball,
- vyšší chybovost v úloze Oddball,
- vyšší skóre uvedené v KSS,
- vyšší spektrální síla v EEG pásmu delta,
- nižší spektrální síla v EEG pásmech beta a gamma,
- nižší skóre v hlasových parametrech LVA nazvaných „Average Voice Energy“ a zároveň vyšší skóre v parametru nazvaném „Stress%“.

Prvních 5 odrážek plyne ze závěrů provedených vědeckých studií (jejichž rešerše je součástí předchozích kapitol), poslední odrážka plyne z předpokladů uvedených zástupci společnosti ANIS Group na základě jejich zkušenosti s využíváním LVA a rovněž ze závěrů pilotního měření na Letecké škole (viz kapitola 5.1.1)

Dále považujeme za zásadní určit vztah mezi parametry hlasové analýzy a parametry již ověřených metod detekce únavy, proto očekáváme pozitivní korelace mezi výkonovými spektry EEG a vybranými parametry hlasu. Vzhledem k doporučením výrobce softwaru LVA očekáváme pozitivní korelaci mezi EEG aktivitou v pásmech beta a gamma a hlasovými parametry s názvem „Average Voice Energy“ a „Stress%“.



## 6. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Tato kapitola shrnuje výsledky ze všech v experimentu použitých metod pro identifikaci rozdílů mezi stavem bdělosti (před směnou) a únavy (po noční směně), které jsou popsány v předchozích kapitolách. Nejprve jsou popsána vlastní naměřená data, na základě těchto dat jsou formulovány pro jednotlivé metody dílčí závěry a v dalších kapitolách jsou tyto závěry interpretovány v souvislostech a jsou diskutovány závěry experimentu.

### 6.1. Výsledky

#### 6.1.1. Chronotypy

	MEQ Score	Type
Proband 1	67	Moderately Morning Type
Proband 2	35	Moderately Evening Type
Proband 3	54	Neither Type
Proband 4	57	Neither Type
Proband 5	61	Moderately Morning Type
Proband 6	35	Moderately Evening Type
Proband 7	54	Neither Type
Proband 8	64	Moderately Morning Type
Proband 9	35	Moderately Evening Type
Proband 10	70	Definitely Morning Type

Tabulka 6 – Chronotypy probandů; zdroj: vlastní

**Shrnutí:** Výzkumu se zúčastnilo 10 probandů, z nichž u 3 není vyhraněný chronotyp, 4 jsou ranní typ (1 z nich zcela vyhraněný) a 3 večerní typ. Rozložení chronotypů je rovnoměrné (s ohledem na počet probandů), nepřevládá ani jeden z extrémních typů.

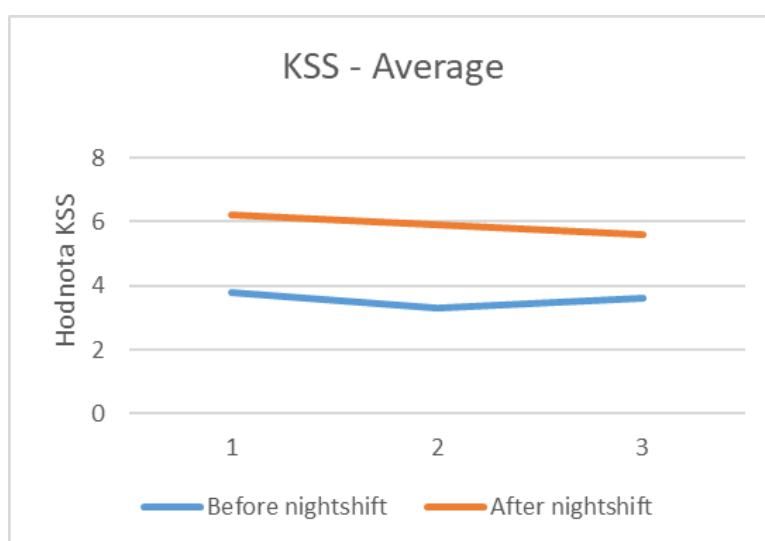
#### 6.1.2. Subjektivní pocit ospalosti – KSS

Jak bylo uvedeno v kapitolách popisujících použité metody (viz kapitola 5.6.1) a průběh experimentu (viz kapitola 5.2), subjektivní pocit ospalosti byl sledován ve třech časových bodech – před započítáním experimentu, po první části simulace a po jejím skončení (v tabulce níže se jedná o sloupce 1, 2 a 3). Toto proběhlo před noční směnou (sloupec „Before nightshift“) i po noční směně (sloupec „After nightshift“). Pro další statistické vyhodnocení byly spočítány průměry, v tabulce byly identifikovány extrémní hodnoty (extrémní bdělost – **hodnoty 1 a 2**; extrémní

únava – hodnoty 8 a 9) a byl uveden rovněž výsledek MEQ pro určení souvislosti mezi subjektivním pocitem ospalosti a chronotypem daného jedince.

	MEQ	KSS						MEQ
		Before nightshift (EVE)			After nightshift (MOR)			
		1	2	3	1	2	3	
Proband 1	67	6	6	6	7	7	7	Moderately Morning Type
Proband 2	35	4	3	3	8	6	5	Moderately Evening Type
Proband 3	54	3	2	1	4	3	2	Neither Type
Proband 4	57	4	3	3	6	6	6	Neither Type
Proband 5	61	6	6	5	6	6	6	Moderately Morning Type
Proband 6	35	2	2	2	5	5	6	Moderately Evening Type
Proband 7	54	2	2	3	6	5	6	Neither Type
Proband 8	64	4	3	3	7	8	7	Moderately Morning Type
Proband 9	35	5	3	7	9	9	8	Moderately Evening Type
Proband 10	70	2	3	3	4	4	3	Definitely Morning Type
Average	-	3,8	3,3	3,6	6,2	5,9	5,6	

Tabulka 7 – Hodnoty subjektivního pocitu ospalosti probandů; zdroj: vlastní



Graf 1 – Průměrné hodnoty subjektivního pocitu ospalosti; zdroj: vlastní

**Interpretace:** V subjektivním hodnocení ospalosti pomocí škály KSS je patrný výrazný rozdíl mezi večerním a ranním měřením, přičemž večerní měření ve všech třech fázích (3,8; 3,3; 3,6) je o cca 2,5 stupně nižší než při měření po absolvování noční směny (6,2; 5,9; 5,6). Je zřejmé, že subjektivně se probandi po noční směně cítili výrazně unavenější. Večerní průměrné hodnoty odpovídají zhruba stupni „alert/fairly alert“, což odpovídá předpokladu, že na noční směnu nastupují odpočatí, po noční směně pak v průměru výsledek odpovídá stupni

„some signs of sleepiness“ a potvrzuje se hypotéza vyšší únavy po absolvování noční směny.

**Extrémní hodnoty:** V několika případech probandi zvolili pro určení aktuální míry subjektivního pocitu ospalosti extrémní hodnoty:

- 9 (*very sleepy, great effort to keep awake, fighting sleep*) – proband 9 (výrazný večerní typ) během měření po noční směně, v poslední fázi uvedl „zlepšení“ na hodnotu 8. Toto zlepšení je možné považovat za efekt expozice modrého světla.
- 8 (*very sleepy, some effort to keep awake*) – proband 2 v první fázi měření po noční směně, v dalších fázích se však jeho pocit ospalosti snižoval na hodnoty 6 a 5; a proband 8, který hodnotu 8 uvedl po noční směně v čase mezi simulacemi. I zde je možné uvažovat pozitivní vliv modrého světla případně odeznění efektu spánkové opilosti.
- 1 (*extremely alert*) – proband 3 zvolil tuto hodnotu před noční směnou v poslední fázi měření, je možno přisuzovat i vlivu modrého světla (hodnoty v předchozích dvou časových bodech byly 3 a 2).
- 2 (*very alert*) – ve více případech u probandů 3, 6, 7 a 10 před noční směnou a v jednom případě dokonce u probanda po noční směně (opět v poslední fázi měření, tudíž je opět možný vliv modrého světla).

**Ve vztahu ke chronotypu** (výsledky MEQ) byly sledovány zejména extrémní hodnoty:

- Hodnoty 8 a 9 uvedli probandi, jejichž výsledek MEQ odpovídá spíše „večerním“ typům.
- Hodnoty 1 a 2 uvedli jak probandi odpovídající „večernímu“, tak „rannímu“ typu a rovněž nevyhraněný typ.
- Největší rozdíl mezi večerním a ranním měřením:
  - Výrazně vyšší pocit ospalosti po nočním směně oproti stavu před směnou uvedli probandi 2, 6 a 9 – večerní chronotypy, avšak v jednom případě i ranní typ (proband 8).

Statická významnost byla sledována pomocí Wilcoxonova testu. U všech sledovaných párů byla nalezena statistická významnost s následujícími výsledky:

- KSS1\_EVE a KSS1\_MOR ( $Z = -2,682^b$ ,  $p = 0.007$ )
- KSS2\_EVE a KSS2\_MOR ( $Z = -2,699^b$ ,  $p = 0.007$ )

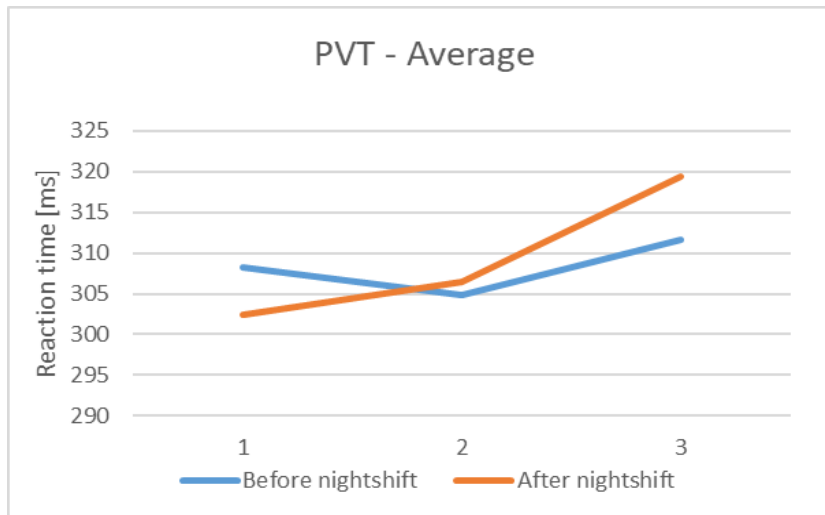
- KSS3\_EVE a KSS3\_MOR ( $Z = -2,694^b$ ,  $p = 0.007$ )

### 6.1.3. Reakční čas – PVT

Další použitou metodou bylo sledování reakčního času na vizuální podnět (viz kapitola 5.6.2). Hodnoty v tabulce jsou průměrné reakční časy (na základě reakce na 20 stimulů během jednoho testu) pro každý časový okamžik (stejně jako u KSS byl test prováděn ve třech časových bodech – před započítáním experimentu, po první části simulace a po jejím skončení (v tabulce níže se jedná o sloupce 1, 2 a 3). Toto proběhlo před noční směnou (sloupec „Before nightshift“) i po noční směně (sloupec „After nightshift“). Pro další statistické vyhodnocení byly spočítány průměry, v tabulce byly identifikovány extrémní hodnoty (hodnoty pod 300 ms a nad 400 ms), byly spočítány rozdíly mezi večerními a ranními průměry a byl uveden rovněž výsledek MEQ pro určení souvislostí mezi reakčním časem a chronotypem daného jedince.

	MEQ	PVT [ms]						MEQ
	Score	Before nightshift (EVE)			After nightshift (MOR)			
		1	2	3	1	2	3	
Proband 1	67	326	338	332	324	287	290	Moderately Morning Type
Proband 2	35	410	404	398	304	333	344	Moderately Evening Type
Proband 3	54	267	268	294	277	279	305	Neither Type
Proband 4	57	325	327	312	282	282	298	Neither Type
Proband 5	61	307	290	335	295	292	301	Moderately Morning Type
Proband 6	35	271	292	282	281	299	321	Moderately Evening Type
Proband 7	54	301	284	304	302	297	322	Neither Type
Proband 8	64	342	313	298	380	406	408	Moderately Morning Type
Proband 9	35	276	267	293	319	334	329	Moderately Evening Type
Proband 10	70	258	266	268	260	256	276	Definitely Morning Type
Average	-	308,3	304,9	311,6	302,4	306,5	319,4	
Differences	-	-	-	-	-5,9	1,6	7,8	

Tabulka 8 – Hodnoty reakčních časů probandů při PVT; zdroj: vlastní

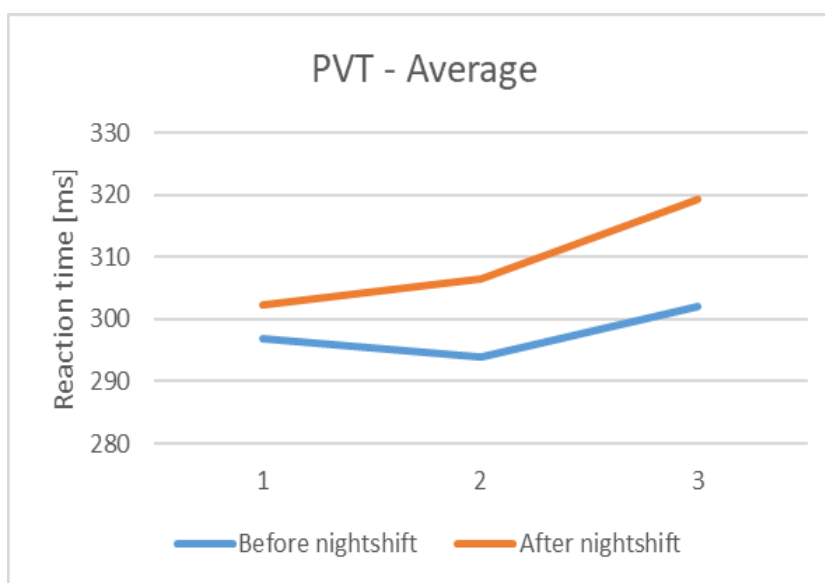


Graf 2 – Průměrné hodnoty reakčního času při PVT (všichni probandi); zdroj: vlastní

**Interpretace:** Vzhledem k tomu, že data probanda 2 se výrazně odlišovala od ostatních (hodnoty reakčního času byly výrazně vyšší během večerního měření oproti rannímu, což odporovalo základnímu předpokladu), byla zjišťována příčina. Na základě údajů uvedených v záznamech z jednotlivých měření bylo zjištěno, že během večerního měření s probandem 2 bylo pro psychologické testy využito jiného notebooku než u ostatních měření a data byla pravděpodobně tímto ovlivněna – mohlo se jednat o vyšší odezvu na klávesnici použitého notebooku. Vzhledem k tomu, že při ranním měření již bylo využito standardního notebooku použitého při všech ostatních měřeních, byla večerní data zatížena výraznou chybou, a proto byla z dalšího zpracování vyňata. Po odstranění dat z tohoto měření (večerní u probanda 2) vykazují výsledky následující závěry.

Souvislost s KSS:

- Proband 8 a 9 měli výrazné zhoršení u RT a zároveň uváděli výrazné zhoršení bdělosti podle KSS.
- Vzhledem k množství dat není možné určit další závěry týkající se souvislosti KSS a reakčního času.



Graf 3 – Průměrné hodnoty reakčního času při PVT (bez dat probanda 2); zdroj: vlastní

**Shrnutí:** Průměrný reakční čas je vyšší po noční směně než před noční směnou a rozdíly rostly při každé fázi měření. Zatímco při prvním testu byl rozdíl v průměrných reakčních časech mezi večerním a ranním měření cca 5,4 ms; v druhé fázi již 12,6 ms a při závěrečném testu se rozdíl mezi večerními a ranními průměrnými časy dostal až na 17,4 ms. Je z toho patrný výrazný nárůst únavy i v průběhu ranního měření, které následovalo po druhé noční směně. Zatímco při večerním měření je patrné mírné zrychlení reakcí (nižší reakční čas) mezi testem 1 a 2, při ranním měření už dochází k nárůstu reakčního času s každým dalším testem.

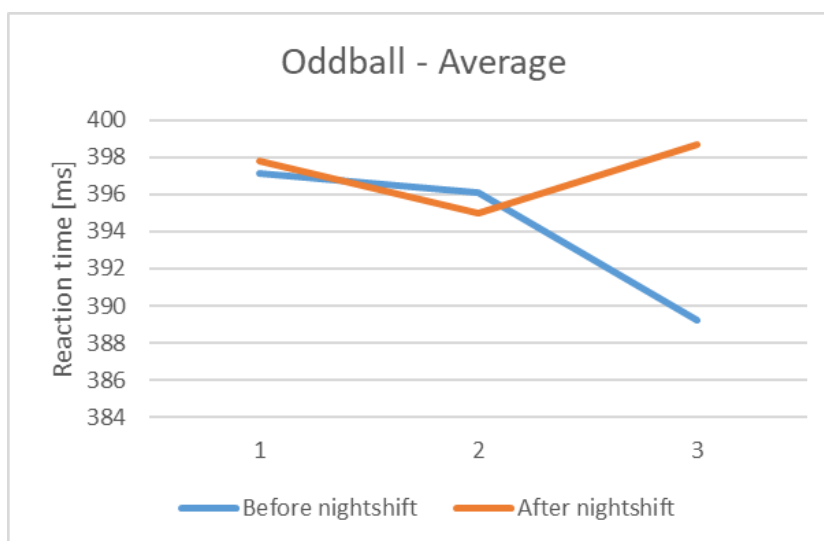
Žádný z párů však nebyl při použití párového srovnání vyhodnocen jako statisticky významný.

#### 6.1.4. Reakční čas – Oddball

Stejně jako u úlohy PVT byl reakční čas sledován u druhé úlohy – Oddball. V tabulce byly zvýrazněny hodnoty **pod 350 ms** a **nad 400 ms**. Bohužel chybí data z úlohy Oddball u probanda 1 během ranního měření – vlivem chybného nastavení parametrů úlohy nedošlo k uložení výsledků z tohoto měření (včetně chybovosti). Tato data nebylo možné zpětně dohledat.

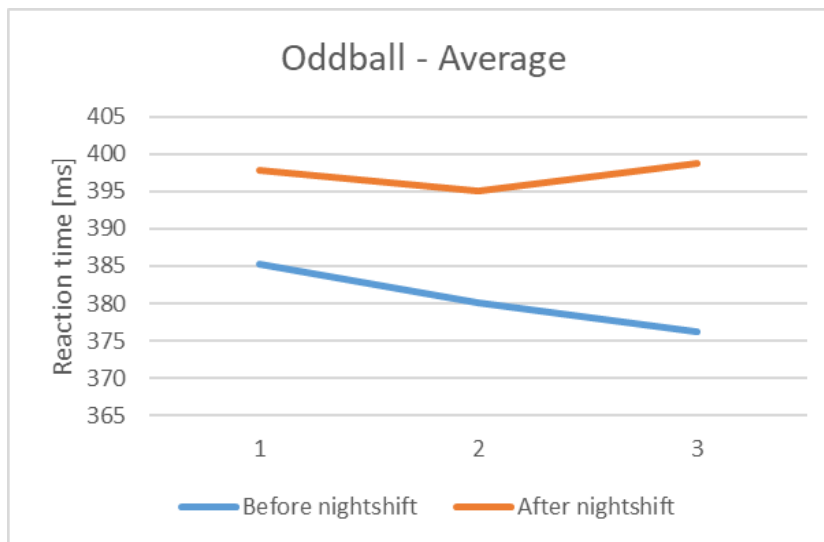
	MEQ	ODD [ms]						MEQ
	Score	Before nightshift (EVE)			After nightshift (MOR)			
		1	2	3	1	2	3	
<b>Proband 1</b>	67	403	351	371				Moderately Morning Type
<b>Proband 2</b>	35	503	541	506	437	417	405	Moderately Evening Type
<b>Proband 3</b>	54	329	327	332	392	350	353	Neither Type
<b>Proband 4</b>	57	406	385	401	353	384	411	Neither Type
<b>Proband 5</b>	61	435	386	425	422	425	441	Moderately Morning Type
<b>Proband 6</b>	35	401	424	379	376	417	440	Moderately Evening Type
<b>Proband 7</b>	54	368	407	352	359	364	359	Neither Type
<b>Proband 8</b>	64	334	351	357	375	403	397	Moderately Morning Type
<b>Proband 9</b>	35	404	403	369	448	417	417	Moderately Evening Type
<b>Proband 10</b>	70	388	386	400	418	378	365	Definitely Morning Type
<b>Average</b>	-	<b>397,1</b>	<b>396,1</b>	<b>389,2</b>	<b>397,8</b>	<b>395,0</b>	<b>398,7</b>	
<b>Differences</b>	-	-	-	-	<b>0,7</b>	<b>-1,1</b>	<b>9,5</b>	

Tabulka 9 – Hodnoty reakčních časů probandů při Odball task; zdroj: vlastní



Graf 4 – Průměrné hodnoty reakčního času při Oddball task (všichni probandi) ; zdroj: vlastní

**Interpretace:** Stejně jako u testu PVT vzhledem k tomu, že během večerního měření s probandem 2 bylo pro psychologické testy využito jiného notebooku než u ostatních měření, byla večerní data zatížena výraznou chybou, a proto byla z dalšího zpracování vyňata. Po odstranění dat z tohoto měření (večerní u probanda 2) vykazují výsledky následující závěry.



Graf 5 – Průměrné hodnoty reakčního času při Oddball task (bez dat probanda 2); zdroj: vlastní

**Shrnutí:** Průměrný reakční čas je vyšší po noční směně než před noční směnou a rozdíly rostly při každé fázi měření. Zatímco při prvním testu byl rozdíl v průměrných reakčních časech mezi večerním a ranním měření cca 12,4 ms; v druhé fázi již 15,0 ms a při závěrečném testu se rozdíl mezi večerními a ranními průměrnými časy dostal až na 22,4 ms. Zatímco při večerním měření je patrné mírné zrychlení reakcí (nižší reakční čas) v průběhu celého měření (od průměrné hodnoty reakčního času při prvním testu Oddball 385,3 ms, přes 380,0 ms při druhém testu po 376,2 ms při závěrečném testu), při ranním měření dochází k mírnému poklesu reakčního času mezi testem 1 a 2 (hodnoty reakčních časů 397,8 ms a 395,0 ms), při závěrečném testu již opět dochází k nárůstu (398,7 ms).

Reakční časy obecně vyšší než u PVT, protože se jednalo o náročnější úkol než u PVT. Test Oddball navíc obsahuje složku rozhodování, což zvyšuje náročnost testu.

**Žádný z párů však nebyl při použití párového srovnání vyhodnocen jako statisticky významný.**

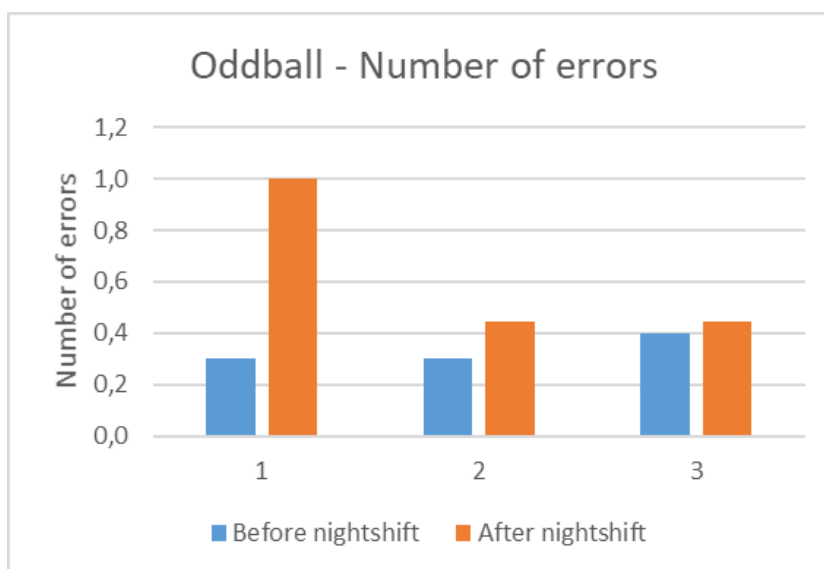
### 6.1.5. Chybovost – Oddball

Úloha Oddball kromě reakčního času sleduje rovněž chybovost reakcí (viz kapitola 5.6.3). Tabulka níže shrnuje počet chyb, které jednotliví probandi během úlohy provedli (z celkových 20 podnětů). Zvýrazněny jsou v tabulce pouze případy, kdy probandi chybovali **dvakrát a vícekrát**.



	MEQ	ODD_ER						MEQ
	Score	Before nightshift (EVE)			After nightshift (MOR)			
		1	2	3	1	2	3	
Proband 1	67	1	0	0				Moderately Morning Type
Proband 2	35	1	0	0	1	2	0	Moderately Evening Type
Proband 3	54	0	0	1	1	0	0	Neither Type
Proband 4	57	0	1	1	2	1	0	Neither Type
Proband 5	61	0	0	0	0	0	0	Moderately Morning Type
Proband 6	35	0	0	0	1	0	0	Moderately Evening Type
Proband 7	54	0	0	0	0	1	1	Neither Type
Proband 8	64	0	1	1	1	0	2	Moderately Morning Type
Proband 9	35	0	1	1	2	0	1	Moderately Evening Type
Proband 10	70	1	0	0	1	0	0	Definitely Morning Type
Average	-	0,3	0,3	0,4	1,0	0,4	0,4	

Tabulka 10 – Chybovost probandů při Oddball task; zdroj: vlastní



Graf 6 – Průměrná chybovost u Oddball task; zdroj: vlastní

**Interpretace:** Nejvyšší počet chyb byl 2 a to u 4 probandů po noční směně. Ani jednou žádný proband neudělal 2 chyby před noční směnou. Celkově vyšší průměr chybovosti po noční směně a zejména v první fázi měření, což je možné přisuzovat vlivu nácviku – s každým dalším testem si již proband více zvykl na pravidla testu.

Statická významnost byla sledována pomocí Wilcoxonova testu. U následujícího páru byla nalezena statistická významnost:

- ODD1\_ER\_Eve a ODD1\_ER\_Mor ( $Z = -2.070^b$ ,  $p = 0.038$ ).

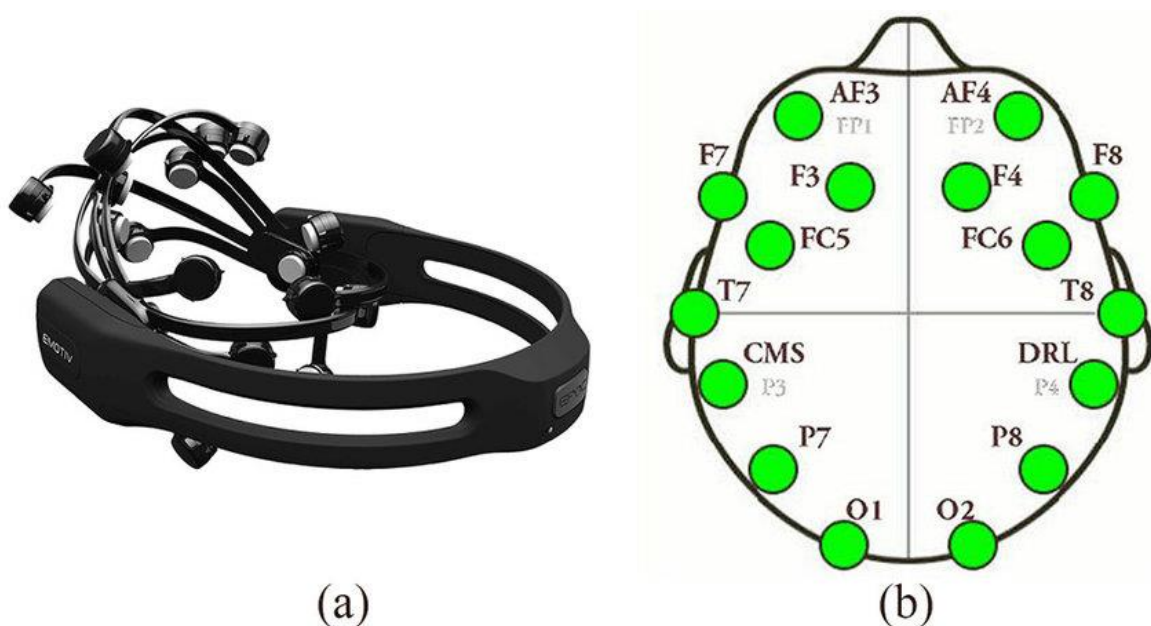
## 6.1.6. EEG

EEG bylo zaznamenáváno v průběhu celého experimentu, tzn. během provádění kognitivních testů i během simulace. Data z EEG byla následně zpracována (viz kapitola 5.6.4) pro všech 6 pásem (delta, theta, alpha, beta1, beta2 a gamma) a pro všech 14 elektrod (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4). Celkově se tak jednalo o 14 (elektrod) x 6 (pásem) x 2 (večerní/ranní měření) x 8 (3 úlohy PVT + 3 úlohy Oddball + 2 fáze SIMU) = 1344 hodnot EEG PSD pro jednoho probanda.

Pro názornost je uveden příklad získaných hodnot PSD EEG (v jednotkách  $\mu V^2/Hz$ ) pro elektrodu AF3 v pásmu beta1. Všechna data byla zpracována do podoby kontingenční tabulky pro umožnění dalších analýz, sledování trendů v jednotlivých fázích, elektrodách, pásmech či u jednotlivých probandů.

	AF3 - beta1																	
	Before nightshift									After nightshift								
	PVT			Oddball			SIMU			PVT			Oddball			SIMU		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
Proband 1	4,87	8,17	9,99	4,87	8,17	9,99	10,97	5,29	2,96	4,36	11,97	2,96	4,36	11,97	4,57	5,09		
Proband 2	3,31	4,35	6,51	3,25	3,81	4,51	4,48	7,45	4,79	4,32	4,31	4,97	4,34	3,89	3,95	4,06		
Proband 3	22,65	37,16	28,59	42,09	22,61	40,41	13,20	13,75	2,10	3,03	5,28	2,24	2,55	4,87	3,15	5,27		
Proband 4	5,57	4,10	4,56	4,30	3,23	4,21	6,02	5,25	2,79	2,72	2,71	2,61	2,66	3,26	3,03	3,75		
Proband 5	3,42	4,05	3,59	3,54	3,85	3,73	3,91	3,40	3,04	3,67	4,95	2,94	3,37	3,33	4,43	3,80		
Proband 6	4,48	21,10	15,13	19,51	18,73	5,26	20,74	11,63	8,36	34,76	3,36	5,57	12,36	3,42	19,51	2,86		
Proband 7	2,10	3,79	4,12	2,08	3,59	4,89	3,31	3,54	2,41	3,80	12,98	3,11	4,29	10,14	3,34	2,46		
Proband 8	26,95	11,03	30,12	15,70	61,94	108,52	21,84	23,36	6,18	7,44	5,86	6,28	22,66	5,66	9,24	5,82		
Proband 9	14,04	9,76	6,74	7,03	7,10	9,98	7,14	9,45	6,86	3,93	4,34	5,36	2,95	3,66	4,94	3,68		
Proband 10	5,11	3,74	7,63	4,81	4,20	5,99	6,81	6,38	4,00	3,80	3,39	4,56	3,70	4,66	7,86	3,76		
Average	9,25	10,73	11,70	10,72	13,72	19,75	9,84	8,95	4,35	7,18	5,92	4,06	6,32	5,49	6,40	4,05		

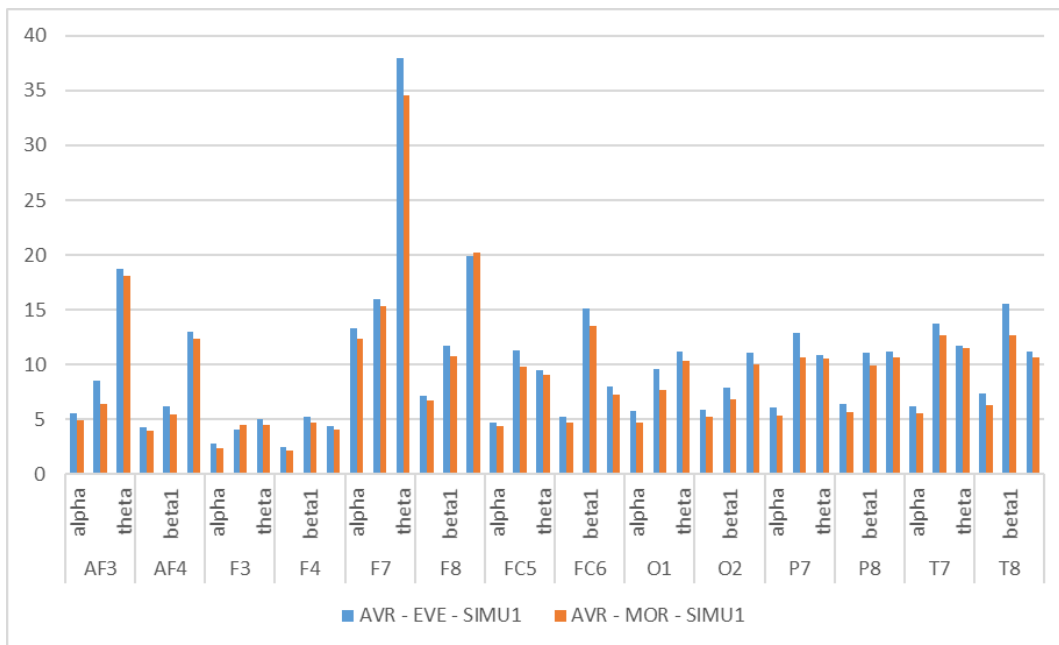
Tabulka 11 – Příklad hodnot PSD EEG pro elektrodu AF3 v pásmu beta 1; zdroj: vlastní



Obrázek 10 – Umístění elektrod mobilního EEG Emotiv; zdroj: [94]

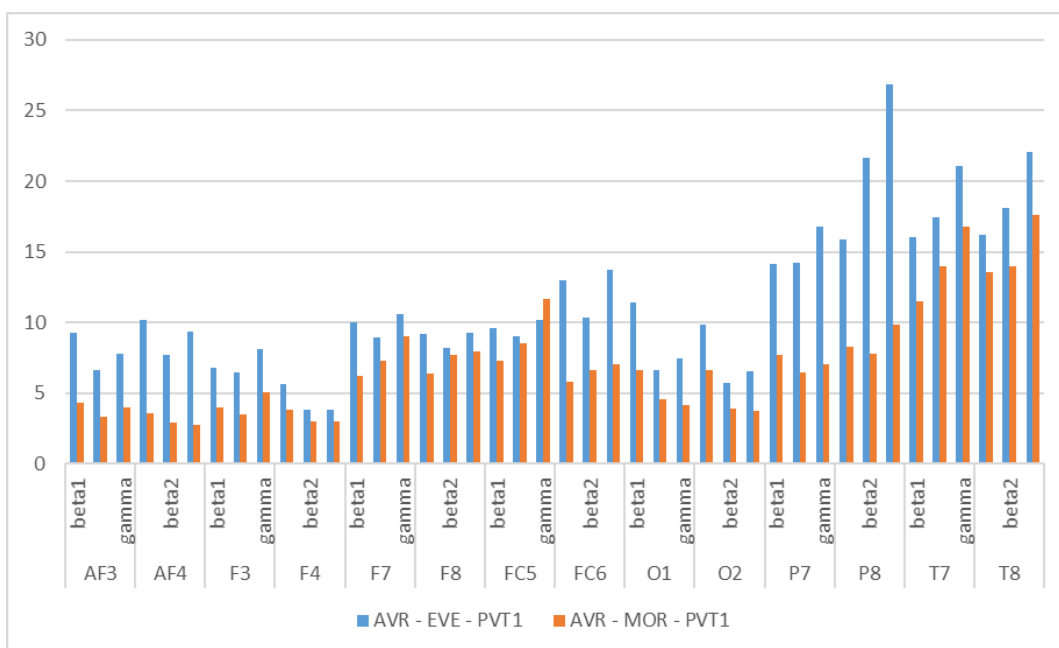
Byly analyzovány trendy v EEG aktivitě a rozdíly mezi večerním a ranním měřením, přičemž hlavní závěry je možné shrnout v následujících bodech:

- Byl zaznamenán globální pokles EEG aktivity v pásmech theta/alfa/beta 1 při cvičení na simulátoru.



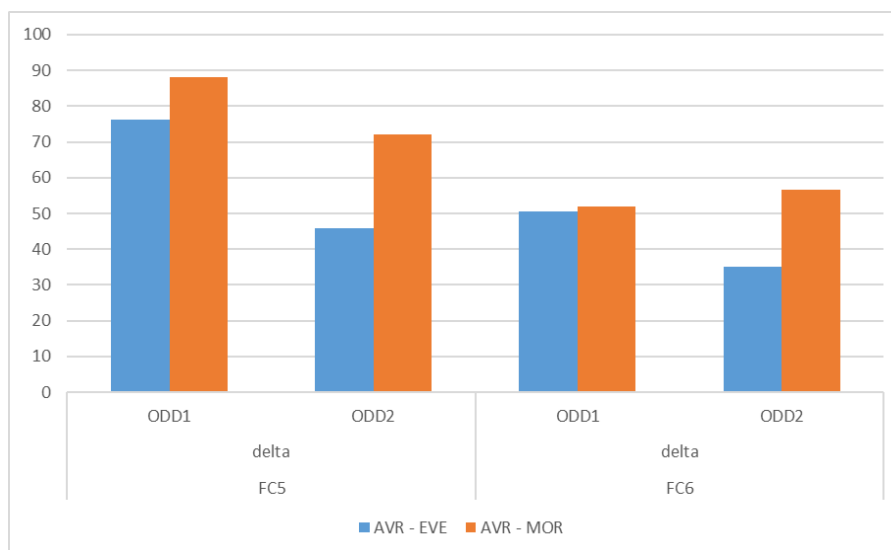
Graf 7 – Průměrné hodnoty EEG aktivity [ $\mu V^2/Hz$ ] v pásmech theta/alfa/beta 1 při cvičení na simulátoru; zdroj: vlastní

- Byl zaznamenán globální pokles EEG aktivity v pásmech beta1/beta2/gamma při kognitivních testech.



Graf 8 – Průměrné hodnoty EEG aktivity [ $\mu V^2/Hz$ ] v pásmech beta1/beta2/gamma při kognitivních testech; zdroj: vlastní

- Nárůst byl zaznamenán zejména u delta aktivity ve frontocentrální oblasti (FC5) – možný indikátor nastupujícího spánku v ranním měření.



Graf 9 – Průměrné hodnoty EEG aktivity v pásmu delta elektrod FC5 a FC6 při kognitivních testech; zdroj: vlastní

- Během simulace byl zaznamenán větší pokles aktivity v temporálních/parietálních oblastech (odpovídají oblastem zodpovědným za zpracování zvukových stimulů/řeči) a frontocentrálních oblastech (exekutivní funkce).
- Během kognitivních testů byl zaznamenán výraznější pokles aktivity v okcipitálních oblastech (vizuální stimuly).

Stejně jako u předchozích metod byly hodnoty EEG PSD z večerního a ranního měření porovnány pomocí Wilcoxonova testu. Bylo nalezeno 81 statisticky významných párů ( $p < 0,05$ ), které jsou společně s výsledky Wilcoxonova testu (hodnota testové statistiky  $Z$ ) uvedeny v následujících tabulkách. První tabulka shrnuje výsledky získané během kognitivních testů (PVT1-3 a ODD1-3). Ve druhé tabulce jsou uvedeny statisticky významné rozdíly v EEG zaznamenané během simulace (SIM1 a SIM2).

Jak bylo již uvedeno výše, byl pozorován globální pokles EEG PSD, jelikož 80 z těchto rozdílů naznačuje pokles PSD na všech elektrodách (s výjimkou F3 a F4) a výkonových pásmech (od delty po gamma).

Pokud jde o pásmo delta, byl pozorován významný pokles výkonu EEG na elektrodách F7, P7, T8 a FC6, zatímco nárůst výkonu delta byl pozorován na elektrodě FC5 během kognitivních úkolů.

**Pokles energie pásma theta** byl pozorován v elektrodách O1, P8 a T8 během kognitivní zátěže a na elektrodách P7, O1, O2, P8, T8 a FC6 během simulace.

**Pokles energie v pásmu alfa** byl pozorován během kognitivního zatížení na místech AF3, P7 a T7 a na elektrodách AF3, T7, P7, O1, P8, T8 a FC6 během simulace.

**Pokles v pásmu beta 1** byl také pozorován na místech AF3, T7, P7, O1, P8 a T8 během kognitivních úkolů a na elektrodách AF3, T7, P7, O1, P8, T8, FC6 během simulace.

**Pokles v pásmu beta 2** byl pozorován na místech AF3, P7, O1, O2, P8, FC6 během kognitivních úkolů a AF3, P7, T8, FC6 během simulace.

**Pokles pásma gamma** byl pozorován u elektrod AF3, AF4, P7, O1, O2 a P8 během kognitivních úkolů a AF3 a P7 během simulace.

Jediným případem, kdy bylo zjištěno zvýšení PSD, bylo delta pásmo pro elektrodu FC5 během realizace úlohy Oddball.

Z kvantitativního pohledu nejvyšší počet elektrod zaznamenal významný pokles PSD v pásmech theta, alfa a beta 1 během období simulace a pásmu beta 1, beta 2 a gama během kognitivní zátěže.

	Phase	Delta	Theta	Alpha	Beta1	Beta2	Gamma
<b>AF3</b>	<b>COG</b>	-	-	PVT2 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0.013)	ODD2 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047)	PVT2 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0.009) PVT3 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022) ODD2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037)	PVT2 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028)
<b>F7</b>	<b>COG</b>	PVT1 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037)	-	-	-	-	-
<b>F3</b>	<b>COG</b>	-	-	-	-	-	-
<b>FC5</b>	<b>COG</b>	* ODD2 (Z=-2,090 <sup>b</sup> , p=0.037)	-	-	-	-	-
<b>T7</b>	<b>COG</b>	-	-	PTV2 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0.013) PVT3 (Z=-2,701 <sup>d</sup> , p=0.007)	PVT3 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022)	-	-

<b>P7</b>	<b>COG</b>	-	-	PVT2 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0.009)	PVT1 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022) PVT3 (Z=-2,803 <sup>d</sup> , p=0.005) ODD3 (Z=-2,803 <sup>d</sup> , p=0.005)	PVT1 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022) PVT2 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0.009)	PVT1 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022)
<b>O1</b>	<b>COG</b>	-	PVT3 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037)	-	PVT3 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028) ODD2 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047) ODD3 (Z=-2,701 <sup>d</sup> , p=0.007)	PVT1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047) PTV2 (Z=-2,395 <sup>d</sup> , p=0.017) PVT3 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0.013) ODD2 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0.013) ODD3 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022)	PVT1 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028) PTV2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037) PVT3 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028) ODD3 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047)
<b>O2</b>	<b>COG</b>	-	-	-	-	PVT3 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028) ODD3 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047)	PVT3 (Z=-2,395 <sup>d</sup> , p=0.017)
<b>P8</b>	<b>COG</b>	-	ODD3 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0.009)	-	PVT3 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028)	PVT1 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028)	PVT1 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037)
<b>T8</b>	<b>COG</b>	-	PVT2 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028)	-	ODD2 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0.013) ODD3 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0.009)	-	-
<b>FC6</b>	<b>COG</b>	-	-	-	-	PVT3 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0.028)	-
<b>F4</b>	<b>COG</b>	-	-	-	-	-	-
<b>F8</b>	<b>COG</b>	-	-	-	-	-	-
<b>AF4</b>	<b>COG</b>	-	-	-	-	-	PVT3 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037) ODD1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047)
<b>SUM</b>	<b>COG</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>10</b>

\* označuje nárůst v PSD – v ostatních případech jde o pokles.

Tabulka 12 – Statisticky významné rozdíly v hodnotách EEG PSD během kog. testů; zdroj: vlastní

	Phase	Delta	Theta	Alpha	Beta1	Beta2	Gamma
<b>AF3</b>	<b>SIM</b>	-	-	SIM1 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0.022) SIM2 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047)	SIM1 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037) SIM2 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0.009)	SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0.037)	SIM2 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0.047)
<b>F7</b>	<b>SIM</b>	-	-	-	-	-	-
<b>F3</b>	<b>SIM</b>	-	-	-	-	-	-
<b>FC5</b>	<b>SIM</b>	-	-	-	-	-	-
<b>T7</b>	<b>SIM</b>	-	-	SIM1 (Z=-2,395 <sup>d</sup> , p=0,017)	SIM1 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	-	-
<b>P7</b>	<b>SIM</b>	SIM2 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0,028)	SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	SIM1 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0,009) SIM2 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047)	SIM1 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0,013)	SIM1 (Z=-2,599 <sup>d</sup> , p=0,009)	SIM1 (Z=-2,395 <sup>d</sup> , p=0,017)
<b>O1</b>	<b>SIM</b>	-	SIM2 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047)	SIM1 (Z=-2,395 <sup>d</sup> , p=0,017)	SIM1 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0,028) SIM2 (Z=-2,395 <sup>d</sup> , p=0,017)	-	-
<b>O2</b>	<b>SIM</b>	-	SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	SIM1 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	-	-	-
<b>P8</b>	<b>SIM</b>	-	SIM2 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0,013)	SIM1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047) SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	-	-
<b>T8</b>	<b>SIM</b>	SIM1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047)	SIM2 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0,028)	SIM2 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0,028)	SIM1 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0,028)	SIM1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047)	-
<b>FC6</b>	<b>SIM</b>	SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	SIM2 (Z=-2,293 <sup>d</sup> , p=0,022)	SIM1 (Z=-2,497 <sup>d</sup> , p=0,013) SIM2 (Z=-2,191 <sup>d</sup> , p=0,028)	SIM1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047) SIM2 (Z=-2,090 <sup>d</sup> , p=0,037)	SIM1 (Z=-1,988 <sup>d</sup> , p=0,047)	-
<b>F4</b>	<b>SIM</b>	-	-	-	-	-	-
<b>F8</b>	<b>SIM</b>	-	-	-	-	-	-
<b>AF4</b>	<b>SIM</b>	-	-	-	-	-	-
<b>SUM</b>	<b>SIM</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

Tabulka 13 – Statisticky významné rozdíly v hodnotách EEG PSD během simulací; zdroj: vlastní

### 6.1.7. LVA

V průběhu simulací byl zaznamenáván hlas, jehož analýzou pomocí LVA (viz kapitola 5.4.3) bylo sledováno 10 parametrů hlasu označených jako:

- Average Voice Energy
- Stress %
- Upset %
- Energy Level
- Uneasy Level
- Stress Level
- Thinking Level
- Confidence
- Concentration
- Anticipation

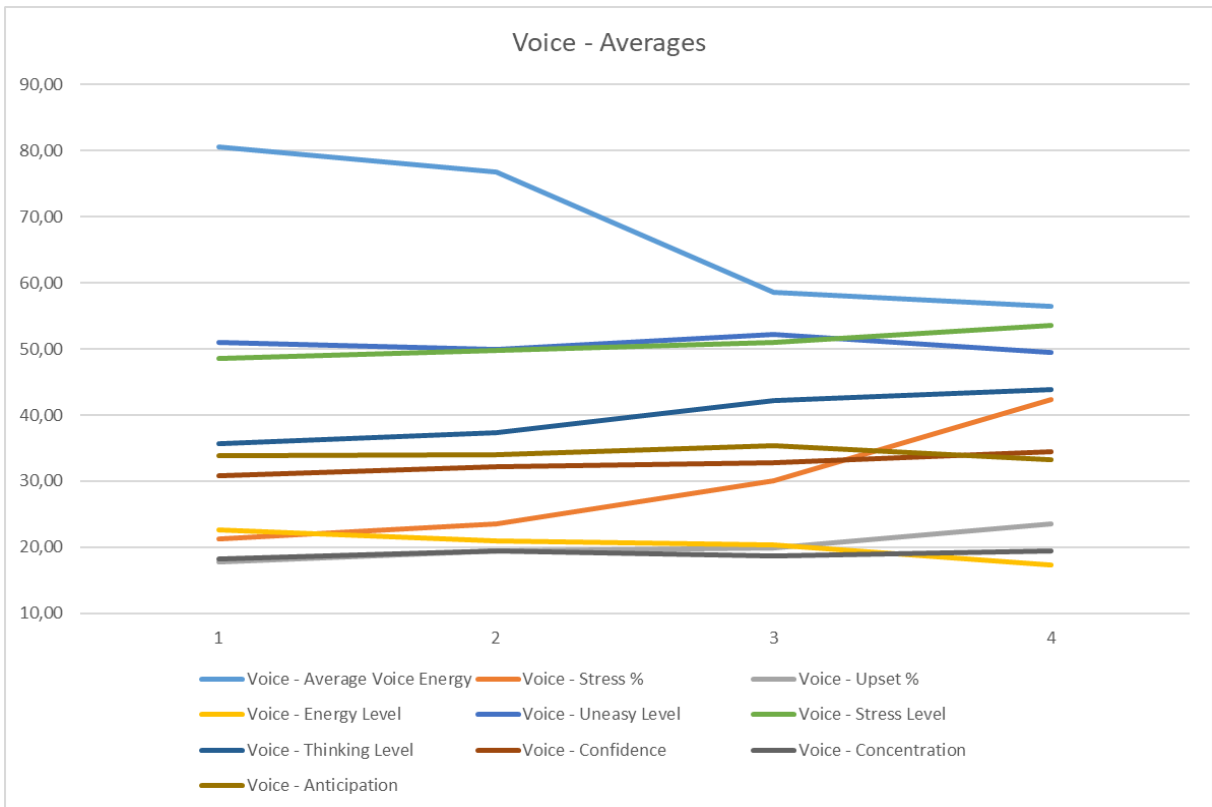
Předpoklad byl na základě zkušeností společnosti dodávající hlasovou analýzu a rovněž z prvotního měření na Letecké škole, že únava se projeví zejména v parametrech „*Average Voice Energy*“ a „*Stress %*“. Byly porovnány výsledky všech 10 parametrů před a po noční směně a to v první a druhé fázi simulace.

Hodnoty jednotlivých parametrů v jednotlivých fázích simulace byly dodány společností provádějící hlasovou analýzu v bezrozměrných jednotkách. U těchto hodnot byly následně analyzovány rozdíly, trendy a hodnoty z večerního a ranního měření byly porovnány pomocí Wilcoxonova testu, aby byly nalezeny statisticky významné rozdíly. Tyto výsledky jsou obsahem následujících tabulek.

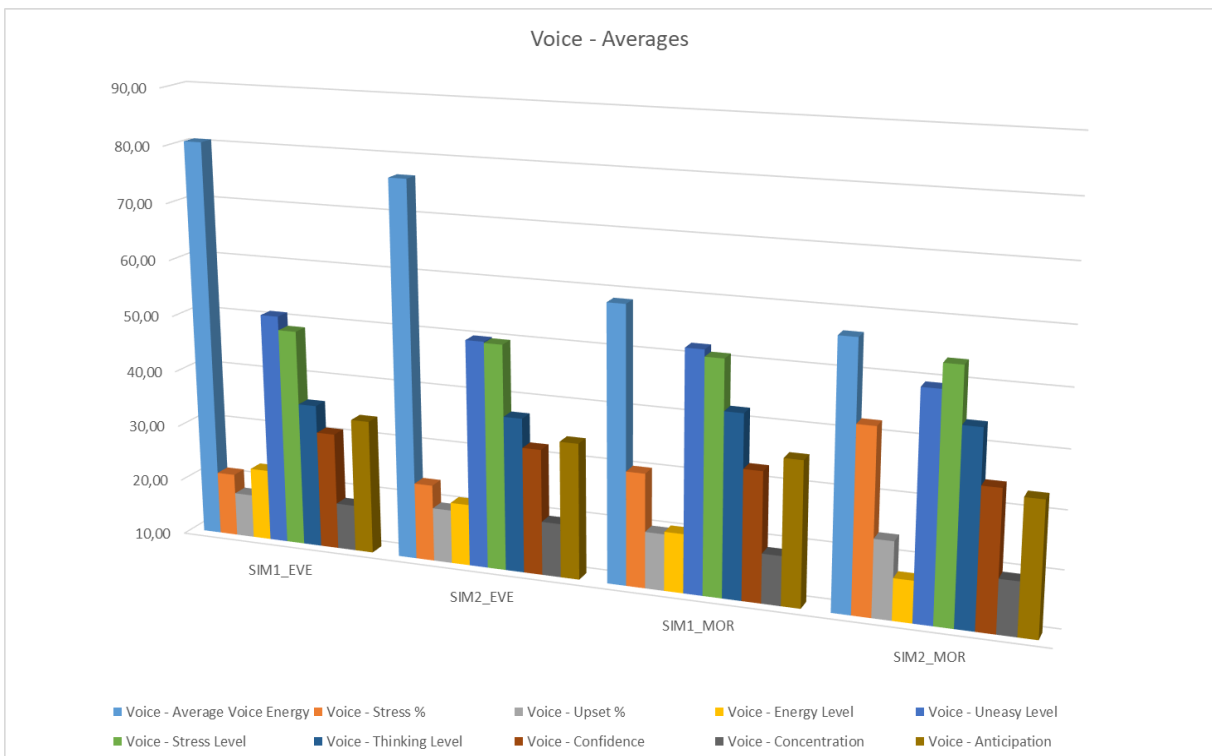


	Voice																			
	Average Voice Energy		Stress %		Upset %		Energy Level		Uneasy Level		Stress Level		Thinking Level		Confidence		Concentration		Anticipation	
	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning	Evening	Morning
<b>Proband 1</b>	58	58	2,5	15	33	31	22	20	39	31	44	49	32	38	29	30	20	21	42	41
<b>Proband 2</b>	186	46	1	51	6,5	16	21	14	63	54	45	56	25	50	29	34	18	19	31	31
<b>Proband 3</b>	48	39	28	49	31	29	14	12	56	54	52	55	41	47	36	38	17	17	32	35
<b>Proband 4</b>	73	53	4	4	6,5	11	39	33	38	41	42	45	30	34	23	27	22	22	29	33
<b>Proband 5</b>	20	20	69	54	14	18	12	13	33	41	58	56	51	54	37	38	24	20	27	34
<b>Proband 6</b>	43	41	10	22	18	35	39	27	45	43	46	48	33	37	33	34	21	23	35	28
<b>Proband 7</b>	104	102	4	9	18	27	25	23	60	64	45	48	28	29	28	30	17	18	37	30
<b>Proband 8</b>	122	102	63	90	24	26	14	12	66	52	58	63	38	45	34	36	17	17	33	31
<b>Proband 9</b>	65	58	34	56	34	15	15	12	51	64	52	56	46	54	35	37	17	15	35	41
<b>Proband 10</b>	59	57	7	18	16	46	27	22	56	54	47	50	39	44	32	34	16	18	36	38
<b>Average</b>	<b>78</b>	<b>58</b>	<b>22</b>	<b>37</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>19</b>	<b>51</b>	<b>50</b>	<b>49</b>	<b>53</b>	<b>36</b>	<b>43</b>	<b>32</b>	<b>34</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>34</b>	<b>34</b>

Tabulka 14 – Hodnoty parametrů hlasu probandů; zdroj: vlastní na základě dat poskytnutých společností ANIS Group, a.s.



Graf 10 – Vývoj jednotlivých parametrů hlasové analýzy v průběhu měření; zdroj: vlastní



Graf 11 – Hodnoty jednotlivých parametrů hlasové analýzy v průběhu měření; zdroj: vlastní

	MEQ	Voice - difference [%]									
		Average Voice Energy	Stress %	Upset %	Energy Level	Uneasy Level	Stress Level	Thinking Level	Confidence	Concentration	Anticipation
Proband 1	Moderately Morning	0	493	-4	-9	-21	11	19	3	5	-2
Proband 2	Moderately Evening	-75	5400	139	-33	-14	24	100	17	6	0
Proband 3	Neither	-19	72	-6	-14	-4	6	15	6	0	9
Proband 4	Neither	-27	-6	69	-15	8	7	13	17	0	14
Proband 5	Moderately Morning	0	-21	27	8	24	-3	6	3	-17	26
Proband 6	Moderately Evening	-5	119	91	-7	-4	4	12	3	10	-20
Proband 7	Neither	-2	144	47	-8	7	7	4	7	6	-19
Proband 8	Moderately Morning	-16	42	7	-14	-21	9	18	6	0	-6
Proband 9	Moderately Evening	-11	66	-55	-20	25	8	17	6	-12	17
Proband 10	Definitely Morning	-3	157	4	-19	-4	6	13	6	13	6
<b>Average</b>	-	<b>-35</b>	<b>65</b>	<b>11</b>	<b>-14</b>	<b>-2</b>	<b>8</b>	<b>19</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabulka 15 – Procentuální změny hodnot parametrů hlasu probandů; zdroj: vlastní

Během porovnání ranních a večerních hodnot jednotlivých hlasových parametrů byly nalezeny pomocí Wilcoxonova testu statisticky významné rozdíly u následujících parametrů:

- Average Voice Energy (pokles)
- Stress % (nárůst)
- Energy Level (pokles)
- Stress Level (nárůst)
- Thinking Level (nárůst)
- Confidence (nárůst).

Pozn.: Parametry Energy Level a Stress Level jsou dle vyjádření společnosti ANIS Group, a. s. obdobou parametrů Average Voice Energy a Stress %.

U parametru „Average Voice Energy“ byl zaznamenán pokles u všech probandů (průměrný pokles asi o 35 %) a tento rozdíl byl podle Wilcoxonova testu hodnocen jako statisticky významný ( $Z = -2,536^d$ ,  $p = 0,011$ ).

Statisticky významný rozdíl byl nalezen rovněž u parametru „Stress %“ ( $Z = -2,805^c$ ,  $p = 0,005$ ). Tento parametr se významně zvýšil během ranního měření ve srovnání s večerním.

Další statisticky významný pokles byl pozorován u parametru „Energy Level“ ( $Z = -2,207^b$ ,  $p = 0,027$ ) a parametru „Thinking Level“ ( $Z = -2,606^c$ ,  $p = 0,009$  ve fázi 1 a  $Z = -2,668^c$ ,  $p = 0,008$  ve fázi 2), naopak nárůst byl zaznamenán u parametru „Stress Level“ ( $Z = -2,814^c$ ,  $p = 0,005$ ).

Parametr „Confidence“ vykazuje nárůst a nárůst je statisticky významný ( $Z = -2,625^c$ ,  $p = 0,009$ ).

Zbytek parametrů nevykazoval žádné statisticky významné rozdíly.

U těchto parametrů tudíž bylo prokázáno, že hodnoty plynoucí z hlasové analýzy reflektují rozdíly v hlase mezi večerním a ranním měřením. Tyto parametry je možné považovat za vhodné kandidáty na identifikaci únavy (resp. změny ve stavu bdělosti či stavu soustředění).

Voice Parameter	Vhodné pro měření únavy	Difference (%)	Wilcoxonův test	Komentář	Grafy
Average Voice Energy	ANO	-35	Statistická významnost: Average_Voice_Energy_SUM (Z=-2.536 <sup>d</sup> , p=0.011)	Všichni účastníci měli po noční pokles v tomto parametru (nebo beze změny – dva ranní typy). Pokles byl výrazný, rozdíl statisticky významný = <b>adept na identifikaci únavy</b> .	
Stress %	ANO	65	Statistická významnost u Stress_perc_SIM2 (Z=-2.805 <sup>c</sup> , p=0.005) a Stress_perc_SUM (Z=-2.090 <sup>b</sup> , p=0.037)	Většina výrazný nárůst (mimo 2 – jeden nevyhraněný a druhý ranní typ). Nárůst byl výrazný, a rozdíl statisticky významný = <b>adept na identifikaci únavy</b> .	
Upset %	NE	11	Bez statistické významnosti!!!	Tento parametr koreluje s EEG, ale nevykazuje statisticky významné rozdíly mezi večerem a ránem. Pravděpodobně tedy nepopisuje stav bdělosti/únavy ale jiný psychický stav.	

Voice Parameter	Vhodné pro měření únavy	Difference (%)	Wilcoxonův test	Komentář	Grafy
Energy Level	(ANO)	-14	Statistická významnost u Energy_level_SIM2 (Z=-2.207 <sup>d</sup> , p=0.027) a Energy_level_SUM (Z=-2.737 <sup>d</sup> , p=0.006)	Většina probandů vykazuje mírný pokles (mimo 1 – ranní typ).  Vzhledem k tomu, že se jedná o období parametru Average Voice Energy je možné z dalšího vyhodnocení vypustit.	
Uneasy Level	NE	-2	Bez statistické významnosti!!!	Tento parametr koreluje s EEG, ale nevykazuje statisticky významné rozdíly mezi večerem a ráno. Pravděpodobně tedy nepopisuje stav bdělosti/únavy ale jiný psychický stav.	
Stress Level	(ANO)	8	Statistická významnost u Stress_level_SIM2 (Z=-2.814 <sup>b</sup> , p=0.005) a Stress_level_SUM (Z=-2.671 <sup>b</sup> , p=0.008)	Většina probandů vykazuje mírný nárůst (mimo 1 – tentýž, který měl nárůst u Energy Level).  Vzhledem k tomu, že se jedná o období parametru Average Voice Energy je možné z dalšího vyhodnocení vypustit.	

Voice Parameter	Vhodné pro měření únavy	Difference (%)	Wilcoxonův test	Komentář	Grafy												
Thinking Level	ANO	19	Statistická významnost u Thinking_level_SIM1 (Z=-2.606 <sup>b</sup> , p=0.009) i Thinking_level_SIM2 (Z=-2.668 <sup>b</sup> , p=0.008) a Thinking_level_SUM (Z=-2.807 <sup>b</sup> , p=0.005)	Všichni účastníci vykazují mírný nárůst. Nárůst výrazný, korelace s výsledky EEG a rozdíl statisticky významný = <b>adept na identifikaci únavy</b> .	<table border="1"> <caption>Thinking Level Data</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Before nightshift</th> <th>After nightshift</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>~35</td> <td>~42</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>~38</td> <td>~45</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>~36</td> <td>~43</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Before nightshift	After nightshift	1	~35	~42	2	~38	~45	Total	~36	~43
Category	Before nightshift	After nightshift															
1	~35	~42															
2	~38	~45															
Total	~36	~43															
Confidence	NE	7	Statistická významnost u Confidence_SIM2 (Z=-2.625 <sup>b</sup> , p=0.009) a Confidence_SUM (Z=-2.848 <sup>b</sup> , p=0.004)	Nárůst u všech, ač velmi mírný, navíc rozdíl statisticky významný. Nemusí však souviset s únavou ale s faktem, že ráno bylo cvičení podobné a probandi už věděli, co je čeká.	<table border="1"> <caption>Confidence Data</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Before nightshift</th> <th>After nightshift</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>~30</td> <td>~32</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>~32</td> <td>~34</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>~31</td> <td>~33</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Before nightshift	After nightshift	1	~30	~32	2	~32	~34	Total	~31	~33
Category	Before nightshift	After nightshift															
1	~30	~32															
2	~32	~34															
Total	~31	~33															
Concentration	NE	1	Bez statistické významnosti!!!	Tento parametr koreluje v některých případech s výsledky EEG. Pravděpodobně však nepopisuje stav bdělosti/únavy (není statisticky významný rozdíl mezi večerem a ráno) ale jiný psychický stav.	<table border="1"> <caption>Concentration Data</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Before nightshift</th> <th>After nightshift</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>~18</td> <td>~19</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>~19</td> <td>~20</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>~18</td> <td>~19</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Before nightshift	After nightshift	1	~18	~19	2	~19	~20	Total	~18	~19
Category	Before nightshift	After nightshift															
1	~18	~19															
2	~19	~20															
Total	~18	~19															

Voice Parameter	Vhodné pro měření únavy	Difference (%)	Wilcoxonův test	Komentář	Grafy
Anticipation	NE	1	Bez statistické významnosti!!!	Nenalezena žádná závislost, korelace rovněž minimální, dál není tento parametr pro identifikaci únavy uvažován. V hlasových relacích u ATCO se tento parametr podle vyjádření zástupce firmy ANIS Group neprojeví.	

Tabulka 16 – Přehled parametrů hlasu a jejich vhodnosti pro identifikaci únavy; zdroj: vlastní

Tabulka poskytuje přehledný popis jednotlivých sledovaných hlasových parametrů. V prvním sloupci je uveden název parametru tak, jak jej uvádí společnost poskytující hlasovou analýzu. V druhém sloupci je uveden závěr, zda se s ohledem na změny v daném hlasovém parametru v realizovaných měřeních (sloupec 3) a výsledky Wilcoxonova testu (sloupec 4) jedná o parametr, který je vhodným kandidátem pro účely měření únavy. Toto rozhodnutí je vysvětleno ve sloupci 5 komentářem k danému parametru a pro úplnost je ve sloupci 6 uveden graf znázorňující vývoj hodnoty daného hlasového parametru v první a druhé fázi simulace („1“ a „2“ na ose x) a rovněž hodnota nerozdělená pro dvě simulační fáze (hodnota „Total“).



## 6.2. Shrnutí výsledků jednotlivých metod

Na základě uvedených výsledků byla únava účastníků vyšší během ranního měření realizovaného po druhé noční směně v řadě, což odpovídá výsledkům z jiných studií v oboru. [4], [47] Výsledky KSS, PVT, Oddball a EEG ukazují, že experiment byl nastaven správně, navzdory relativně malé velikosti vzorku (viz kapitola 7.3), a podařilo se mu simulovat podmínky částečné spánkové deprivace a to v reálných podmínkách, které nastávají v klasickém režimu směn, jak jsou naplánovány podle pravidel pro tvorbu rozpisů směn řídicích letového provozu. Mezi tyto změny patřilo zvýšení subjektivně vnímané únavy a pokles bdělosti u neuropsychologických testů měřících reakční dobu a chybovost a změny elektrofyziologických parametrů související s únavou. Zvýšení reakční doby bylo pozorováno u úkolů PVT i ODD po druhé po sobě jdoucí noční směně, což potvrzuje základní předpoklad vyšší únavy po druhé noční směně oproti stavu před noční a odráží zhoršenou schopnost zpracování informací a provádění úkolů v této vysoce náročné simulační úloze.

Únava, měřená absolutním EEG PSD, byla pozorována po druhé noční směně řídicích letového provozu jako globální pokles PSD ve všech výkonových pásmech. To může odrážet celkové zpomalení mozku nebo vyčerpání neurálních zdrojů v důsledku částečné spánkové deprivace. [16] Navíc zvýšení spektrálního výkonu v pásmu delta bylo pozorováno pouze během simulační úlohy, a nikoli během kognitivních úkolů, což může odrážet odlišný charakter kognitivní aktivace během standardizovaných úloh sledování reakční doby na vizuální podnět a simulovaného cvičení řízení letového provozu. [28] Z hlediska lokalizace rozdílů byl během kognitivních testů pozorován pokles PSD hlavně v okcipitálních oblastech, což odráží zapojení vizuálního kortexu do těchto úkolů, zatímco pokles v temporální, parietální a frontocentrální oblasti během simulační fáze může odrážet zapojení mozkových funkcí souvisejících se zpracováním verbálních a zvukových informací, jakož i zapojení výkonných funkcí do simulační úlohy.

To může mít i další důsledky pro činnost řídicích letového provozu, protože delší období relativně nízké kognitivně náročné pracovní zátěže může vést ke zvýšení mozkové aktivity s pomalými vlnami ve frontálních a fronto-centrálních oblastech a ke zvýšení pravděpodobnosti chyb souvisejících s únavou. [108] Standardní

laboratorní testy vizuální reakce proto nemohly být natolik citlivé, aby detekovaly tento druh zhoršení, což si v budoucích studiích vyžádá změnu paradigmat výzkumu.

Tyto metody je na základě výše uvedeného možné v takto nastaveném experimentu použít pro validaci neověřené metody Hlasové analýzy.

Při porovnání výsledků hlasové analýzy mezi večerním a ranním měřením byl pozorován významný pokles u parametrů „Average Voice Energy“, „Energy level“, a „Thinking Level“. Významné zvýšení bylo pozorováno v parametrech „Stress %“, „Stress Level“ a „Confidence“. Tyto hlasové parametry by proto mohly být způsobilé pro identifikaci a monitorování únavy, protože rozdíly v těchto parametrech byly hodnoceny jako statisticky významné.

### 6.3. Korelace

Poté, co byly zhodnoceny statisticky významné změny v hlasových parametrech pro oba stavy (ráno a večer), byly použity korelace k určení, zda pozorované změny v hlasových parametrech souvisejí se změnami v jiných již ověřených metodách.

Byla tedy provedena korelace (Pearsonův korelační koeficient) mezi výsledky hlasové analýzy a hodnotami EEG. Výsledky této analýzy jsou přehledně znázorněny v následujících kapitolách. Pro lepší primární vizuální představu o závislosti výsledků hlasové analýzy a EEG byly rovněž zpracovány tzv. Correlation heatmaps, na základě kterých byly identifikovány parametry, které korelují pozitivně/negativně, resp. které oblasti mozku/pásma EEG vykazují závislost s výsledky hlasové analýzy.

Electrode	Band	Data	SIM	MOR/EVE	Average_Voice_Energy	Stress_percent	Upset_percent	Energy_level	Uneasy_level	Stress_level	Thinking_level	Confidence	Concentration	Anticipation
AF3	gamma	Pearson	2	EVE	0,853	-0,141	-0,364	0,140	0,381	-0,216	-0,49641	-0,248	-0,464	-0,182
F7	gamma	Pearson	2	EVE	0,652	0,146	-0,194	0,107	0,653	0,068	-0,282	-0,059	-0,586	-0,223
F3	gamma	Pearson	2	EVE	0,514	0,443	0,024	-0,167	0,632	0,395	-0,068	0,100	-0,508	-0,094
FC5	gamma	Pearson	2	EVE	0,317	0,168	-0,319	0,152	0,297	0,015	0,020	-0,099	-0,439	-0,234
T7	gamma	Pearson	2	EVE	0,636	-0,143	-0,264	-0,121	0,338	-0,136	-0,205	0,025	-0,559	0,026
P7	gamma	Pearson	2	EVE	0,741	-0,390	-0,462	0,070	0,294	-0,402	-0,496	-0,179	-0,412	-0,185
O1	gamma	Pearson	2	EVE	0,76	0,049	-0,263	-0,088	0,567	0,021	-0,312	0,020	-0,582	-0,169
O2	gamma	Pearson	2	EVE	0,678	0,129	-0,231	-0,117	0,607	0,097	-0,192	0,077	-0,632	-0,133
P8	gamma	Pearson	2	EVE	0,834	-0,058	-0,375	-0,091	0,523	-0,097	-0,393	-0,086	-0,559	-0,214
T8	gamma	Pearson	2	EVE	0,826	-0,183	-0,466	-0,006	0,424	-0,232	-0,439	-0,154	-0,497	-0,243
FC6	gamma	Pearson	2	EVE	0,277	-0,375	-0,53092	0,387	0,166	-0,429	-0,317	-0,220	-0,314	-0,105
F4	gamma	Pearson	2	EVE	0,558	0,026	-0,109	0,099	0,370	0,007	-0,239	0,033	-0,433	-0,001
F8	gamma	Pearson	2	EVE	0,416	-0,396	-0,585	0,823	0,021	-0,58459	-0,6187	-0,661	-0,077	-0,314
AF4	gamma	Pearson	2	EVE	0,358	0,498	-0,012	-0,079	0,493	0,415	0,017	0,075	-0,387	-0,100

Tabulka 17 – Ukázka correlation heatmap pro pásmo gamma v druhé části večerní simulace; zdroj: vlastní

### 6.3.1. Korelace hlasu a EEG

Nejprve byly sledovány korelace výsledků hlasové analýzy a EEG v závislosti na jednotlivých pásmech. Počet statisticky významných korelací ( $p < 0,05$ ) hlasu s EEG (podle pásem) uvádí následující tabulka.

			Delta	Theta	Alpha	Beta1	Beta2	Gamma	SUM		
Average Voice Energy	Evening	SIM1	1	0	0	0	1	1	3	17	25
		SIM2	1	0	0	0	5	8	14		
	Morning	SIM1	1	1	1	0	2	2	7	8	
		SIM2	0	1	0	0	0	0	1		
Stress %	Evening	SIM1	2	3	1	0	0	0	6	26	37
		SIM2	6	5	7	2	0	0	20		
	Morning	SIM1	2	2	2	0	0	0	6	11	
		SIM2	2	2	1	0	0	0	5		
Upset %	Evening	SIM1	1	1	0	0	0	0	2	3	22
		SIM2	0	0	1	0	0	0	1		
	Morning	SIM1	0	0	2	2	0	0	4	19	
		SIM2	0	1	2	2	4	6	15		
Energy Level	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	3	16
		SIM2	1	0	0	0	1	1	3		
	Morning	SIM1	0	0	0	5	1	1	7	13	
		SIM2	0	0	0	2	2	2	6		
Uneasy Level	Evening	SIM1	1	1	0	0	2	3	7	9	13
		SIM2	0	0	0	0	1	1	2		
	Morning	SIM1	0	0	0	0	0	1	1	4	
		SIM2	3	0	0	0	0	0	3		
Stress Level	Evening	SIM1	3	3	1	0	0	0	7	14	27
		SIM2	4	2	1	0	0	0	7		
	Morning	SIM1	1	1	2	1	1	1	7	13	
		SIM2	1	3	1	0	0	1	6		
Thinking Level	Evening	SIM1	2	0	0	0	0	0	2	3	9
		SIM2	1	0	0	0	0	0	1		
	Morning	SIM1	1	2	1	0	0	0	4	6	
		SIM2	2	0	0	0	0	0	2		
Confidence	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	1	7
		SIM2	0	0	0	0	0	1	1		
	Morning	SIM1	1	1	1	0	1	1	5	6	
		SIM2	0	1	0	0	0	0	1		
Concentration	Evening	SIM1	1	0	0	0	0	0	1	2	22
		SIM2	1	0	0	0	0	0	1		
	Morning	SIM1	2	1	1	0	1	2	7	20	
		SIM2	7	4	2	0	0	0	13		

Anticipati on	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Morning	SIM1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SUM			48	36	27	14	22	32	179								

Tabulka 18 – Počet korelací hlasu s EEG (podle pásem); zdroj: vlastní

Poté byly korelace výsledků hlasové analýzy a EEG analyzovány z pohledu jednotlivých elektrod. Počet korelací hlasu s EEG (podle elektrod) uvádí následující tabulka.

			AF3	F7	F3	FC5	T7	P7	O1	O2	P8	T8	FC6	F4	F8	AF4	SUM		
Average Voice Energy	Evening	SIM1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	17	25
		SIM2	2	1	0	1	2	2	1	1	2	2	0	0	0	0	14		
	Morning	SIM1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	8	
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
Stress %	Evening	SIM1	0	3	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	6	26	37
		SIM2	3	0	3	1	0	1	3	1	1	0	0	3	0	4	20		
	Morning	SIM1	3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	11	
		SIM2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5		
Upset %	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	22
		SIM2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
	Morning	SIM1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	4	19	
		SIM2	1	0	5	0	0	2	2	1	0	0	0	3	1	0	15		
Energy Level	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	16
		SIM2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3		
	Morning	SIM1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	3	0	7	13	
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	6		
Uneasy Level	Evening	SIM1	0	0	0	2	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0	7	9	13
		SIM2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		
	Morning	SIM1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	
		SIM2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3		
Stress Level	Evening	SIM1	0	3	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	7	14	27
		SIM2	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	3	0	0	7		
	Morning	SIM1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	7	13	
		SIM2	3	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	6		
Thinking Level	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	3	9
		SIM2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
	Morning	SIM1	0	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	4	6	
		SIM2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2		
Confid ence	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1		
	Morning	SIM1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	5	6	

		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1			
Concentration	Evening	SIM1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	22
		SIM2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
	Morning	SIM1	0	0	1	2	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	7	20	
		SIM2	3	1	0	0	0	2	3	1	2	0	1	0	0	0	13			
Anticipation	Evening	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Morning	SIM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1		
		SIM2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
SUM			22	17	16	8	12	9	16	11	14	9	6	11	16	12	179			

Tabulka 19 – Počet korelací hlasu s EEG (podle elektrod); zdroj: vlastní

Celkově bylo v této analýze nalezeno celkem 179 statisticky významných korelací ( $p < 0,05$ ).

Pro fázi **SIM1** (první část simulace) **před noční směnou** bylo nalezeno **28 významných korelací**:

- V **pásmu delta** bylo nalezeno 11 významných korelací. 1 pro parametr „Average voice energy“ na elektrodě FC5, 2 pro „Stress %“ (F7, O2), 1 pro „Upset %“ (AF4), 1 pro „Uneasy Level“ (FC5), 3 pro „Stress Level“ (F7, O1 a O2), 2 pro „Thinking Level“ (O2, P8) a 1 pro „Concentration“ (F3) s Pearsonovým  $r$  v rozmezí od 0,633 do 0,832.
- V **pásmu theta** bylo nalezeno 8 významných korelací. 3 pro parametr „Stress %“ (F7, O1 a O2), 1 pro „Upset %“ (AF4), 1 pro „Uneasy Level“ (FC5) a 3 pro „Stress Level“ (F7, O1 a O2) s Pearsonovým  $r$  v rozmezí od 0,637 do 0,732.
- V **pásmu alfa** byly nalezeny 2 významné korelace. 1 pro parametr „Stress %“ (F7) a 1 pro „Stress Level“ (F7) s Pearsonovým  $r$  v rozmezí od 0,637 do 0,654.
- V **pásmu beta1** nebyly nalezeny žádné významné korelace.
- V **pásmu beta2** byly nalezeny 3 významné korelace. 1 pro parametr „Average voice energy“ (T8) a 2 pro „Uneasy Level“ (P8, T8) s Pearsonovým  $r$  v rozmezí od 0,647 do 0,683.
- V **pásmu gamma** byly nalezeny 4 významné korelace. 1 pro parametr „Average voice energy“ (T8) a 3 pro „Uneasy Level“ (P8, T8 a T7) s Pearsonovým  $r$  v rozmezí od 0,635 do 0,719.

Pro fázi **SIM1** (první část simulace) **po noční směně** bylo nalezeno **48 významných korelací**:

- V **pásmu delta** bylo nalezeno 8 významných korelací. 1 pro parametr „Average voice energy“ na elektrodě AF4, 2 pro „Stress %“ (AF3, T7), 1 pro „Stress Level“ (T7), 1 pro „Thinking Level“ (T7), 1 pro „Confidence“ (T7) a 2 pro „Concentration“ (P8, FC6) s Pearsonovým  $r$  v rozmezí od 0,658 do 0,792.

- V **pásmu theta** bylo nalezeno 9 významných korelací. 1 pro parametr „Average voice energy“ na místě AF4, 2 pro parametr „Stress %“ (AF3, F7), 1 pro „Stress Level“ (F7), 2 pro „Thinking Level“ (T7, P8), 1 pro „Confidence“ (T7), 1 pro „Concentration“ (FC6) a 1 pro „Anticipation“ (F4) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,645 do 0,734.
- V **pásmu alfa** bylo nalezeno 10 významných korelací. 1 pro parametr „Average voice energy“ na elektrodě AF4, 2 pro parametr „Stress %“ (AF3, F7), 2 pro „Upset %“ (P8, T8), 2 pro „Stress Level“ (AF3, F7), 1 pro „Thinking Level“ (O1), 1 pro „Confidence“ (AF3) a 1 pro „Concentration“ (T7) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,642 do 0,760.
- V **pásmu beta1** bylo nalezeno 8 významných korelací. 2 pro „Upset %“ (T7, P8), 5 pro „Energy Level“ (F3, O1, O2, F4 a F8) a 1 pro „Stress Level“ (F8) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,636 do 0,898.
- V **pásmu beta2** bylo nalezeno 6 významných korelací. 2 pro parametr „Average voice energy“ (AF3 a AF4), 1 pro „Energy level“ (F8), 1 pro „Stress Level“ (F8), 1 pro „Confidence“ (F8) a 1 pro „Concentration“ (FC5) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,660 do 0,910.
- V **pásmu gamma** bylo nalezeno 8 významných korelací. 2 pro parametr „Average voice energy“ (AF3 a AF4), 1 pro „Energy level“ (F8), 1 pro „Uneasy level“ (F3), 1 pro „Stress Level“ (F8), 1 pro „Confidence“ (F8) a 2 pro „Concentration“ (F3, FC5) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,637 do 0,920.

Pro **fázi SIM2** (druhá část simulace) **před noční směnou** bylo nalezeno **50 významných korelací**:

- V **pásmu delta** bylo nalezeno 14 významných korelací. 1 pro parametr „Average voice energy“ na elektrodě FC5, 6 pro „Stress %“ (F3, P7, O1, P8, F4 a AF4), 1 pro „Energy Level“ (F3), 4 pro „Stress Level“ (F3, O1, P8 a F4), 1 pro „Thinking Level“ (F3) a 1 pro „Concentration“ (FC5) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,635 do 0,885.
- V **pásmu theta** bylo nalezeno 7 významných korelací. 5 pro parametr „Stress %“ na elektrodách AF3, F3, O1, F4 a AF4 a 2 pro parametr „Stress Level“ (F3, F4) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,643 do 0,726.
- V **pásmu alfa** bylo nalezeno 9 významných korelací. 7 pro parametr „Stress %“ (AF3, F3, FC5, O1, O2, F4 a AF4), 1 pro „Upset %“ (P7) a 1 pro „Stress Level“ (F4) s Pearsonovým r v rozmezí 0,639 až 0,737.
- V **pásmu beta1** byly nalezeny 2 významné korelace a to pro parametr „Stress %“ (AF3, AF4) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,638 do 0,654.
- V **pásmu beta2** bylo nalezeno 7 významných korelací. 5 pro parametr „Average voice energy“ (AF3, T7, P7, P8 a T8), 1 pro „Energy level“ (F8) a 1 pro „Uneasy Level“ (F7) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,649 do 0,807.
- V **pásmu gamma** bylo nalezeno 11 významných korelací. 8 pro parametr „Average voice energy“ (AF3, F7, T7, P7, O1, O2, P8 a T8), 1 pro „Energy

level“ (F8), 1 pro „Uneasy level“ (F7) a 1 pro „Confidence“ (F8) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,636 do 0,853.

Pro fázi **SIM2** (druhá část simulace) **po noční směně** bylo nalezeno **52 významných korelací**:

- V **pásmu delta** bylo nalezeno 15 významných korelací. 2 pro „Stress %“ (AF3, F7), 3 pro „Uneasy Level“ (P7, O1, O2), 1 pro „Stress Level“ (AF3), 2 pro „Thinking Level“ (T7, T8) a 7 pro „Concentration“ (AF3, F7, P7, O1, O2, P8 a FC6) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,638 do 0,843.
- V **pásmu theta** bylo nalezeno 12 významných korelací. 1 pro parametr „Average voice energy“ (AF4), 2 pro parametr „Stress %“ (AF3, F7), 1 pro „Upset %“ (F3), 3 pro parametr „Stress Level“ (AF3, F7, P8), 1 pro „Confidence“ (T8) a 4 pro „Concentration“ (AF3, P7, O1 a P8) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,648 do 0,837.
- V **pásmu alfa** bylo nalezeno 6 významných korelací. 1 pro parametr „Stress %“ (AF3), 2 pro „Upset %“ (F3, F8), 1 pro „Stress Level“ (AF3) a 2 pro „Concentration“ (AF3, O1) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,641 do 0,799.
- V **pásmu beta1** byly nalezeny 4 významné korelace. 2 pro „Upset %“ (F3, F4) a 2 pro „Energy level“ (FC6, F8) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,667 do 0,860.
- V **pásmu beta2** bylo nalezeno 6 významných korelací. 4 pro „Upset %“ (F3, P7, O1 a F4) a 2 pro „Energy level“ (FC6, F8) s Pearsonovým r v rozmezí od 0,738 do 0,881.
- V **pásmu gamma** bylo nalezeno 9 významných korelací. 6 pro parametr „Upset %“ (AF3, F3, P7, O1, O2 a F4), 2 pro „Energy level“ (FC6, F8) a 1 pro „Stress level“ (F8) s Pearsonovým r v rozmezí 0,635 až 0,917.

**Shrnutí:** Nejvyšší počet korelací mezi EEG a LVA byl nalezen u následujících hlasových parametrů: „Stress %, Stress Level, Average Voice Energy, Upset %, Concentration and Energy Level“. Většina korelací nastává u parametrů Stress a Average Voice Energy, které spolu se signifikantními rozdíly mezi večerním a ranním měřením podporují myšlenku, že tyto parametry nejvíce odpovídají změnám v mozkové aktivitě souvisejícím s částečnou spánkovou deprivací. Protože většina z těchto korelací byla pozorována ve frontálních oblastech (páry AF3-AF4, F7-F8, F3-F4), mohou tato zjištění odpovídat povaze simulačního cvičení, které vyžaduje zapojení vyšších kognitivních mozkových funkcí ve frontálních a frontocenálních sítích.

Při pohledu na počet korelací podle frekvenčních pásem bylo v pásmu delta/theta nejvíce korelací s hlasovým parametrem „Concentration“ během ranního měření a během večerní relace s parametrem „Stress %“, u pásma alfa byla většina korelací během večerního měření s parametrem „Stress %“, v pásmu beta/gamma je většina korelací relací večer s parametrem „Average Voice Energy“ a ráno s parametrem „Upset %“. Tento závěr může naznačovat, že se uvedené parametry mění za různých podmínek, a dále podporuje hypotézu citlivosti hlasu k detekci změn v únavě, jak bylo nastaveno ve dvou různých experimentálních podmínkách.

#### **6.4. Interpretace výsledků hlasové analýzy**

Z výše uvedených závěrů – výsledků Wilcoxonova testu a korelací bylo nalezeno několik kandidátů z řady analyzovaných hlasových parametrů (parametry, které vykazovaly statisticky významné rozdíly mezi večerním a ranním měřením a parametry, které nejčastěji korelovaly s ostatními metodami pro měření únavy). Jejich využití pro identifikaci a měření aktuální míry únavy je možné shrnout následujícím způsobem.

Vhodnost parametrů *Upset %*, *Thinking Level*, *Uneasy Level* a *Confidence* pro identifikaci a monitorování únavy by měla být dále diskutována a analyzována, jelikož by mohly odpovídat změnám jiných duševních stavů (např. stresu). Nenalezení statistické významnosti (rozdílu mezi večerní a ranní hodnotou) může totiž svědčit i o tom, že to není vhodný parametr pro sledování únavy, ale naopak může být vhodným indikátorem pro sledování jiného (psychického) stavu – viz výsledky z korelací, kde je patrné velké množství korelací i u parametrů, které nevykazovaly statisticky významné rozdíly mezi večerním a ranním měřením a tudíž nebyly způsobeny únavou. Jako další příklad lze uvést nárůst u parametru *Confidence*, který mohl být výsledkem jiných aspektů než únavy, například zvykáním si na experimentální prostředí (efekt nácviku). V odborných studiích bylo popsáno několik zjištění týkajících se například korelací EEG a vnímaného stresu, včetně změn v pásmech delta, theta, alfa a beta. Vyšší úroveň stresu byla také spojena s čelní asymetrií, která by byla v souladu s prevalencí většiny korelačních vztahů na místech čelních elektrod. [70], [14], [27]



To podporuje potřebu dalšího výzkumu v této oblasti, jelikož náš experiment byl zaměřen pouze na detekci únavy a nikoli na změny jiných duševních stavů. Mělo by se proto uvažovat o korelaci výsledků hlasové analýzy i s dalšími psychologickými a fyziologickými měřítky stresu, aby bylo možné lépe popsat fungování hlasové analýzy a změny jejích jednotlivých parametrů.

Vzhledem k tomu, že parametry *Uneasy Level* a *Anticipation* nevykazovaly žádné statisticky významné změny a také vykazovaly nejméně korelací s EEG ze všech sledovaných parametrů, nedoporučují se jako vhodné pro identifikaci a monitorování únavy.

Všechny výše uvedené výsledky naznačují, že metoda hlasové analýzy je citlivá na změny duševního stavu člověka. Na základě výsledků této práce se parametry popsané jako úroveň stresu nebo energie (jmenovitě parametry *Average Voice Energy*, *Energy level*, *Stress %* a *Stress Level*) zdají být nejvhodnějšími kandidáty pro detekci únavy, jak ukazují statistická srovnání a korelace.

Jak bylo zmíněno výše, náš experiment pravděpodobně vyvolal nejen únavu, ale také změny v jiných duševních stavech, jako je vnímaný stres, které by se mohly odrazit ve změnách dalších hlasových parametrů, na které by se mohly zaměřit následující studie. Další výzkum je žádoucí, protože v současné době chybí vědecké důkazy podporující použití hlasové analýzy v oblasti dopravy. Další výzkum je rovněž nezbytný k nalezení a ověření nových způsobů monitorování úrovně únavy, protože profese, jako jsou řídicí letového provozu, nejsou ovlivňovány pouze únavou způsobenou nočními směnami a rychle se měnícími rozpisy směn, ale také stresem a změnami nálady a kognice způsobené nesouladem s cirkadiánními rytmy v těchto vysoce náročných a bezpečnostně kritických provozech.

## 7. DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V rámci disertační práce byly postupně naplňovány předem definované následující dílčí cíle:

- Příprava a realizace série měření pro validaci metody hlasové analýzy s využitím EEG (viz kapitola 5.2).
- Detekce reakčního času pro ověření správné korelace EEG i hlasové analýzy a jako vhodný marker pro sledování únavy (viz kapitola 5.6.2 a 5.6.3).
- Identifikace a volba dalších vhodných vědecky ověřených metod pro validaci hlasové analýzy (viz kapitola 4.2).
- Identifikace nejvhodnějších „emočních parametrů hlasu“ či jejich kombinace pro účely sledování únavy (viz kapitola 6.4).
- Nalezení korelace mezi jednotlivými parametry hlasové analýzy a parametry jiných, vědecky ověřených metod (6.3).
- Využití metod subjektivního hodnocení únavy jako podpory pro ověření metody hlasové analýzy (viz kapitola 5.6.1).

Příprava a realizace série měření pro validaci metody hlasové analýzy s využitím EEG zahrnovala nejobsáhlejší část práce a byla silně ovlivněna vnějšími podmínkami. V rámci příprav se předpokládalo, že nebude prakticky proveditelná realizace měření v reálném provozu na kvalifikovaných „skutečných“ řídicích letového provozu, a proto bylo plánováno měření provádět na žácích, kteří jsou ve výcviku na řídicí letového provozu. Tento výcvik probíhá na radarových simulátorech pomocí nácviku základních technik řízení letového provozu i řešení nestandardních situací za dohledu instruktora. Toto simulátorové prostředí má za cíl co nejvíce se blížit podmínkám reálného provozu. I z tohoto důvodu se toto prostředí jevílo jako vhodné pro realizaci měření. Nicméně jeho podoba a rozsah byla po diskusích s představiteli ŘLP ČR, s. p. a jeho Letecké školy, která výcvik nových řídicích zajišťuje, pozměněna zejména s ohledem na značný zásah do běžného výcviku i s ohledem na předpokládanou potřebu zajištění spánkové deprivace probandů v některých měřeních. Toto bylo vyhodnoceno jako problematické zejména z pohledu ovlivnění výkonu žáků v rámci výcviku. Proto bylo nakonec rozhodnuto o změně, která ve výsledku přispěla k větší realističnosti výsledků, jelikož bylo využito kvalifikovaných řídicích a jejich reálného rozpisu směn.

V rámci tohoto podcíle došlo k definování harmonogramu měření, výběru skupiny probandů, jejich informování o průběhu měření, přípravě vhodných podmínek, výběru vhodných simulátorových cvičení, jejich skladby a počtu.

V rámci disertační práce byla prohlubována identifikace a volba dalších vhodných vědecky ověřených metod pro validaci hlasové analýzy mimo základní metodu EEG. Probíhala rešerše dostupných zdrojů, probíhaly diskuse s institucemi zaměřenými na výzkum v oblasti sledování únavy (Národní ústav pro duševní zdraví, Ústav leteckého zdravotnictví, Katedra Fyziologie Univerzity Karlovy, společnost Honeywell a další), byly sledovány výstupy z konferencí zabývajících se problematikou únavy (např. Spánek 20XX) a odborných publikací.

Jak bylo zmíněno, metoda hlasové analýzy je založena na vyhodnocování jednotlivých „emočních parametrů hlasu“. Těchto parametrů bylo prozatím společností dodávajících tuto analýzu identifikováno 16, přičemž ne všechny byly předem označeny za vhodné a použitelné pro detekci únavy. V rámci výzkumu bylo z těchto parametrů využito 10, některé se pro identifikaci únavy ukázaly jako vhodné, jiné pravděpodobně popisují změny v jiných duševních stavech, nikoliv únavy. Stejně jako u měření úrovně stresu v podmínkách Letecké školy probíhalo postupné „ladění“ volby parametrů hlasu, dá se obdobný postup předpokládat i u volby parametrů pro měření únavy. Tato práce jako jeden z cílů určuje na základě výsledků, které parametry by byly vhodnými kandidáty pro sledování únavy, které je nutné dále prověřovat a které naopak zcela nepoužitelné. Pro volbu správné kombinace je nutná analýza velkého množství dat, což je rovněž návrhem na další zkoumání v této oblasti.

## **7.1. Možnosti využití hlasové analýzy**

Jedním z cílů této disertační práce byla identifikace vhodných parametrů hlasové analýzy pro identifikaci a monitorování aktuální míry únavy. Existuje však řada způsobů, jak tuto metodu využívat, a vždy záleží na konkrétních potřebách daného provozu.

V rámci ŘLP ČR, s. p. bude rovněž následovat diskuse, jak dále hlasovou analýzu prakticky využívat, jelikož tato práce slouží zejména jako ověření, zda hlasová analýza funguje.

Nabízí se následující možnosti využití, přičemž vždy záleží na daném provozu, ve kterém se hlasová analýza využije:

„**Online**“ **sledování aktuální míry únavy**, které by se předávalo samotnému operátorovi, aby byl informován o svém aktuálním stavu, nebo vedoucímu směny, který by měl informace o všech operátorech ve směně. Zde se však naráží na etický problém, jakým způsobem s informacemi nakládat a rozhodně by bylo nutné s podobným využitím získat souhlas operátorů. Nicméně v této podobě se hlasová analýza využívá v call centrech pro sledování aktuální míry stresu a vzteku a dalších emočních parametrů (samozřejmě se přitom využívá jiných parametrů hlasové analýzy), aby se předešlo situacím, kdy stres ovládne chování operátora a jeho komunikaci vůči zákazníkovi. Využití v prostředí řízení letového provozu však na hlasovou analýzu klade jiné požadavky a cíle. Využití touto formou by ale vyžadovalo důkladné vysvětlení přínosů z pohledu provozní bezpečnosti a celkové změnu kultury bezpečnosti.

Jako další možnost se jeví využití hlasové analýzy pro **sledování trendů** a odhalení dlouhodobé únavy a případně syndromu vyhoření. Při využití výsledků hlasové analýzy tímto způsobem by bylo zapotřebí provádění důkladných analýz s velkým množstvím dodatečných informací – o vývoji provozu, o psychickém stavu daného operátora, což by vyžadovalo zapojení psychologů do vyhodnocování.

Dalším způsobem je využití dat pro sledování vývoje míry únavy v rámci směn a pro případné **úpravy pravidel pro tvorbu rozdělovníků směn**, přestávek v rámci směny, její délky, počtu po sobě jdoucích směn apod.

Konkrétní způsob využití vždy záleží na konkrétním provozu a je nutné důkladně zvážit související přínosy a rizika.

## **7.2. Přínosy**

Tento výzkum poskytuje podporu v tom, že hlas je potenciálně spolehlivým a funkčním nástrojem pro sledování únavy a případně i emocí a vhodným pro integraci do budoucích technologií, jako jsou automatické bezpečnostní kontroly a pokročilé interakce člověk-počítač.

Hlasovou analýzu lze použít v souvislosti s jinými metodami detekce únavy i na jiných dispečerských pracovištích. Použití samostatné hlasové analýzy je vhodné zejména tam, kde probíhá rutinní komunikace nebo řešení událostí komunikací mezi operátorem a provozními jednotkami nebo třetími stranami při řešení problémů, jako je integrovaný záchranný systém nebo krizový management, řízení veřejné dopravy, energetické řízení a řízení dopravy. Typickým dobrým příkladem hlasové analýzy je použití v call centrech.

Pouze velmi málo studií se zaměřilo na stanovení účinků duševní únavy a fyziologických markerů duševní únavy v reálných scénářích. V našem výzkumu byly naopak zajištěny podmínky téměř shodné s reálným provozem. Účastníky byli kvalifikovaní řídicí letového provozu, bylo využito podmínek, které reálně nastávají v průběhu skutečných rozpisů směn (vliv dvou po sobě jdoucích nočních směn), měření proběhlo na simulátoru, který je věrnou kopií skutečného pracoviště řídicích letového provozu s totožnými systémy a s letovým provozem, který byl odvozen z reálného vzorku. Toto je považováno za jednu z hlavních výhod realizovaného experimentu, jelikož většina obdobných měření probíhá v laboratorních podmínkách, čímž jsou výsledky značně zkresleny.

Jedním z přínosů tohoto experimentu je ověření využití mobilního EEG pro obdobné průzkumy a zejména zúročení jeho výhod oproti klasickým EEG přístrojům (viz kapitola 5.4.2) při zachování dostatečné kvality získaných výsledků. Bylo ověřeno jak rešerší dosavadních vědeckých studií, tak ověřením během měření v rámci výuky na FD a rovněž samotnou realizací experimentu na SIMU v IATCC, že využití obdobných mobilních řešení je akceptovatelnou alternativou ke klasickým EEG přístrojům.

Hlavním přínosem tohoto výzkumu je další podpora výzkumu hlasové analýzy a zejména ověření, že hlasová analýza je schopna identifikovat rozdíly v bdělosti a únavě.

### **7.3. Limitace**

Hlavní limitací provedeného měření je počet probandů. Pro statistické vyhodnocení je 10 probandů málo, nicméně je potřeba vzít v potaz finanční a personální a časovou náročnost celého měření a jeho unikátnost. Z hlediska ekologické validity je to cenný vzorek – jednalo se o licencované řídicí letového

provozu, v reálných podmínkách během běžného sledu směn, jak bylo uvedeno v kapitole 7.2).

Navíc se z technických důvodů ze zpracování musela vypustit data od probanda 2 z úlohy PVT a Oddbal během večerního měření, jelikož byly úlohy výjimečně realizovány na jiném notebooku, což vedlo k výraznému ovlivnění naměřených reakčních časů (viz kapitoly 6.1.3 a 6.1.4). Rovněž chybí data z úlohy Oddball u probanda 1 během ranního měření – vlivem chybného nastavení parametrů úlohy nedošlo k uložení výsledků z tohoto měření. Tato data nebylo možné zpětně dohledat.

I proto je potřeba výsledky brát jako podklad pro další výzkum na mnohem větším vzorku. Jako realizovatelné se ukazuje poskytnutí většího množství hlasových dat k analýze a výsledky ve vybraných parametrech porovnávat na základě dalších poskytnutých informací o aktuálních podmínkách, ve kterých byla hlasová data získána:

- provozní podmínky - provozní zátěž, komplexita provozu, meteorologické podmínky, aktivace omezených prostorů, typ prostoru odpovědnosti apod.,
- podmínky plynoucí z rozpisu směn - pořadí směny v bloku směn, druh směny (denní, noční), doba od počátku směny apod.,
- podmínky plynoucí z osobnosti řídicího – délka praxe řídicího letového provozu, věk, chronotyp apod.

Je nutné v rámci limitací zmínit i nevýhody mobilního řešení, které jsou uvedeny v odborné literatuře (detailně jsou negativa mobilního EEG zmíněna v kapitole 5.4.2). Ve srovnání s lékařskými zařízeními trpí několika nedostatky, včetně nižší kvality signálu a nepřesného načasování. Jiná studie naznačuje, že poměr signálu k šumu (signal to noise ratio - SNR) je slabou stránkou těchto zařízení. [31] Dalším uváděným problémem je, že elektrody Emotiv EPOC jsou schopné zaznamenávat pouze ze 14 pevných pozic elektrod. Jak omezený počet senzorů na středových místech, tak rigidní povaha pole omezují použití těchto zařízení na určitá paradigmatata EEG nebo ERP. [80]

LVA je rozvíjející se technologie a stejně jako u většiny komerčních produktů je její vnitřní fungování chráněno. Ačkoli naše laboratorní výsledky naznačují, že metriky únavy LVA zachycují aspekty jednotlivých úrovní únavy ve vztahu k EEG nebo psychologickým proměnným, nejsme nyní schopni dokumentovat mechanismy,

kterými je LVA schopna to udělat. I to uvádí odborná literatura jako omezení, které je nutné vzít v potaz. [51]

#### **7.4. Spolupráce a podpora**

V jednotlivých částech disertační práce byla zmiňována podpora a spolupráce s externími subjekty. V následujících odstavcích jsou uvedeny explicitně základní formy spolupráce a podpory, které byly pro realizaci tohoto výzkumu naprosto neodmyslitelné.

V rámci **Studentské grantové soutěže ČVUT (SGS)** byl podpořen projekt Identifikace a sledování aktuální míry únavy řídicích letového provozu (SGS19/081/OHK2/1T/16).

Veškeré výstupy projektu jsou využity jako součást této disertační práce a jsou dokumentovány v závěrečné zprávě z projektu. Jednotlivé části projektu odpovídají kapitolám připravované disertační práce - metodika realizace a vyhodnocení měření, zpracované výsledky realizovaných měření.

Za hlavní výsledek je považována vlastní realizace měření na simulátoru v IATCC Jeneč, která by s ohledem na výše uvedené důvody nebyla bez projektové podpory prakticky realizovatelná nebo alespoň ne v zamýšleném rozsahu, což by značně snižovalo statistickou věrohodnost celého měření.

Dalším cílem je provedení "validačního" měření se studenty předmětu Teorie a řízení spolehlivosti v dopravě na Ústavu dopravní telematiky, jehož cílem bylo porovnání a kalibrace výsledků z certifikovaného EEG přístroje Ústavu dopravní telematiky a nově pořízeného mobilního řešení.

Významným výsledkem projektu nad rámec cílů uvedených v grantovém přihlášce je rozšíření vybavení laboratoří ČVUT FD o mobilní EEG, jež do budoucna umožní realizaci měření i mimo prostory Ústavu dopravní telematiky díky jednoduché manipulaci a přepravě mobilního zařízení, jeho kompatibilitě s jakýmkoliv notebookem a rychlosti přípravy probanda. Díky tomuto se výrazně rozšíří možnosti výzkumných projektů či závěrečných prací. Výstupem projektu je manuál pro budoucí uživatele mobilního EEG.

Projekt se s ohledem na specifické podmínky měření řízení letového provozu a zapojení kvalifikovaných řídicích letového provozu stal neodmyslitelným základem pro řešení dané problematiky.

Naprosto nerealizovatelný by byl tento výzkum bez podpory a spolupráce ze strany představitelů **ŘLP ČR, s. p.** a skupiny FSAG. Bylo umožněno využití vytíženého radarového simulátoru, zapojení kvalifikovaných řídicích letového provozu a dalšího personálu, který byl pro provoz simulátoru a realizace jednotlivých měření nezbytný. Celkově se jednalo významnou personální a tudíž i finanční podporu.

Úzká spolupráce probíhala rovněž s představiteli **Letecké školy** (Czech Air Navigation Institute – CANI), zejména v počátečních fázích výzkumu, kdy byl konzultovány zkušenosti s využitím hlasové analýzy pro účely sledování míry stresu žáků ve výcviku na řídicí letového provozu, a rovněž v rámci přípravy pilotního měření.

Dlouhodobá spolupráce probíhala se zástupcem firmy **ANIS Group, a. s.** (Ing. Zajíček), která poskytovala analýzu hlasu a tato spolupráce zahrnovala diskuse týkající se realizace vlastního výzkumu (forma hlasových záznamů, jejich formát, forma předání a vyhodnocení), jeho cílů, volbu vhodných sledovaných parametrů hlasu, které by mohly sloužit k identifikaci únavy a další nezbytné konzultace.

V neposlední řadě je nutné uvést navázanou spolupráci se **zástupci Národního ústavu duševního zdraví (NÚDZ)** a **Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy**, jejíž zástupci poskytli konzultace a sdílení svých zkušeností s realizací obdobných výzkumů, podporu během přípravy měření a zejména odborné vyhodnocení EEG záznamů získaných v průběhu celého projektu.

## **7.5. Publikace**

Dosavadní poznatky týkající se požadavků na implementaci FRMS u poskytovatelů letových provozních služeb byly prezentovány na Safety konferenci LKPR 2017 konané na Letišti Václava Havla Praha dne 23. 11. 2017.

Příspěvek s tématem „*Požadavky na Fatigue Risk Management System a jeho implementaci u poskytovatelů letových provozních služeb*“ byl publikován ve sborníku konference. [65]



Při příležitosti Safety konference 2018 konané na Letišti Václava Havla Praha dne 21. 11. 2018 byl publikován příspěvek s názvem „*Experimentální způsoby měření únavy u řídicích letového provozu*“, kde byly již blíže přiblíženy způsoby sledování aktuální míry únavy se zaměřením na objektivní metody. V rámci tohoto příspěvku bylo rovněž představeno pilotní měření realizované na Letecké škole ŘLP ČR, s. p. (viz kapitola 5.1.1) a jeho závěry.

Jedním z dalších výstupů je *Výzkumná zpráva* z SGS, kterým byl výzkum podpořen (viz kapitola 7.4).

Návrh měření a poznatky z prvních několika běhů simulace byl prezentován na konferenci Smart City Symposium Prague 2020 dne 25. 6. 2020, a pod názvem „*Identification and monitoring of traffic operators' fatigue level*“ byl publikován ve sborníku z této konference. [63]

Návrh, průběh a výsledky výzkumu byly zaslány k publikaci článku do zahraničního vědeckého časopisu *Accident Analysis and Prevention*. V době vydání této disertační práce je zmíněný článek v recenzním řízení.

### **ATM Awards 2020**

Tento projekt, v angličtině označený jako „*Identification and monitoring of ATCOs' fatigue*“, byl v listopadu 2020 přihlášen podnikem ŘLP ČR do soutěže ATM Awards 2020 v kategorii „*Research, Innovation and Environment*“. V prosinci byla ze strany pořadatele soutěže (Air Traffic Management Magazine and Unmanned Airspace) potvrzena nominace projektu do užšího výběru. V březnu 2021 pak bylo projektu uděleno druhé místo spojené s titulem „*Runner-Up*“.



Obrázek 11 – Logo soutěže ATM Awards 2020 a titul související s druhým místem

## 8. ZÁVĚR

Tento dokument je disertační prací na téma Identifikace a sledování aktuální míry únavy řídicích letového provozu, která je výsledkem doktorského studia a práce na rámcovém tématu Využití metodiky EEG pro chování operátora v dopravě.

Disertační práce uvádí základní pojmy z oblasti únavy, analyzuje oblast řízení únavy z pohledu legislativy a to pro jednotlivé druhy dopravy. Hluběji se zaměřuje na dopravu leteckou a konkrétně na nově přijatou legislativou v oblasti poskytování letových navigačních služeb, která klade na poskytovatele nové povinnosti týkající se řízení rizik souvisejících s únavou.

V této souvislosti práce uvádí požadavky, principy a součásti nově budovaného systému řízení rizik souvisejících s únavou (Fatigue Risk Management System), který bude u poskytovatelů letových provozních služeb jako nadstavba k již existujícímu systému řízení provozní bezpečnosti (Safety Management System) dalším stupněm ke zvýšení provozní bezpečnosti (safety), jež je pro poskytovatele služeb tím nejvyšším cílem. V rámci teoretického úvodu jsou identifikovány nedostatky v metodách pro řízení rizik souvisejících s únavou, konkrétně se práce hlouběji zabývá objektivními metodami pro sledování únavy. Za tímto účelem je v teoretické části práce provedena obsáhlá rešerše vědeckých publikací s cílem popsat aktuální stav řešené problematiky a z tohoto aktuálního stavu dále vycházet při realizaci vlastního výzkumu.

Detailně se pak práce ve své praktické části zabývá realizovaným výzkumem v oblasti identifikace a sledování aktuální míry únavy řídicích letového provozu. Existují mnohé vědecké metody, které únavu prokazatelně odhalí, ale využití většiny z nich je bohužel prakticky nemožné vzhledem k značnému narušení běžného komfortu řídicích letového provozu. Proto byl výzkum zaměřen na metodu, která běžný provoz nijak neovlivní a je tudíž ideálním kandidátem na praktické využití, na hlasovou analýzu. Jelikož tato metoda nebyla dosud v této oblasti využita a není její věrohodnost vědecky ověřena, bylo v rámci disertační práce využito vědecky ověřených metod (zejména EEG) pro validaci metody hlasové analýzy a byly navrženy způsoby využití hlasové analýzy pro účely identifikace a měření aktuální míry únavy operátorů v dopravě, konkrétně v prostředí řízení letového provozu (viz kapitola 7.1).

Práce popisuje realizovaný výzkum, jeho přípravu, průběh, použité metody a výsledky. Je nutné zmínit, že se jednalo z několika pohledů o unikátní experiment, rešerší dostupných zdrojů nebyl výzkum s obdobnými podmínkami v tomto rozsahu realizován. Jednalo se o výzkum v téměř reálných podmínkách řízení letového provozu, účastníky experimentu byli kvalifikovaní řidiči, bylo využito moderního mobilního EEG zařízení pro validaci neověřené metody hlasové analýzy.

Závěrem výzkumu jsou argumenty podporující tvrzení, že hlasová analýza je schopna identifikovat rozdíly v bdělosti a únavě, protože její výsledky odpovídají výsledkům EEG (změny hlasu v mnoha případech odpovídají změnám elektrické aktivity mozku v určitých pásmech a určitých elektrodách) i výsledkům dalších využitých metod.

V rámci práce byly rovněž identifikovány hlasové parametry, které jsou na základě provedených měření považovány za ideální kandidáty pro sledování aktuální míry únavy řídicích letového provozu, a v rámci diskuse bylo rovněž uvedeno možné využití pro sledování dalších emočních parametrů z hlasu (stres apod.), které mohou mít na poskytování služeb, nejen letových provozních, ale obecně služeb operátorů v dopravě, významný vliv z pohledu provozní bezpečnosti.

Využití hlasové analýzy jako prostředku pro identifikaci a monitorování aktuální míry únavy řídicích letového provozu má potenciál doplnit v současnosti budované systémy řízení rizik souvisejících s únavou o chybějící nástroj objektivního hodnocení. Jeho praktická implementace do FRMS by po vyřešení etických a právních otázek vedla k zásadnímu zvýšení provozní bezpečnosti poskytovaných služeb. Potenciál využití této metody je navíc pro různé druhy provozu, kdy operátor nepřetržitě komunikuje s účastníky provozu.

## Seznam zkratek

ACC	Area Control Centre
AMS	Airport Monitoring and Control System
APP	Approach Control Office
ATC	Air Traffic Control
ATCO	Air Traffic Controller
ATM	Air Traffic Management
ATS	Air Traffic Services
AWOS	Automated Meteorological Observation System
A/G	Air/Ground (komunikace)
BCI	Brain-Computer Interface
BESIP	Bezpečnost silničního provozu (oddělení Ministerstva dopravy ČR)
BLE	Bluetooth Low Energy
CANSO	Civil Air Navigation Services Organization
E2000	EUROCAT 2000
EC	Executive Controller
ECAC	European Civil Aviation Conference
EEG	Elektroencefalografie
EOG	Elektrookulografie
ER	Error Rate
ERP	Event-related Potential
EU	Evropská unie
EVE	evening
FDO	Flight Data Operator
FMEG	Fatigue Management Expert Group
FRMS	Fatigue Risk Management System
FRMSTF	Fatigue Risk Management System Task Force
FSAG	Fatigue Safety Action Group
G/G	Ground/Ground (komunikace)
IATCC	Integrated Air Traffic Control Centre
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IDP	Information Data Processing
KSS	Karolinska Sleepiness Scale

LVA	Layered Voice Analysis
MEQ	Morningness-Eveningness Questionnaire
MMN	Mismatch negativity
MOR	morning
NOTAM	Notice To Airmen
NÚDZ	Národní ústav duševního zdraví
ODD	Oddball Task
OPSUP	Operational Position of a Supervisor
PC	Planning Controller
PEBL	Psychology Experiment Building Language
PPT	Physiological and Psychological Test
PSD	Power Spectral Density
PVT	Psychomotoric Vigilance Task, Perceptual Vigilance Task
RRS	Recording and Replay System
RT	Reaction Time
ŘLP ČR	Řízení letového provozu České republiky
SARPs	Standards and Recommended Practices
SGS	Studentská grantová soutěž
SIGMET	Significant Meteorological Information
SIM(U)	simulátor, simulace
SMS	Safety Management Systém
SSVEP	Steady State Visually Evoked Potential
TAF	Terminal Aerodrome Forecast
TMA	Terminal Control/Manoeuvring Area
TWR	Tower
ÚLZ	Ústav leteckého zdravotnictví
VCS	Voice Communication Systém
WALDO	Web Accessed Library of Data Objects
WS	Watch Supervisor

## Seznam použité literatury

- [1] Abbass, H. A., Tang, J., Ellejmi, M., & Kirby, S. (2014). Visual and auditory reaction time for air traffic controllers using quantitative electroencephalograph (QEEG) data. *Brain Inform*, 1(1-4), 39-45. <https://doi.org/10.1007/s40708-014-0005-8>
- [2] Akerstedt, T. (2000). Consensus Statement: Fatigue and accidents in transport operations. *Journal of Sleep Research*, 9(4), 395-395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.2000.00228.x>
- [3] Akerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Int J Neurosci*, 52(1-2), 29-37. <https://doi.org/10.3109/00207459008994241>
- [4] Akerstedt, T., & Wright, K. P., Jr. (2009). Sleep Loss and Fatigue in Shift Work and Shift Work Disorder. *Sleep Med Clin*, 4(2), 257-271. doi: 10.1016/j.jsmc.2009.03.001
- [5] Alluisi, E. A., Coates, G. D., & Morgan, B. B. (1977). Effects of Temporal Stressors on Vigilance and Information Processing. In R. R. Mackie (Ed.), *Vigilance: Theory, Operational Performance, and Physiological Correlates* (pp. 361-421). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2529-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2529-1_20)
- [6] ANISH, Josh. What Time of Day do Most Accidents Occur? [online]. 2012 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <https://coverhound.com/blog/post/what-time-of-day-do-most-accidents-occur>
- [7] Arsalan, A., Majid, M., Butt, A. R., & Anwar, S. M. (2019). Classification of Perceived Mental Stress Using A Commercially Available EEG Headband. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 23(6), 2257-2264. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2019.2926407>
- [8] Barham, M. P., Clark, G. M., Hayden, M. J., Enticott, P. G., Conduit, R., & Lum, J. A. G. (2017). Acquiring research-grade ERPs on a shoestring budget: A comparison of a modified Emotiv and commercial SynAmps EEG system. *Psychophysiology*, 54(9), 1393-1404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/psyp.12888>
- [9] Baykaner, K. R., Huckvale, M., Whiteley, I., Andreeva, S., & Ryumin, O. (2015). Predicting Fatigue and Psychophysiological Test Performance from Speech for Safety-Critical Environments [Original Research]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 3(124). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2015.00124>
- [10] Beatty, J., Greenberg, A., Deibler, W. P., & O'Hanlon, J. F. (1974). Operant control of occipital theta rhythm affects performance in a radar monitoring task. *Science*, 183(4127), 871-873. <https://doi.org/10.1126/science.183.4127.871>
- [11] Begum, S. (2013, 6-9 Oct. 2013). Intelligent driver monitoring systems based on physiological sensor signals: A review. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013),

- [12] Bernhardt, K. A., Poltavski, D., Petros, T., Ferraro, F. R., Jorgenson, T., Carlson, C., Drechsel, P., & Iseminger, C. (2019). The effects of dynamic workload and experience on commercially available EEG cognitive state metrics in a high-fidelity air traffic control environment. *Applied Ergonomics*, 77, 83-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.01.008>
- [13] Bills, A. G. (1931). Blocking: a new principle of mental fatigue. *The American Journal of Psychology*, 43, 230-245. <https://doi.org/10.2307/1414771>
- [14] Blackhart, G. C., Minnix, J. A., & Kline, J. P. (2006). Can EEG asymmetry patterns predict future development of anxiety and depression? A preliminary study. *Biol Psychol*, 72(1), 46-50. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.06.010>
- [15] Boksem, M. A., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Brain Res Cogn Brain Res*, 25(1), 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011>
- [16] Borbely, A. A., Baumann, F., Brandeis, D., Strauch, I., & Lehmann, D. (1981). Sleep deprivation: effect on sleep stages and EEG power density in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 51(5), 483-495. doi: 10.1016/0013-4694(81)90225-x
- [17] Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neurosci Biobehav Rev*, 44, 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.10.003>
- [18] Brenner, M., & Cash, J. R. (1991). Speech analysis as an index of alcohol intoxication--the Exxon Valdez accident. *Aviat Space Environ Med*, 62(9 Pt 1), 893-898.
- [19] Brookings, J. B., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biol Psychol*, 42(3), 361-377. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05167-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05167-8)
- [20] Brown, T., Senter, S., & Jr, R. (2003). Ability of the Vericator to Detect Smugglers at a Mock Security Checkpoint. 74.
- [21] Burattini, Chiara & Piccardi, Laura & Ferlazzo, Fabio & Giannini, Anna maria & Bisegna, Fabio. (2014). Positive effects of blue light on executive functions: future implications for air traffic controllers. *Italian Journal of Aerospace Medicine*. 10. 24-35.
- [22] Cavanagh, J. F., Zambrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. (2012). Theta lingua franca: a common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, 49(2), 220-238. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01293.x>
- [23] Chai, R., Tran, Y., Naik, G. R., Nguyen, T. N., Ling, S. H., Craig, A., & Nguyen, H. T. (2016, 16-20 Aug. 2016). Classification of EEG based-mental fatigue using principal component analysis and Bayesian neural network. 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC),

- [24] Craig, A., Tran, Y., Wijesuriya, N., & Nguyen, H. (2012). Regional brain wave activity changes associated with fatigue. *Psychophysiology*, 49(4), 574-582. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01329.x>
- [25] Dampousse, K. R., Pointon, L., Upchurch, D., & Moore, R. K. (2008). *Assessing the Validity of Voice Stress Analysis (VSA) Tools in a Jail Setting in Oklahoma City, Oklahoma, 2006* [distributor]. <https://doi.org/10.3886/ICPSR20625.v1>
- [26] Dasari, D., Crowe, C., Ling, C., Zhu, M., & Ding, L. (2010). EEG Pattern Analysis for Physiological Indicators of Mental Fatigue in Simulated Air Traffic Control Tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(3), 205-209. <https://doi.org/10.1177/154193121005400304>
- [27] Díaz M, H., Cid, F. M., Otárola, J., Rojas, R., Alarcón, O., & Cañete, L. (2019). EEG Beta band frequency domain evaluation for assessing stress and anxiety in resting, eyes closed, basal conditions. *Procedia Computer Science*, 162, 974-981. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.075>
- [28] Dijk, D.-J., Brunner, D. P., Beersma, D. G. M., & Borbély, A. A. (1990). Electroencephalogram Power Density and Slow Wave Sleep as a Function of Prior Waking and Circadian Phase. *Sleep*, 13(5), 430-440. doi: 10.1093/sleep/13.5.43
- [29] Dinges, D. F., & Powell, J. W. (1985). Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 17(6), 652-655. <https://doi.org/10.3758/BF03200977>
- [30] Driver Fatigue is an important cause of road crashes. [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.smartmotorist.com/traffic-and-safety-guideline/driver-fatigue-is-an-important-cause-of-road-crashes.html>
- [31] Duvinage, M., Castermans, T., Petieau, M., Hoellinger, T., Cheron, G., & Dutoit, T. (2013). Performance of the Emotiv EPOC headset for P300-based applications. *Biomed Eng Online*, 12, 56. <https://doi.org/10.1186/1475-925x-12-56>
- [32] Eissfield, H. a Broach, D. (2002). Staffing the ATM system: The selection for air traffic controllers. *ATC - Specific tests*. str. 85 - 96.
- [33] Elkins, A. (2010). *Evaluating the Credibility Assessment Capability of Vocal Analysis Software*.
- [34] Elkins, A. (2011). *Vocalic Markers of Deception and Cognitive Dissonance for Automated Emotion Detection Systems*
- [35] Elkins, A. C., & Burgoon, J. (2010). *Validating Vocal Analysis Software to Assess Credibility in Interpersonal Interaction: A Multilevel Factor Analytic Approach*.
- [36] Elkins, A., Burgoon, J., & Nunamaker, J. (2012). *Vocal Analysis Software for Security Screening: Validity and Deception Detection Potential*. Homeland Security Affairs.



- [37] Elliot, Hannah. Most Dangerous Times To Drive [online]. 2009 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://www.forbes.com/2009/01/21/car-accident-times-forbeslife-cx\\_he\\_0121driving.html](http://www.forbes.com/2009/01/21/car-accident-times-forbeslife-cx_he_0121driving.html)
- [38] Eriksson, A., Lacerda, F. (2007), Charlatanry in forensic speech science: A problem to be taken seriously, *International Journal of Speech, Language and the Law* 14, 169–193.
- [39] Evropská dohoda o práci osádek vozidel v mezinárodní silniční dopravě (AETR), vyhlášená pod č. 108/1976 Sb.
- [40] Fatigue Management Guide for Air Traffic Service Providers, First Edition, CANSO, ICAO, IFATCA, 2016
- [41] Fatigue Monitoring and Warning: Informační leták k technologii LVA. 2018. Praha: Screening Solutions s.r.o.
- [42] Fatigue statistics. In: Transport Accident Commission [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.tac.vic.gov.au/road-safety/statistics/summaries/fatigue-statistics>
- [43] Gevins, A., Leong, H., Du, R., Smith, M. E., Le, J., DuRousseau, D., Zhang, J., & Libove, J. (1995). Towards measurement of brain function in operational environments. *Biological Psychology*, 40(1), 169-186. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05105-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05105-8)
- [44] Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cereb Cortex*, 7(4), 374-385. <https://doi.org/10.1093/cercor/7.4.374>
- [45] Gillberg, M., Kecklund, G., & Akerstedt, T. (1994). Relations between performance and subjective ratings of sleepiness during a night awake. *Sleep*, 17(3), 236-241. <https://doi.org/10.1093/sleep/17.3.236>
- [46] Greeley, H. P., Berg, J., Friets, E., Wilson, J., Greenough, G., Picone, J., Whitmore, J., & Nesthus, T. (2007). Fatigue estimation using voice analysis. *Behav Res Methods*, 39(3), 610-619. <https://doi.org/10.3758/bf03193033>
- [47] Haluza, D., Schmidt, V. M., & Blasche, G. (2019). Time course of recovery after two successive night shifts: A diary study among Austrian nurses. *J Nurs Manag*, 27(1), 190-196. doi: 10.1111/jonm.12664
- [48] Harnsberger, J. D., Hollien, H., Martin, C. A., & Hollien, K. A. (2009). Stress and deception in speech: evaluating layered voice analysis. *J Forensic Sci*, 54(3), 642-650. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01026.x>
- [49] Hawken, Abe. Muslim train driver who went through two red lights and crashed causing days of delays had gone without any food or drink for 15 HOURS because of Ramadan. In: MailOnline [online]. 2016 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-3750195/Muslim-train-driver-went-two-red-lights-crash-gone-without-food-drink-15-hours-Ramadan.html?ito=embedded>
- [50] Hendl, J. (2015) Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. Páté, rozšířené vydání. Praha: Portál, 2015. ISBN 978-80-262-0981-2.

- [51] Hobson, J. L., Mayew, W. J., & Venkatachalam, M. (2012). Analyzing Speech to Detect Financial Misreporting. *Journal of Accounting Research*, 50(2), 349-392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1475-679X.2011.00433.x>
- [52] Horne, J. A., & Baulk, S. D. (2004). Awareness of sleepiness when driving. *Psychophysiology*, 41(1), 161-165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1469-8986.2003.00130.x>
- [53] Horne, J. A., & Pettitt, A. N. (1985). High incentive effects on vigilance performance during 72 hours of total sleep deprivation. *Acta Psychologica*, 58(2), 123-139. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-6918\(85\)90003-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-6918(85)90003-4)
- [54] Huettel, S. A., & McCarthy, G. (2004). What is odd in the oddball task? Prefrontal cortex is activated by dynamic changes in response strategy. *Neuropsychologia*, 42(3), 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.07.009>
- [55] Inovace na technologickém poli. Screening Solutions [online]. [cit. 2018-09-13]. Dostupné z: <https://www.screening-solutions.com/inovace-na-technologickem-poli>
- [56] Jackson, M. L., & Van Dongen, H. P. A. (2011). Cognitive effects of sleepiness. In M. J. Thorpy & M. Billiard (Eds.), *Sleepiness: Causes, Consequences and Treatment* (pp. 72-81). Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI: 10.1017/CBO9780511762697.009>
- [57] Jensen, O., & Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *Eur J Neurosci*, 15(8), 1395-1399. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x>
- [58] Johns, M. W. (1991). A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *Sleep*, 14(6), 540-545. <https://doi.org/10.1093/sleep/14.6.540>
- [59] Kamzanova, A. T., Matthews, G., Kustubayeva, A. M., & Jakupov, S. M. (2011). EEG indices to time-on-task effects and to a workload manipulation (Cueing). *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 80, 19-22.
- [60] Kaplan, K. A., Itoi, A., & Dement, W. C. (2007). Awareness of sleepiness and ability to predict sleep onset: can drivers avoid falling asleep at the wheel? *Sleep Med*, 9(1), 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2007.02.001>
- [61] Kdo jsme. In: BESIP [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-rizeni-vozidla/nebezpeci-unavy>
- [62] Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Brain Res Rev*, 29(2-3), 169-195. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(98)00056-3)
- [63] Kouba, P. - Šmotek, M., - Tichý, T. (2020) Identification and monitoring of traffic operators' fatigue level. In: 2020 Smart City Symposium Prague. New York: IEEE Press, 2020. ISBN 978-1-7281-6821-0. Stať ve sborníku ze zahraniční prestižní konference
- [64] Kouba, P. Šmotek, M. (2018) Experimentální způsoby měření únavy u řídicích letového provozu. In: Safety & Security Conference Prague 2018.

Praha: IRIS - Rudolf Valenta, 2018. p. 79-84. ISBN 978-80-904317-5-1. Stať ve sborníku z mezinárodní konference česky

- [65] Kouba, P. (2017) Požadavky na Fatigue Risk Management System a jeho implementaci u poskytovatelů letových provozních služeb. In: Sborník Safety a security konference LKPR 2017.
- [66] Krishnan, V. K., Dasari, D., & Ding, L. (2014). EEG Correlates of Fluctuation in Cognitive Performance in an Air Traffic Control Task.
- [67] Lacerda, F. (2009). LVA technology: The illusion of lie detection, in P. Branderud & H. Traunmuller, eds. FONETIK 2009, Department of Linguistics, Stockholm University.
- [68] Lajdová, D. (2009) Neparametrické metody v systému STATISTICA [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-6-29]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/u5yf3/Bakalarka.pdf>. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita.
- [69] Langr, D. (2015) Prostředky a metody pro podporu selekce a přípravy vojenských specialistů řízení letového provozu (Disertační práce). Univerzita obrany, Brno.
- [70] Lewis, R. S., Weekes, N. Y., & Wang, T. H. (2007). The effect of a naturalistic stressor on frontal EEG asymmetry, stress, and health. *Biological Psychology*, 75(3), 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.03.004>
- [71] Lorenzo, I., Ramos, J., Arce, C., Guevara, M. A., & Corsi-Cabrera, M. (1995). Effect of total sleep deprivation on reaction time and waking EEG activity in man. *Sleep*, 18(5), 346-354.
- [72] Lorist, M. M., Klein, M., Nieuwenhuis, S., De Jong, R., Mulder, G., & Meijman, T. F. (2000). Mental fatigue and task control: planning and preparation. *Psychophysiology*, 37(5), 614-625.
- [73] Lubar, J. F., Swartwood, M. O., Swartwood, J. N., & O'Donnell, P. H. (1995). Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in T.O.V.A. scores, behavioral ratings, and WISC-R performance. *Biofeedback Self Regul*, 20(1), 83-99. <https://doi.org/10.1007/bf01712768>
- [74] Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-related Potential Technique*. Cambridge: MIT press.
- [75] Mansouri, F. A., Tanaka, K., & Buckley, M. J. (2009). Conflict-induced behavioural adjustment: a clue to the executive functions of the prefrontal cortex. *Nat Rev Neurosci*, 10(2), 141-152. <https://doi.org/10.1038/nrn2538>
- [76] Maquet, P. (2001). The role of sleep in learning and memory. *Science*, 294(5544), 1048-1052. <https://doi.org/10.1126/science.1062856>
- [77] Maskeliunas, R., Damasevicius, R., Martisius, I., & Vasiljevas, M. (2016). Consumer-grade EEG devices: are they usable for control tasks? *PeerJ*, 4, e1746. <https://doi.org/10.7717/peerj.1746>
- [78] Mayew, W. J., & Venkatachalam, M. (2012). The Power of Voice: Managerial Affective States and Future Firm Performance. *The Journal of Finance*, 67(1), 1-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.2011.01705.x>

- [79] Mayew, W. J., & Venkatachalam, M. (2013). Speech Analysis in Financial Markets. *Foundations and Trends® in Accounting*, 7(2), 73-130. <https://doi.org/10.1561/14000000024>
- [80] Morán, A., & Soriano, M. C. (2018). Improving the quality of a collective signal in a consumer EEG headset. *PloS one*, 13(5), e0197597-e0197597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197597>
- [81] Může za to únava? Návěstidlo "Stůj" projíždí stále více vlaků. In: ČTK [online]. 2016 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://www.tyden.cz/rubriky/domaci/doprava/muze-za-to-unava-navestidlo-stuj-projizdi-stale-vice-vlaku\\_405358.html](http://www.tyden.cz/rubriky/domaci/doprava/muze-za-to-unava-navestidlo-stuj-projizdi-stale-vice-vlaku_405358.html)
- [82] Nařízení Komise (EU) 2015/340 ze dne 20. února 2015, kterým se stanoví technické požadavky a správní postupy týkající se průkazů způsobilosti a osvědčení řídicích letového provozu podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 216/2008, kterým se mění prováděcí nařízení Komise (EU) č. 923/2012 a kterým se zrušuje nařízení Komise (EU) č. 805/2011
- [83] Nařízení Rady (EHS) č. 3820/85 ze dne 20. prosince 1985 o harmonizaci určitých sociálních právních předpisů v silniční dopravě
- [84] Nařízení vlády č. 168/2002 Sb., kterým se stanoví způsob organizace práce a pracovních postupů, které je zaměstnavatel povinen zajistit při provozování dopravy dopravními prostředky ze dne 25. března 2002
- [85] Nebezpečí únavy. In: BESIP [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-rizeni-vozidla/nebezpeci-unavy>
- [86] Nuwer, M. R., Comi, G., Emerson, R., Fuglsang-Frederiksen, A., Guérit, J. M., Hinrichs, H., Ikeda, A., Luccas, F. J., & Rappelsburger, P. (1998). IFCN standards for digital recording of clinical EEG. *International Federation of Clinical Neurophysiology. Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 106(3), 259-261. [https://doi.org/10.1016/s0013-4694\(97\)00106-5](https://doi.org/10.1016/s0013-4694(97)00106-5)
- [87] O'Hanlon, J. F., & Beatty, J. (1977). Concurrence of Electroencephalographic and Performance Changes During a Simulated Radar Watch and Some Implications for the Arousal Theory of Vigilance. In R. R. Mackie (Ed.), *Vigilance: Theory, Operational Performance, and Physiological Correlates* (pp. 189-201). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2529-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2529-1_11)
- [88] Onton, J., Delorme, A., & Makeig, S. (2005). Frontal midline EEG dynamics during working memory. *NeuroImage*, 27(2), 341-356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.04.014>
- [89] Pilcher, J. J., & Huffcutt, A. I. (1996). Effects of sleep deprivation on performance: a meta-analysis. *Sleep*, 19(4), 318-326. <https://doi.org/10.1093/sleep/19.4.318>
- [90] Prováděcí nařízení Komise (EU) 2017/373 ze dne 1. března 2017, kterým se stanoví společné požadavky na poskytovatele služeb v oblasti uspořádání letového provozu / letových navigačních služeb a jiných funkcí sítě uspořádání letového provozu a dohled nad nimi, zrušují nařízení (ES) č. 482/2008, prováděcí nařízení (EU) č. 1034/2011, (EU) č. 1035/2011 a (EU) 2016/1377 a mění nařízení (EU) č. 677/2011

- [91] Robins, Renee. Moderní dispečinky. In: Control Engineering [online]. 2009 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/moderni-dispecinky/>
- [92] Rosekind, M. R., Gander, P. H., Miller, D. L., Gregory, K. B., Smith, R. M., Weldon, K. J., Co, E. L., McNally, K. L., & Lebacqz, J. V. (1994). Fatigue in operational settings: examples from the aviation environment. *Hum Factors*, 36(2), 327-338. <https://doi.org/10.1177/001872089403600212>
- [93] Saito, I., Fujiwara, O., Utsuki, N., Mizumoto, C., & Arimori, T. (1980). Hypoxia-induced fatal aircraft accident revealed by voice analysis. *Aviat Space Environ Med*, 51(4), 402-406.
- [94] Sánchez Reolid, Roberto & García, Arturo & Vicente-Querol, Miguel & Fernández-Aguilar, Luz & López Bonal, María & González, Antonio. (2018). Artificial Neural Networks to Assess Emotional States from Brain-Computer Interface. *Electronics*. 7. 384. [10.3390/electronics7120384](https://doi.org/10.3390/electronics7120384).
- [95] Sanders, A. F., & Hoogenboom, W. (1970). On the effects of continuous active work on performance. *Acta Psychologica*, Amsterdam, 33, 414-431. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(70\)90151-4](https://doi.org/10.1016/0001-6918(70)90151-4)
- [96] Scheeringa, R., Petersson, K. M., Oostenveld, R., Norris, D. G., Hagoort, P., & Bastiaansen, M. C. (2009). Trial-by-trial coupling between EEG and BOLD identifies networks related to alpha and theta EEG power increases during working memory maintenance. *NeuroImage*, 44(3), 1224-1238. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.041>
- [97] Schmidt C, Xhrouet M, Hamacher M, Delloye E, LeGoff C, Cavalier E, Collette F, Vandewalle G. Light exposure via a head-mounted device suppresses melatonin and improves vigilant attention without affecting cortisol and comfort. *Psych J*. 2018 Dec;7(4):163-175. doi: 10.1002/pchj.215. Epub 2018 Jun 26. PMID: 29943899.
- [98] Sehnoutka, Petr. Na dráze zabíjí únava strojvůdců. In: MF DNES [online]. 2003 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: [http://zpravy.idnes.cz/na-draze-zabiji-unava-strojvudcu-d4e-/domaci.aspx?c=A031118\\_130916\\_praha\\_ton](http://zpravy.idnes.cz/na-draze-zabiji-unava-strojvudcu-d4e-/domaci.aspx?c=A031118_130916_praha_ton)
- [99] Slama H, Deliens G, Schmitz R, Peigneux P, Leproult R. Afternoon nap and bright light exposure improve cognitive flexibility post lunch. *PLoS One*. 2015 May 27;10(5):e0125359. doi: 10.1371/journal.pone.0125359. PMID: 26016658; PMCID: PMC4446306.
- [100] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/49/ES ze dne 29. dubna 2004 o bezpečnosti železnic Společenství a o změně směrnice Rady 95/18/ES o vydávání licencí železničním podnikům a směrnice 2001/14/ES o přidělování kapacity železniční infrastruktury, zpoplatnění železniční infrastruktury a o vydávání osvědčení o bezpečnosti (Směrnice o bezpečnosti železnic)
- [101] Směrnice pro činnost oddělení SIMU IATCC, Směrnice č. SM/08/0014, verze 3.2, ŘLP ČR, s. p.
- [102] Smit, A. S., Eling, P. A. T. M., & Coenen, A. M. L. (2004). Mental effort causes vigilance decrease due to resource depletion. *Acta Psychologica*, 115(1), 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.11.001>

- [103] Šmotek, M. (2018) Vyhodnocení objektivních parametrů bdělosti během simulace - pilotní měření. Praha.
- [104] Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, 437(7063), 1272-1278. <https://doi.org/10.1038/nature04286>
- [105] Streitberg, B., Röhmel, J., Herrmann, W. M., & Kubicki, S. (1987). COMSTAT rule for vigilance classification based on spontaneous EEG activity. *Neuropsychobiology*, 17(1-2), 105-117. <https://doi.org/10.1159/000118347>
- [106] Systém sledování bdělosti řidiče. In: BESIP [online]. [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-vozidlo/moderni-technologie-vozidel/aktivni-bezpecnost-prvky-aktivni-bezpecnosti/system-sledovani-bdelosti-ridice>
- [107] Taillard, J., Philip, P., Chastang, J. F., & Bioulac, B. (2004). Validation of Horne and Ostberg morningness-eveningness questionnaire in a middle-aged population of French workers. *J Biol Rhythms*, 19(1), 76-86. <https://doi.org/10.1177/0748730403259849>
- [108] Tanaka, M., Shigihara, Y., Funakura, M., Kanai, E., & Watanabe, Y. (2012). Fatigue-associated alterations of cognitive function and electroencephalographic power densities. *PLoS one*, 7(4), e34774. doi: 10.1371/journal.pone.0034774
- [109] Teplan, M. (2002). Fundamentals of EEG measurement. *Measur. Sci. Rev.* 2, 1–11.
- [110] Titgemeyer, Y., Surges, R., Altenmüller, D. M., Fauser, S., Kunze, A., Lanz, M., Malter, M. P., Nass, R. D., von Podewils, F., Remi, J., von Spiczak, S., Strzelczyk, A., Ramos, R. M., Kutafina, E., & Jonas, S. M. (2020). Can commercially available wearable EEG devices be used for diagnostic purposes? An explorative pilot study. *Epilepsy Behav*, 103(Pt A), 106507. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2019.106507>
- [111] Torsvall, L., & Åkerstedt, T. (1987). Sleepiness on the job: continuously measured EEG changes in train drivers. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66(6), 502-511. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-4694\(87\)90096-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-4694(87)90096-4)
- [112] Trejo, L. J., Knuth, K., Prado, R., Rosipal, R., Kubitz, K., Kochavi, R., Matthews, B., & Zhang, Y. (2007). EEG-Based Estimation of Mental Fatigue: Convergent Evidence for a Three-State Model. In D. D. Schmorrow & L. M. Reeves, *Foundations of Augmented Cognition* Berlin, Heidelberg.
- [113] Truschzinski, M., Betella, A., Brunnett, G., & Verschure, P. F. M. J. (2018). Emotional and cognitive influences in air traffic controller tasks: An investigation using a virtual environment? *Applied Ergonomics*, 69, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.019>
- [114] Ťok, D. Máme návrhy řešení ke zvýšení bezpečnosti na železničních přejezdech. In: Ministerstvo dopravy ČR [online]. 2015 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Dan-Tok-Mame-navrhy-reseni-ke-zvyseni-bezpecnosti>

- [115] Únava v silničním provozu. In: Observatoř bezpečnosti silničního provozu [online]. 2007 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.czrso.cz/clanky/unava-v-silnicnim-provozu/>
- [116] Vogel, A. P., Fletcher, J., & Maruff, P. (2010). Acoustic analysis of the effects of sustained wakefulness on speech. *J Acoust Soc Am*, 128(6), 3747-3756. <https://doi.org/10.1121/1.3506349>
- [117] Vollrath, M. (1994). Automatic measurement of aspects of speech reflecting motor coordination. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 26(1), 35-40. <https://doi.org/10.3758/BF03204561>
- [118] Vyhláška č. 478/2000 Sb., kterou se provádí zákon o silniční dopravě, ve znění vyhlášky č. 55/2003 Sb.
- [119] Výroční zpráva 2019: Řízení letového provozu. Jeneč, 2020. Dostupné také z: [http://www.rlp.cz/spolecnost/vykonnost/vyrocnizpravy/VZ\\_2019\\_cz.pdf](http://www.rlp.cz/spolecnost/vykonnost/vyrocnizpravy/VZ_2019_cz.pdf)
- [120] Walker, Peter. Pilot was snoring before Air India crash. In: *The Guardian* [online]. 2010 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/world/2010/nov/17/sleepy-pilot-blamed-air-india-crash>
- [121] Whitmore, J., & Fisher, S. (1996). Speech during sustained operations. *Speech Communication*, 20(1), 55-70. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(96\)00044-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6393(96)00044-1)
- [122] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Liniový vlakový zabezpečovač LS [online]. 2016 [cit. 23. 01. 2017]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Liniov%C3%BD\\_vlakov%C3%BD\\_zabezpe%C4%8Dova%C4%8D\\_LS&oldid=14115257](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Liniov%C3%BD_vlakov%C3%BD_zabezpe%C4%8Dova%C4%8D_LS&oldid=14115257)
- [123] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Tlačítko bdělosti [online]. 2015 [cit. 23. 01. 2017]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tla%C4%8D%C3%ADtko\\_bd%C4%9Blosti&oldid=13156355](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tla%C4%8D%C3%ADtko_bd%C4%9Blosti&oldid=13156355)
- [124] Williams, N. S., McArthur, G. M., de Wit, B., Ibrahim, G., & Badcock, N. A. (2020). A validation of Emotiv EPOC Flex saline for EEG and ERP research. *PeerJ*, 8, e9713. <https://doi.org/10.7717/peerj.9713>
- [125] Williams, N., McArthur, G., & Badcock, N. (2021). It's all about time: precision and accuracy of Emotiv event-marking for ERP research. *PeerJ*, 9, e10700. <https://doi.org/10.7717/peerj.10700>
- [126] Williamson, A., Lombardi, D. A., Folkard, S., Stutts, J., Courtney, T. K., & Connor, J. L. (2011). The link between fatigue and safety. *Accid Anal Prev*, 43(2), 498-515. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.11.011>
- [127] Wilson, A., Dollman, J., Lushington, K., & Olds, T. (2010). Reliability of the 5-min psychomotor vigilance task in a primary school classroom setting. *Behav Res Methods*, 42(3), 754-758. <https://doi.org/10.3758/brm.42.3.754>
- [128] Yamamoto, S., & Matsuoka, S. (1990). Topographic EEG study of visual display terminal (VDT) performance with special reference to frontal midline theta waves. *Brain Topography*, 2(4), 257-267. <https://doi.org/10.1007/BF01129654>

- [129] Zajíček, Z. (2018) Vyhodnocení naměřených parametrů během simulace EEG. Praha.
- [130] Zákon č. 247/2000 Sb. o získávání a zdokonalování odborné způsobilosti k řízení motorových vozidel a o změnách některých zákonů ze dne 30. června 2000
- [131] Zákon č. 262/2006 Sb. (Zákoník práce) ze dne 21. dubna 2006
- [132] Zákon č. 266/1994 Sb. (Zákon o dráhách) ze dne 14. prosince 1994
- [133] Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů ze dne 14. září 2000
- [134] Zákon č. 475/2001 Sb., o pracovní době a době odpočinku zaměstnanců s nerovnoměrně rozvrženou pracovní dobou v dopravě ze dne 29. listopadu 2001
- [135] Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů ze dne 6. března 1997



## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rozdělení odpovědností v rámci FRMS; upraveno podle [40].....	31
Obrázek 2 – Schéma jednotlivých úrovní řízení rizik v rámci FRMS; upraveno podle [40] .....	34
Obrázek 3 – Realizace pilotního měření na Letecké škole ŘLP ČR, s. p.; zdroj: vlastní .....	46
Obrázek 4 – Průběh experimentálního měření; zdroj: vlastní.....	49
Obrázek 5 – EMOTIV EPOC+ 14 kanálové mobilní EEG zařízení použité během výzkumu; zdroj: <a href="https://www.emotiv.com/epoc">https://www.emotiv.com/epoc</a> .....	55
Obrázek 6 – EMOTIV EPOC+ 14 umístění elektrod; zdroj: [80].....	56
Obrázek 7 – Realizace prvního experimentálního měření; zdroj: vlastní.....	64
Obrázek 8 – Brýle Luminette; zdroj: vlastní .....	70
Obrázek 9 – Použití brýlí Luminette; zdroj: vlastní.....	71
Obrázek 10 – Umístění elektrod mobilního EEG Emotiv; zdroj: [94] .....	82
Obrázek 11 – Logo soutěže ATM Awards 2020 a titul související s druhým místem .....	113

## Seznam grafů

Graf 1 – Průměrné hodnoty subjektivního pocitu ospalosti; zdroj: vlastní .....	74
Graf 2 – Průměrné hodnoty reakčního času při PVT (všichni probandi); zdroj: vlastní .....	77
Graf 3 – Průměrné hodnoty reakčního času při PVT (bez dat probanda 2); zdroj: vlastní .....	78
Graf 4 – Průměrné hodnoty reakčního času při Oddball task (všichni probandi) ; zdroj: vlastní .....	79
Graf 5 – Průměrné hodnoty reakčního času při Oddball task (bez dat probanda 2); zdroj: vlastní .....	80
Graf 6 – Průměrná chybovost u Oddball task; zdroj: vlastní .....	81
Graf 7 – Průměrné hodnoty EEG aktivity [ $\mu V^2/Hz$ ] v pásmech theta/alfa/beta 1 při cvičení na simulátoru; zdroj: vlastní.....	83
Graf 8 – Průměrné hodnoty EEG aktivity [ $\mu V^2/Hz$ ] v pásmech beta1/beta2/gamma při kognitivních testech; zdroj: vlastní.....	83
Graf 9 – Průměrné hodnoty EEG aktivity v pásmu delta elektrod FC5 a FC6 při kognitivních testech; zdroj: vlastní.....	84
Graf 10 – Vývoj jednotlivých parametrů hlasové analýzy v průběhu měření; zdroj: vlastní.....	90
Graf 11 – Hodnoty jednotlivých parametrů hlasové analýzy v průběhu měření; zdroj: vlastní .....	90

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Termíny realizovaných měření; zdroj: vlastní.....	64
Tabulka 2 – Karolinska Sleepines Scale; upraveno podle: [3].....	65
Tabulka 3 – Skóre Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ); upraveno podle: [107] .....	67
Tabulka 4 – Ukázka výstupu Wilcoxonova párového testu ze software IBM SPSS Statistics; zdroj: vlastní .....	68
Tabulka 5 – Ukázka výstupu analýzy korelací ze software IBM SPSS Statistics; zdroj: vlastní.....	69
Tabulka 6 – Chronotypy probandů; zdroj: vlastní.....	73
Tabulka 7 – Hodnoty subjektivního pocitu ospalosti probandů; zdroj: vlastní .....	74
Tabulka 8 – Hodnoty reakčních časů probandů při PVT; zdroj: vlastní .....	76
Tabulka 9 – Hodnoty reakčních časů probandů při Odball task; zdroj: vlastní .....	79
Tabulka 10 – Chybovost probandů při Odball task; zdroj: vlastní.....	81
Tabulka 11 – Příklad hodnot PSD EEG pro elektrodu AF3 v pásmu beta 1; zdroj: vlastní .....	82
Tabulka 12 – Statisticky významné rozdíly v hodnotách EEG PSD během kog. testů; zdroj: vlastní .....	86
Tabulka 13 – Statisticky významné rozdíly v hodnotách EEG PSD během simulací; zdroj: vlastní	87
Tabulka 14 – Hodnoty parametrů hlasu probandů; zdroj: vlastní na základě dat poskytnutých společností ANIS Group, a.s. ....	89
Tabulka 15 – Procentuální změny hodnot parametrů hlasu probandů; zdroj: vlastní.....	91
Tabulka 16 – Přehled parametrů hlasu a jejich vhodnosti pro identifikaci únavy; zdroj: vlastní .....	96
Tabulka 17 – Ukázka correlation heatmap pro pásmo gamma v druhé části večerní simulace; zdroj: vlastní .....	98
Tabulka 18 – Počet korelací hlasu s EEG (podle pásem); zdroj: vlastní .....	100
Tabulka 19 – Počet korelací hlasu s EEG (podle elektrod); zdroj: vlastní .....	101

## **Příloha 1**

### **Stručný návod na použití mobilního EEG Emotiv EPOC+**

Tento návod slouží ke snadnému použití mobilního EEG zařízení pro účely různých druhů výzkumu, ve kterých se použití jiných EEG zařízení dostupných na Fakultě dopravní ukáže jako nereálné z důvodu nutnosti měření mimo laboratoře a s tím souvisejícím nutným přesunem veškerého vybavení.

#### **Vybavení:**

- EEG sada obsahující
  - EEG čepice
  - Odnímatelné elektrody (16 ks)
  - Napájecí kabel (USB)
  - USB Bluetooth konektor
- Roztok
- Papírové utěrky
- Pohlčovače vlhkosti
- SW – EMOTIV App a EmotivPRO (ke stažení na <https://www.emotiv.com/emotivpro/>)

Příprava měření:

1. Nabít EEG čepici pomocí napájecího USB kabelu. Kontrolka svítí zeleně.



2. Navlhčit elektrody umístěné v pouzdře pomocí roztoku na kontaktní čočky.



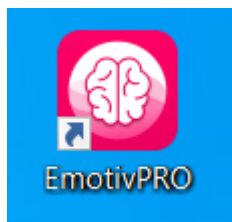
### 3. Připevnit elektrody na EEG čepici (závit)



### 4. Připojit USB Bluetooth konektor do PC



5. Spustit program EmotivPRO



6. Po skončení měření elektrody vrátit do pouzdra a použít pohlcovače vlhkosti.



7. Veškeré součásti vrátit do krabice.

