



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

**Experimentální hodnocení pracovní zátěže řídicího letového  
provozu**

Diplomová Práce

---

**Bc. Jan Tecl**

Praha 2019

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621** .....**Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jan Tecl**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Experimentální hodnocení pracovní zátěže řídicího letového provozu**

Název tématu (anglicky): **Experimental Evaluation of Air Traffic Controllers Workload**

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Vypracujte analýzu současného stavu v uvedené problematice a stanovte limity současných studií
- Na základě získaných znalostí navrhnete koncept experimentu, který bude zahrnovat měření pro objektivizaci zátěže řídicího letového provozu
- Naměřená data (signály) zpracujte vhodnými metodami
- Výsledky vyhodnoťte pomocí vhodných statistických metod
- Výsledky experimentálních měření vhodně interpretujte, stanovte limity studie a doporučení



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Marinescu, A. et al. 2018. "Physiological Parameter Response to Variation of Mental Workload." Human Factors 60 (1): 31-56.

Regula M., et al. 2014. "Study of Heart Rate as the Main Stress Indicator in Aircraft Pilots." Proc. of 16th International Conference on Mechatronics, p. 639-643.

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

Datum zadání diplomové práce: **27. července 2017**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **2. prosince 2019**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jan Tecl  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....18. června 2019



## **Poděkování**

Poděkování patří panu doc. Ing. Bc. Vladimíru Sochovi, Ph.D. a Ing. Lence Hanákové za perfektní vedení diplomové práce a za veškerou pomoc spojenou s její tvorbou. Taktéž děkuji npor. Ing. Jakubu Zouharovi za poskytnutí simulovaných cvičení a velení stanoviště Letových provozních služeb CRC – Hlavenec za umožnění provádět měření. A nakonec děkuji všem, kteří se přímo i nepřímo na měření jakýmkoli způsobem podíleli.



### **Cestné 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.

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

Bc. Jan Tecl

V Praze dne 12. září 2019



## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem pracovní zátěže na organismus řídicího letového provozu. V současné době existuje mnoho různých metod, jak pracovní zátěž měřit a hodnotit, ať už se jedná o chemický rozbor tělních tekutin nebo zdánlivě obyčejné hodnocení na základě tepové frekvence. Pro účely našeho měření bylo užito metody sběru hodnot tepové frekvence během simulovaných cvičení, která přesně odráží část práce vojenského radarového řídicího bojového použití. Pro co nejobektivnější výsledky byla použita cvičení zaměřená na radarový monitoring v definovaných prostorech LKTRA a LKTSA s různou povahou provozu a různými leteckými úkoly. Ze závěrů měření a její analýzy pak plyne, jak pracovní zátěž odráží na psychofyzilogických procesech v těle řídicího letového provozu, respektive na jeho srdečním rytmu.

**Klíčová slova:** pracovní zátěž, řídicí letového provozu, ŘLP, sběr dat, tepová frekvence, EKG, simulovaná cvičení



## Abstract

The diploma thesis deals with the influence of workload on the air traffic controller. There are currently many different methods of measuring and evaluating workload, whether it is chemical analysis of body fluids or seemingly ordinary heart rate evaluation. For the purpose of our measurements, a method of collecting heart rate values during simulated exercises was used, which accurately reflects part of the work of the military radar controller of combat use. For the most objective results, exercises focused on radar monitoring in defined areas of LKTRA and LKTSA with different nature of operations and different aeronautical tasks were used. The conclusions of the measurement and its analysis show how the workload reflects on the psychophysiological processes in the body of the air traffic controller, respectively on his heart rhythm.

**Key words: workload, air traffic controller, ATC, data collection, heart rate, EKG, simulated exercises**



# Obsah

Úvod	1
<b>1 Analýza současného stavu</b>	<b>2</b>
1.1 Analýza vybraných studií	2
1.2 Faktory ovlivňující pracovní zátěž	10
1.3 Dílčí závěr	12
<b>2 Návrh experimentu a zběru dat</b>	<b>14</b>
2.1 Motivace	14
2.2 Metodika návrhu cvičení	14
2.3 Přehled jednotlivých cvičení	16
2.3.1 Cvičení č.1	17
2.3.2 Cvičení č.2	18
2.3.3 Cvičení č.3	21
2.3.4 Cvičení č.4	23
2.3.5 Cvičení č.5	26
2.3.6 Shrnutí výše popsaných cvičení	28
2.4 Subjekty	29
2.5 Prostředí a podmínky experimentu	29
2.6 Princip měření	29
2.7 Zpracování dat	31
2.8 Statistická analýza	34
<b>3 Výsledky</b>	<b>37</b>
3.1 Základní popis výsledků pro cvičení č.1	37
3.2 Základní popis výsledků pro cvičení č.2	40
3.3 Základní popis výsledků pro cvičení č.3	43





3.4	Základní popis výsledků pro cvičení č.4 . . . . .	47
3.5	Základní popis výsledků pro cvičení č.5 . . . . .	50
3.6	Výsledky závislosti zátěže a poměru LF/HF . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>References</b>	<b>57</b>



## Seznam obrázků

1.1	Výsledky TLX testu ze studie Brookingse et. al [1]. . . . .	5
1.2	Počet mrknutí oka za minutu ze studie Brookingse et. al [1]. . . . .	6
1.3	Počet nádechů za minutu ze studie Brookingse et. al [1]. . . . .	6
1.4	Závislost srdečního rytmu na zátěži způsobené počtem letadel v prostoru odpovědnosti dle Colleta et al. [2]. . . . .	8
1.5	Závislost kožní vodivosti na počtu letadel v prostoru odpovědnosti dle Colleta et al. [2]. . . . .	9
1.6	Mechanika dotazníku pro výpočet NASA Task Load Indexu, se znázorněnými hodnotícími faktory (a) a párovým faktorovým dotazníkem (b) [3]. . . . .	10
2.1	Graf pracovní kapacity a jeho vznik. . . . .	16
2.2	Zátěžová křivka pro cvičení č.1. . . . .	18
2.3	Zátěžová křivka pro cvičení č.2. . . . .	20
2.4	Zátěžová křivka pro cvičení č.3. . . . .	22
2.5	Zátěžová křivka pro cvičení č.4. . . . .	25
2.6	Zátěžová křivka pro cvičení č.5. . . . .	27
2.7	QRS komplexy s vyznačenými RR intervaly . . . . .	30
2.8	Ukázka aproximovaných, filtrovaných a interpolovaných data zátěže pro cvičení 2. . . . .	35
2.9	Ukázka filtrovaných data parametru LF/HF pro cvičení 2 u subjektu 2. . . . .	36
3.1	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 1 . . . . .	38
3.2	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 2 . . . . .	38
3.3	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 3 . . . . .	39
3.4	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 4 . . . . .	39
3.5	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 1 . . . . .	41
3.6	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 2 . . . . .	42
3.7	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 3 . . . . .	42
3.8	Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 4 . . . . .	43



3.9 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 1 . . . . .	45
3.10 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 2 . . . . .	45
3.11 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 3 . . . . .	46
3.12 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 4 . . . . .	46
3.13 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 1 . . . . .	48
3.14 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 2 . . . . .	49
3.15 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 3 . . . . .	49
3.16 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 4 . . . . .	50
3.17 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 1 . . . . .	52
3.18 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 2 . . . . .	52
3.19 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 3 . . . . .	53
3.20 Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 4 . . . . .	53



## Seznam tabulek

1.1	Hodnoty tepové frekvence v průběhu směn, dle Costa et al. [4]. . . . .	3
1.2	Koncentrace VMA, reakční čas a další faktory (průměr a SD) z výskumu Giovanni Costy et. al [4] . . . . .	4
1.3	Typy a stupně SWAT testu [5] . . . . .	11
2.1	Číselné vyjádření náročnosti vybraných jevů . . . . .	15
2.2	Podrobnější vyjádření bodového hodnocení . . . . .	15
3.1	Spearmanovi korelační koeficienty a příslušné p-hodnoty pro určení závislosti mezi zátěží a průběhem LF/HF parametru. . . . .	54



## Úvod

Pracovní zátěž řídicího letového provozu (tzv. workload) patří mezi nejdůležitější témata v letectví vůbec. Evropská organizace pro bezpečnost řízení letového provozu (EUROCONTROL) se neustále snaží nacházet nová řešení ke snížení pracovní zátěže řídicího na takovou úroveň, aby byl letový provoz co možná nejméně negativně ovlivněn lidským faktorem. EUROCONTROL doporučuje a upravuje normy, kolik by měl maximálně mít ŘLP na spojení letadel ve svém prostoru odpovědnosti jak v daném časovém intervalu, což je obvykle jedna hodina, tak kolik letadel je schopen uřídit v jednom daném okamžiku. Z toho pak vyplývá i rozdělení vzdušného prostoru do několika sektorů, které se v závislosti na vzdušné situaci během dne aktivují a deaktivují tak, aby řídicí letového provozu nepřekročil stanovenou hranici, do které lze teoreticky zaručit bezpečné naplnění jeho kapacity.

Následující stránky jsou věnovány metodám, jaké byly ve světě použity k získání představy o tom, pod jakým psychickým napětím se může ŘLP nacházet při své práci. Měření lze provádět jak při živé vzdušné situaci, tak i v simulovaných podmínkách při cvičení. Ze závěrů získaných měření se stanovuje výše zmíněná bezpečná mez, kdy po jejím překročení musí být přijata různá opatření.

Jádrem této práce je hodnocení pracovní zátěže ve vojenském prostředí. A to konkrétně na stanovišti Letových provozních služeb spadajících pod Control and Reporting Centre (CRC). Poskytují se zde radarové služby řízení letového provozu a skupina řídicích zabezpečujících tyto služby je známá jako Ground Controlled Interception (GCI). Na rozdíl od civilního řízení letového provozu, kdy mají změny v hustotě provozu relativně pozvolný charakter, se na vojenském stanovišti CRC řídí provoz nárazově dle předem známého plánu letů jednotlivých letek na daný den či týden a tomu také odpovídá výcviková osnova a z ní vyňatá cvičení pro vlastní měření, jejichž parametry jsou popsány ve třetí části.

Ze závěrů práce by mělo vyplynout, zda simulovaná cvičení, respektive řízení živých misí se stejným charakterem, ovlivní psychofyzilogické procesy v těle GCI.



# 1 Analýza současného stavu

Úvod této části je věnován analýze studií, které posuzují vliv pracovní zátěže na lidský organismus pomocí různých metod zkoumání. Z velkého množství publikovaných článků na dané téma byly vybrány pouze ty, které jsou úzce spjaty s problematikou vycházející z řízení letového provozu.

Nedílnou součástí hodnocení pracovní zátěže jsou i faktory, které ji ovlivňují. A to ať už pozitivně, či negativně. Jejich bližší charakteristika a vliv na samotné řízení letového provozu je uveden ve druhé polovině této části.

## 1.1 Analýza vybraných studií

Lidský faktor je pro letectví nedílnou součástí, ať už se jedná o posádku na palubě dopravního letadla, pilota stíhacího letounu, anebo pozemní personál, který se stará o řízení toku letového provozu. A právě na řídicí letového provozu (dále jen ŘLP) je hlavně ve vysoce exponovaných hodinách vyvíjen veliký tlak, který by při překročení určité hranice mohl vést až k fatálním následkům. Z toho důvodu vznikají studie, které se snaží objasnit, při jaké pracovní zátěži dokáže člověk pracovat bez omezení a při které je jeho kapacita už naplněna až překročena.

Nejrozšířenější metodou pro zkoumání psychofyziologických procesů během řízení letového provozu je zcela logicky posuzování zátěže podle změny srdečního rytmu. Avšak dle studie, kterou sepsal Giovanni Costa [4] na půdě Institute of Occupational Medicine („Ústav pracovního lékařství“) na Univerzitě ve Veroně, se dá říci, že tepová frekvence vykazovala u všech měřených subjektů konstantní průměrné hodnoty, jak je znázorněno v Tabulce 1.1, napříč všemi pracovními směny, které byly stanoveny následujícím způsobem:

- Odpolední směna (13:00 – 20:00)
- Ranní směna (07:00 – 13:00)
- Noční směna (20:00 – 07:00)



Tepová frekvence se zvýšila pouze v ojedinělých případech, které ale byly spojeny jinými stresovými situacemi, než s hustotou řízeného letového provozu. Za zmínku stojí například výpadek radarového obrázku nebo přeslechy mezi ŘLP a pilotem.

Ve stejné studii se pro zjištění hladiny stresu využilo i měření množství kyseliny vanilmandlové (dále jen VMA) v moči. Tato kyselina [?] je jeden z metabolitů katecholaminů adrenalinu, který zvyšuje srdeční frekvenci a metabolismus, a noradrenalinu, který zužuje cévy s následným vzestupem krevního tlaku. Oba hormony jsou měněny na již zmíněnou kyselinu vanilmandlovou a vylučovány močí. Její přítomnost je kolísavá, avšak zvyšující se krátce po vystavení stresové situaci. Giovanni Costa [4] nechal figuranty sbírat moč před a po každé směně a posléze nechal provést rozbor, který prokázal, že se v průběhu každé směny hodnota VMA v moči zvyšuje. Měření však ukázalo (viz. Tabulka 1.2), že ve večerní směně je počáteční množství VMA vyšší než ráno a odpoledne navzdory nižší koncentraci letadel ve vzdušném prostoru. Tento fakt je ale pravděpodobně spojen s psychofyziologickým nastavením organismu pro zvýšení a udržení bdělosti a pohotovosti v nočních hodinách, což může potvrdit i fakt, že měřené hodnoty reakčního času byly v průběhu všech směn takřka totožné. Další pocitové faktory (nálada, únava, vyčerpání, slabost atd.), které mohou ovlivnit množství tolerované zátěže pro ŘLP, jsou popsány taktéž v Tabulce 1.2, ale dle jejich velice podobných hodnot napříč celým dnem nemají pravděpodobně vliv na výkon ŘLP.

Tabulka 1.1: Hodnoty tepové frekvence v průběhu směn, dle Costa et al. [4].

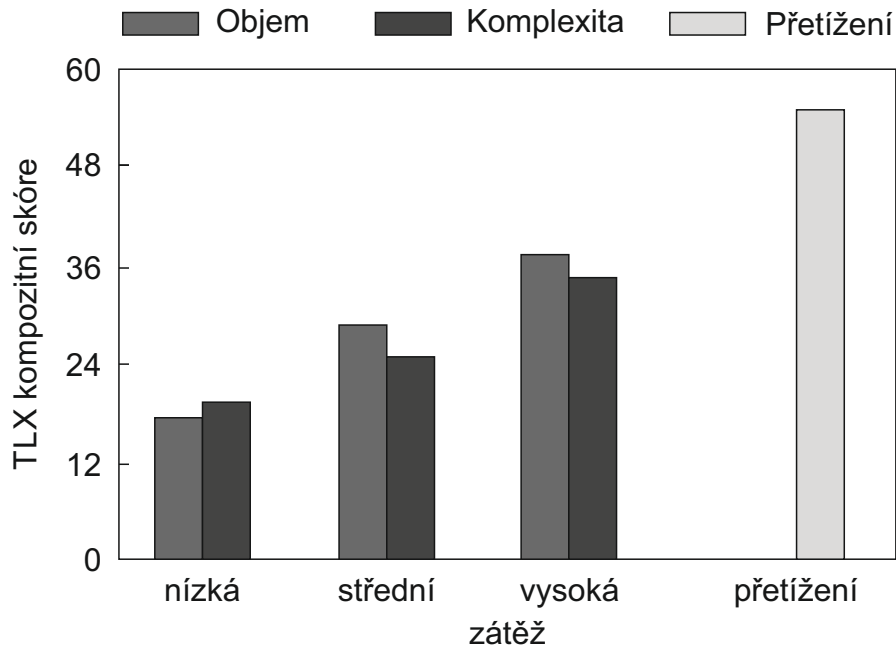
	Ranní	směna	směna	směna	p
Srdeční rytmus (úderů za minutu)	83,3 ± 5,1	87,2 ± 7,1	82,1 ± 5,0	3,7	0,04
Rozsah počtu úderů	60 - 125	64 - 122	56 - 118		
Čistý srdeční výdaj (úderů za minutu)	19,8 ± 4,1	23,3 ± 7,6	16,4 ± 6,0	3,7	0,05
Relativní srdeční výdaj (%)	17,1 ± 3,6	20,2 ± 3,8	16,4 ± 6,0	3,5	0,05
Počet letadel za hodinu	18,5 ± 5,1	20,2 ± 3,8	6,6 ± 2,0	103	0
Srdeční rytmus během spánku doma	62,9 ± 5,5 (48-76)				
Srdeční rytmus během spánku v práci	66,3 ± 8,4 (44-80)				



Tabulka 1.2: Koncentrace VMA, reakční čas a další faktory (průměr a SD) z výskumu Giovanni Costy et. al [4]

	Ranní směna		Odpolední směna		Noční směna	
	Před (7:00)	Po (13:00)	Před (13:00)	Po (20:00)	Před (20:00)	Po (07:00)
Nálada	5,1	4,1	4,1	4,1	4,6	3,9
(1 min - 7 max)	1	1	1	1,2	1,1	1
Fyzický stav	4,5	3,5	4,1	3,3	4,4	3,4
(1 min - 7 max)	1,3	1,4	1,6	1,3	1,1	1,2
Pocit únavy	15,2	18,2	16,8	19,9	15,6	21,2
(5 min - 35 max)	3,6	3,3	4,5	4,2	4,7	3,7
Silný - slabý	3,2	3,5	3,5	3,7	3,2	4,2
(1 - 7)	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1
Uvolněný - napnutý	2,9	3,7	3,5	3,9	3,2	3,6
(1 - 7)	0,9	1	1,4	1,1	1	1,1
Odpočatý - unavený	3,3	4,3	3,6	4,8	3,3	4,7
(1 - 7)	0,9	1,1	1,3	1,5	1,2	0,9
Energický - vyčerpaný	3,2	3,8	3,5	4,2	3,3	4,1
(1 - 7)	1	0,9	1,2	1,1	1	0,9
Bdělý - ospalý	2,7	2,9	2,7	3,3	2,6	4,2
(1 - 7)	1,1	0,9	1,4	1,1	1,1	1,4
Reakční doba (ms)	226,1	225,5	223,1	228,1	210,7	223
CFF	22,7	23,5	19,9	20,9	22,7	21,8
(Hz)	38,5	38,3	37,2	37,3	39	39,2
VMA (mg/g)	2,5	2,2	2,8	2,6	2,1	2
	3,82	4,3	3,66	4,73	4,47	4,71
	1,13	1,54	1,36	2,12	2,02	1,49



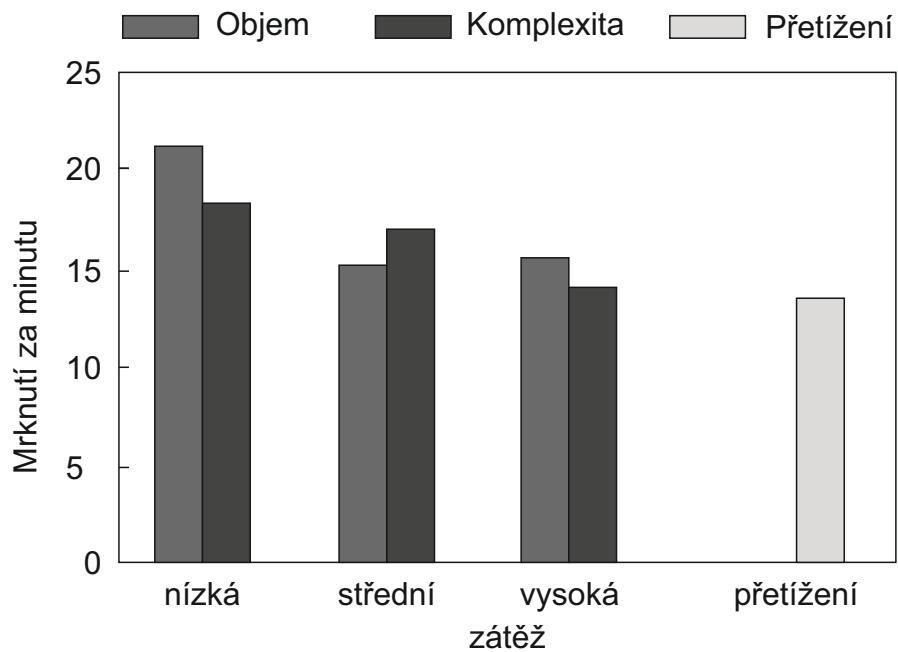


Obrázek 1.1: Výsledky TLX testu ze studie Brookings et. al [1].

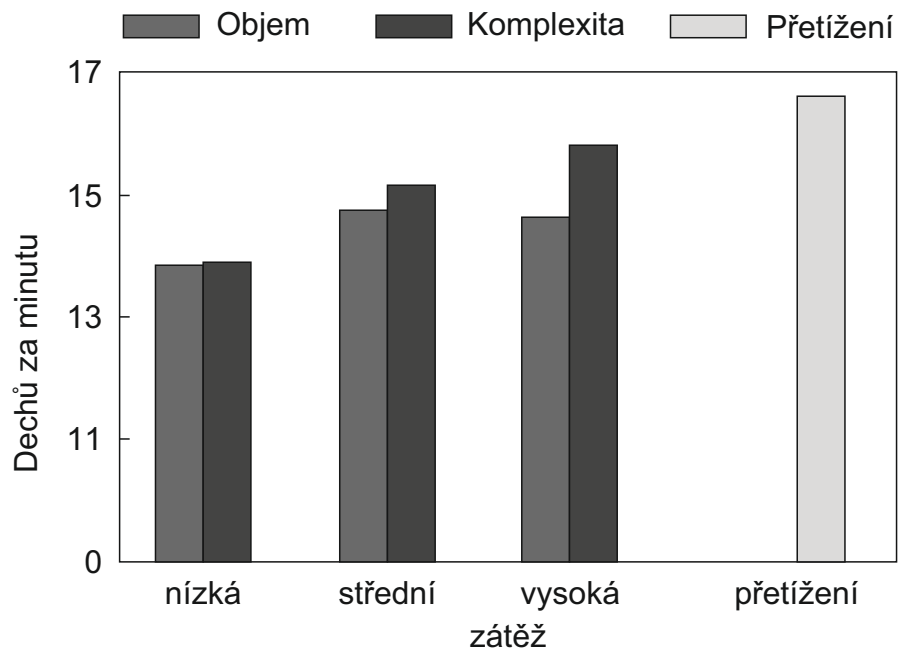
V další studii pro hodnocení pracovní zátěže ŘLP [1] byl použit tzv. NASA-TLX test. Jedná se o dotazník vyplňovaný hned po dokončení úkolu a skládající se ze šesti faktorů: mentální náročnost, fyzickou náročnost, časovou náročnost, výkon, snahu a úroveň frustrace. Testu se účastnilo osm vojenských ŘLP, kteří měli několikaletou praxi v oboru, což není pro podobné výzkumy příliš obvyklé. Měření probíhalo na simulátoru ve třech stupních obtížnosti ve dvou různých scénářích (objemovém a komplexním). Třetí scénář (zátěžový) měl za úkol zahltit kapacitu ŘLP na maximální možnou hranici a určit mezní hodnotu měřených faktorů. Na Obrázku 1.1 lze odečíst výsledek testu.

Ve stejné studii byly jako doplňkové metody pro hodnocení zátěže zvoleny psychofyzilogické procesy, a to z pohledu aktivity očního víčka, respektive frekvence dechu. Ze závěrečných grafických znázornění vyplývá (Obr. 1.2), že aktivita očního víčka se se zvyšující se zátěží snižuje.

Vysvětlení je relativně logické – větší množství cílů na radarovém výnosu vede k potřebě věnovat jim větší pozornost, aby nedošlo k přehlédnutí nějaké významné události [1]. Naopak, jak ukazuje Obrázek 1.3, frekvence nádechů se zátěží rostla.



Obrázek 1.2: Počet mrknutí oka za minutu ze studie Brookingse et. al [1].



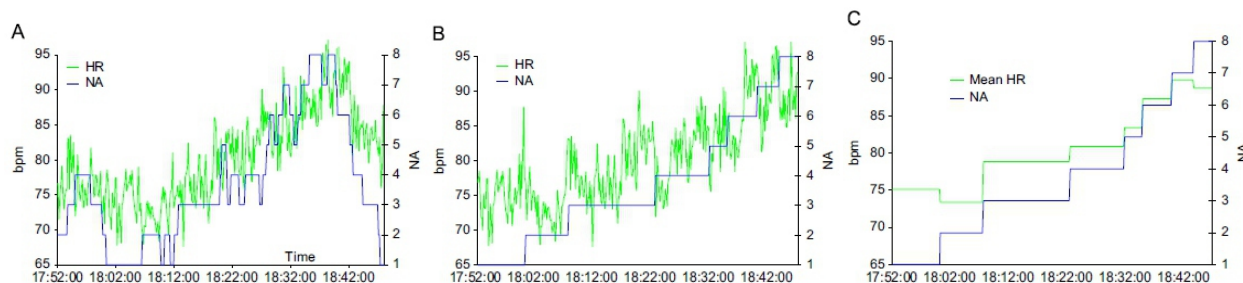
Obrázek 1.3: Počet nádechů za minutu ze studie Brookingse et. al [1].



Autoři citovaného článku tento jev spojují s faktem, že nárůst zátěže stimuluje metabolické procesy pro zvýšení mozkové aktivity a přikládají i názory dalších odborníků [1], kteří se ale přiklání pouze k mozkové aktivitě. Wientjes [6] dokonce metabolické procesy popírá. Tito odborníci pak zároveň nezávisle potvrzují i výsledky výše popsané studie [4], že tento typ zátěže nemá přímý vliv na tepovou frekvenci.

Na francouzském mezinárodním letišti Saint Exupéry v Lyonu přistoupil C. Collet [2] při hodnocení pracovní zátěže ŘLP k metodě, které je úzce spjata s monitorování autonomního nervového systému se zaměřením na měření kožního potenciálu, kožní vodivosti, krevního průtoku kůží, teploty kůže a do měření samozřejmě zahrnul i měření okamžité srdeční frekvence. Pro sbírání dat si vybral střední až vysokou hustotu letového provozu, která byla ve večerních hodinách mezi 18:00 až 21:00. Měření se účastnilo 25 plně vycvičených dobrovolníků na pozici „radar approach“ z koncové řízené oblasti. V průběhu měření se zapisovalo množství letadel, které měl ŘLP na spojení, a tyto hodnoty se vkládaly na reálnou časovou osu. Takto připravenou časovou osou byl následně proložen graf s výsledky měření fyziologických procesů v těle. Pro ukázkou byl zvolen graf srdečního rytmu ve třech různých provedeních (A, B, C), které jsou k vidění na Obrázku 1.4. Obrázek 1.4-A zobrazuje výše zmíněné vsazení jednoho grafu do druhého v přesné časové posloupnosti. Následně bylo množství řízených letadel seřazeno od jednoho do osmi bez ohledu na časový horizont, čímž vzniklo osm period, a do této křivky se vložil graf srdečního rytmu vztažený právě k množství letadel (Obrázek 1.4-B). Pro úplnost a přehlednost vznikl Obrázek 1.4-C, který je založen na stejném principu jako obrázek předcházející, nicméně pro přehlednost a jednoduchost byly použity střední hodnoty srdečního rytmu v dané periodě dle množství letadel.

Ze závěrů patrných na obrázku lze říci, že srdeční rytmus se zvedá v závislosti na počtu letadel. Collet ovšem na rozdíl od ostatních výše zmíněných autorů různých studií připouští, že zvýšení tepové frekvence je přímo propojeno s množstvím letadel a tím pádem s naplňováním kapacity každého řídicího. V průběhu měření se totiž tepová frekvence ŘLP zvýšila o zhruba 20% a tento nárůst podle něj nemůže být prý zapříčiněn pouze vyšším množstvím dialogů mezi piloty a řídicím. Daleko více vypovídající hodnotu mají ostatní měřené veličiny. U každého řídicího byla naměřena počáteční klidová hodnota, se kterou se



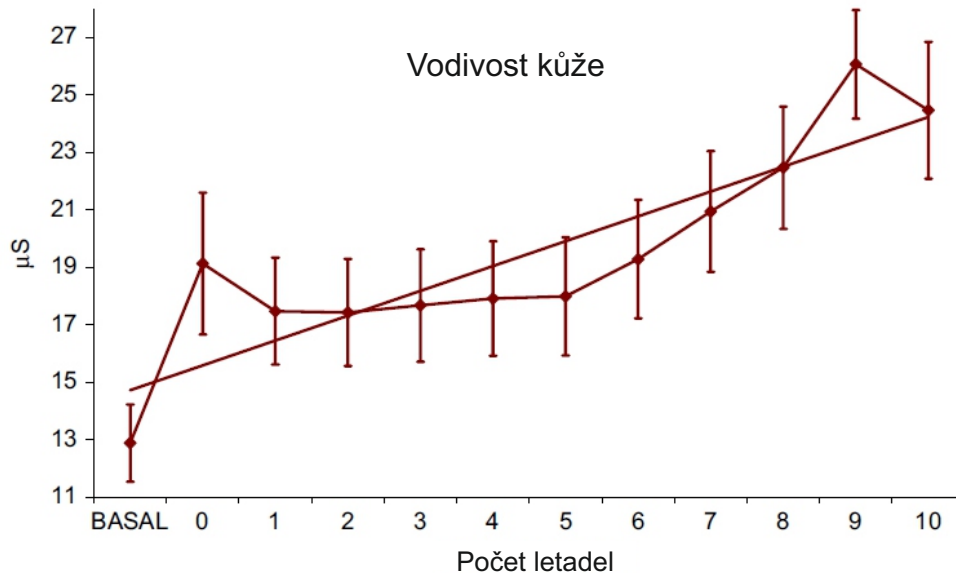
Obrázek 1.4: Závislost srdečního rytmu na zátěži způsobené počtem letadel v prostoru odpovědnosti dle Colleta et al. [2].

později porovnávaly hodnoty naměřené při zátěži, a nárůst byl daleko výraznější, za všechny měřené veličiny lze jako příklad uvést vztah mezi množstvím letadel a vodivostí kůže, které je patrné z Obrázku 1.5.

Úroveň pracovní zátěže lze určit nejen pomocí objektivních metod měření, ale také pomocí metod subjektivních. Jedna z nich je výše zmíněný NASA Task Load Index. Tento test je založený na subjektivních pocitech z úkolu. Každý hodnocený vyplní bezprostředně po úkolu tabulku, která obsahuje šest rozličných faktorů: mentální náročnost (mental demand), fyzická náročnost (physical demand), časová náročnost (temporal demand), výkon (performance), snaha (effort) a úroveň frustrace (frustration). Každý z uvedených faktorů má vlastní stupnici od 1 do 20 (Obr. 1.6-A). Zvolená hodnota ze stupnice je automaticky násobena koeficientem 5, čímž pro každý faktor vznikne hodnota 5, 10, 15, ..., 95, 100. V druhé fázi měření musí hodnocený určit, který z faktorů pro něj představoval vyšší zátěž vzhledem k ostatním. K tomu slouží patnáct různých karet se spárovanými faktory (Obr. 1.6-B).

Po určení faktoru s vyšší prioritou dle Obrázku 1.6-B získá hodnotitel koeficient 0-5 pro každý faktor. Výsledkem pro ten který faktor je pak násobek hodnoty faktoru a jeho priority dělený číslem 15 (dle množství párových karet). Závěrem celého NASA – TLX testu je pak index, který vypovídá o subjektivním hodnocení zátěže. Ten se získá průměrem hodnot jednotlivých faktorů získaných v předcházejícím kroku.

Vedle NASA – TLX existuje celá řada různých subjektivních metod hodnocení pracovní zátěže [5, 7]. Přestože citovaná literatura je zaměřena na testování řidičů motorových

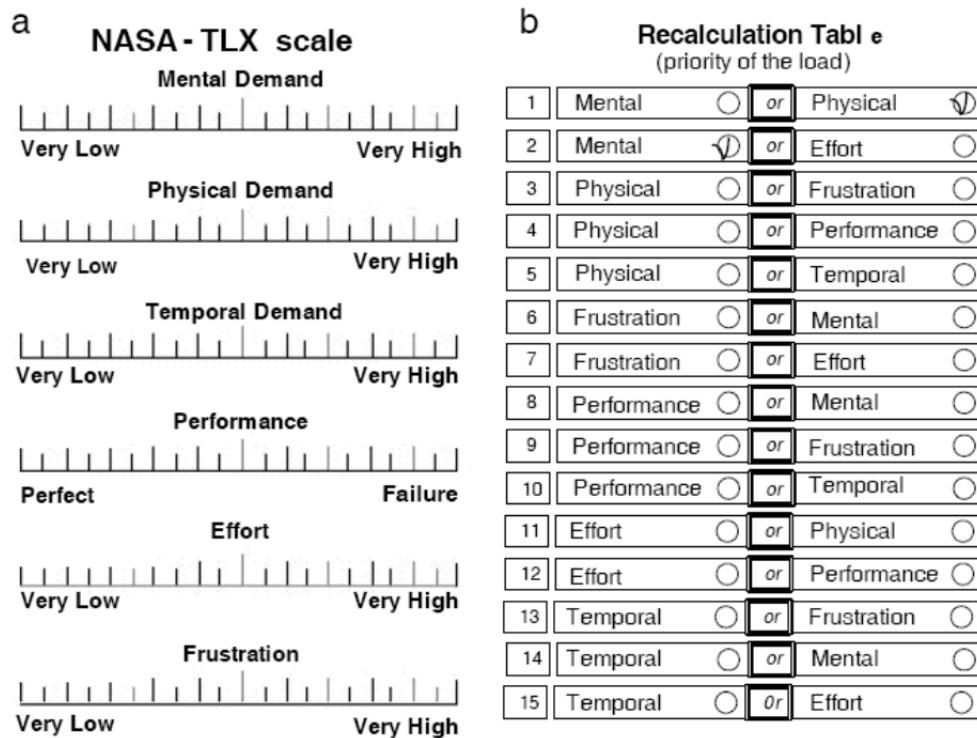


Obrázek 1.5: Závislost kožní vodivosti na počtu letadel v prostoru odpovědnosti dle Colleta et al. [2].

vozidel, lze některé z těchto metod úspěšně využít pro určení zátěže ŘLP [7]. Za zmínku stojí Subjective workload assessment technique (dále jen SWAT) [5]. Jedná se o několikarozměrovou metodu hodnocení zátěže založené na předpokladu, že tato může být adekvátně vyjádřena třemi typy zátěže: časovou náročností, mentálním vypětím a zátěží. Každý tento typ se dále dělí na nízký, střední a vysoký stupeň zátěže. Pro přehlednost je k nahlédnutí Tabulka 1.3, ze které lze vyčíst 27 různých kombinací.

Samotný test se sestává ze dvou fází. V první fázi přiřazuje hodnocení všech 27 kombinačních karet na stupnici od nuly do sta dle náročnosti úkolu. Ve druhé fázi pak vyjádří míru zátěže pro každý typ přiřazením čísla od 1 do 3. Toto ohodnocení je dále převedeno do tabulky, která byla odvozena z první fáze. Přestože je SWAT široce využíván, má dva hlavní nedostatky. Jednak není dost citlivý pro hodnocení nízké mentální zátěže a zadruhé je poměrně časově náročný kvůli řazení kombinačních karet na stupnici.

Výše popsané subjektivní metody hodnocení zátěže se řadí do skupiny takzvaných off-line testů, neboť vznikají až po dokončení úkolu. Hodnocení zátěže ale může také vznikat v reálném čase, tedy on-line. K tomu slouží Instantaneous self assessment (ISA), který



Obrázek 1.6: Mechanika dotazníku pro výpočet NASA Task Load Indexu, se znázorněnými hodnotícími faktory (a) a párovým faktorovým dotazníkem (b) [3].

poskytuje okamžité subjektivní pocity hodnoceného v průběhu plnění celého úkolu. Při této metodě zapisuje ŘLP v pravidelných intervalech bez ohledu na situaci do hodnotícího archu čísla v intervalu od 1 do 5 dle náročnosti právě plněného úkonu od nejnižší po nejvyšší. Tato metoda najde uplatnění například při srovnávání dvou různých systémů, ve kterých ŘLP řídí letový provoz (starý/nový systém, před/po aktualizaci).

## 1.2 Faktory ovlivňující pracovní zátěž

Podle M. Bauera [8], faktory, které se podílí na celkové kapacitě řídicího, lze rozdělit do dvou základních kategorií. První z nich, a pravděpodobně tou nejvíce ovlivňující výkonnost řídicího letového provozu, je řídicí samotný. Jeho práce je založena na úrovni vycvičenosti a také době, po kterou se v prostředí řízení letového provozu pohybuje. Jednou získaná praktická zkušenost je pro řídicího nezanedbatelnou výhodou při řešení případné krizové situace do



Tabulka 1.3: Typy a stupně SWAT testu [5]

Časová náročnost	Mentální vypětí	Zátěž
1. Mnoho volných chvilí. K přerušování nebo překrývání mezi činnostmi dochází zřídka nebo vůbec.	1. Vyžaduje jen velmi malé vědomé úsilí nebo soustředění. Aktivita je téměř automatická a vyžaduje jen malou nebo žádnou pozornost.	1. Existuje nízké riziko, frustrace nebo úzkost a lze se snadno přizpůsobit.
2. Příležitostné volné chvíle. Často dochází k přerušování nebo překrývání činností.	2. Vyžaduje mírné vědomé úsilí nebo soustředění. Složitost činnosti je středně vysoká kvůli nejistotě, nepředvídatelnosti nebo neznámosti. Vyžaduje se značná pozornost.	2. Mírný stres způsobený zmatkem, frustrací nebo úzkostí znatelně zvyšuje pracovní zátěž. K udržení adekvátního výkonu je nutná výrazná koncentrace.
3. Téměř bez volné chvíle. Přerušování nebo překrývání činností je časté nebo trvá po celou dobu.	3. Rozsáhlé duševní úsilí a soustředění je nutné. Velmi složitá činnost vyžadující úplnou pozornost.	3. Vysoký až velmi intenzivní stres způsobený zmatkem, frustrací nebo úzkostí. Vyžaduje se vysoké až extrémní odhodlání a sebeovládání.

budoucná. Tento faktor se dá do jisté míry nacvičit na simulačních zařízeních, nicméně reálná situace má vždy mnohem větší přínos. Dalším faktorem spadajícím do této kategorie je momentální psychické rozpoložení řídicího. Na jeho stavu se podílí nejrůznější vnější vlivy, jako například rodinné zázemí, existenční či finanční jistoty. Z toho může pramenit stres, únava, ztráta dlouhodobé koncentrace atd. V neposlední řadě mohou výkonnost ŘLP ovlivnit i pracovní podmínky na daném stanovišti. Velice záleží na tom, zda je samotný výkon prováděn dle určitého řádu, který se zohledňuje zejména v civilním sektoru ŘLP (příprava dat – aktivní řízení – odpočinek), anebo řídicí usedá na pracoviště v nepravidelných intervalech. Tento fenomén se vyskytuje na některých vojenských stanovištích ŘLP, kde se výše popsany řád nedá aplikovat z důvodu nepravidelné letové činnosti vojenských základen a může se stát, že tak řídicí z důvodu nižšího personálního obsazení směny řídí svěřený provoz i několik hodin pouze s několika krátkými přestávkami.



Do druhé kategorie, která určuje pracovní kapacitu řídicího, spadá velikost prostoru odpovědnosti a s ním spojená hustota provozu v něm. V civilní sféře je prostor odpovědnosti rozdělen do několika horizontálně a vertikálně definovaných sektorů, které se dle aktuální vzdušné situace flexibilně aktivují či deaktivují tak, aby měl každý řídicí jen určité množství letadel na spojení. Toho opatření efektivně předchází zahlcení kapacity ŘLP. Do této kategorie faktorů lze zařadit i technickou vybavenost pracoviště, jak softwarovou, tak hardwarovou. V současné době mají systémy pro řízení letového provozu implementováno několik pomocných funkcí, které přispívají k usnadnění samotného řízení. Jedním z nich je například funkce predikce, kdy systém na základě aktuálního kurzu letadla a jeho rychlosti dokáže spočítat, kde se bude za určitou dobu nacházet. V případě, že by se v prostoru nacházela letadla, která mají shodný průletový bod a dosáhnou ho ve stejném čase a na stejné hladině, pak se na obrazovce řídicího zobrazí varování o budoucím konfliktu. Ten si může s dostatečným předstihem zvolit, jakým způsobem bude konfliktní situaci řešit.

### 1.3 Dílčí závěr

Pro sumarizaci výše uvedeného je možné konstatovat, že hodnocení pracovní zátěže lze aplikovat do veškerých odvětví, ve kterých je lidský organismus vystavován vlivům, které mohou ovlivnit jeho výkonnost. Pro účely této práce byly analyzovány pouze metody, které se uplatnily pro měření zátěže řídicích letového provozu.

Rozšířenými metodami je hodnocení pomocí tzv. subjektivních testů (NASA – TLX [1, 3], SWAT [5] nebo ISA [7]), jejichž výstupy nejsou ale zcela relevantní. Figurant jej musí vyplnit co nejdříve po splnění daného úkolu, aby se dosáhlo co možná nejpřesnějších výsledků. Pro jejich směrodatnost je vhodné tyto testy kombinovat s jinými objektivními metodami měření.

Jedním z výše uvedených objektivních způsobů je hodnocení zátěže podle VMA obsažené v moči [4]. Dle dosažených výsledků ve studii se dá říci, že při posuzování touto metodou lze získat relevantní představu o psychofyziologickém nastavení organismu, nicméně ne ve spojení s hustotou provozu. Navíc tuto metodu lze aplikovat pouze s velkými omezeními. Sběr





vzorků a jejich pozdější rozbor vyžaduje laboratorní podmínky, které se v běžném pracovním prostředí nedají realizovat.

Ze závěrů plynoucích z posuzování zátěže pomocí aktivity očního víčka [1] se dá říci, že výsledek testu korespondoval hustotou provozu. Nemá ale vypovídající hodnotu o aktuální psychofyziologické zátěži organismu. Poukazuje pouze na zvýšenou pozornost během řízení letového provozu, neboť s přibývajícím počtem letadel jeho aktivita klesá v důsledku držení co největšího přehledu o vzdušné, respektive radarové situaci.

Nejednoznačné závěry ukazují studie věnované hodnocení pracovní zátěže pomocí srdečního rytmu. Z výsledků měření Giovanni Costy [4] v úvodu kapitoly vyplývá, že na změnu srdečního rytmu nemá množství přiděleného provozu žádný vliv. Kolísání tepové frekvence je spojeno se vznikem nestandardních situací. Naproti tomu závěry studie C. Colleta [2] ukazují na přímou úměru mezi množstvím letadel na spojení a srdečním rytmem. Navíc toto tvrzení podpořil testem založeným na kožní vodivosti, který přinesl stejné závěry. Existuje řada dalších studií, které se věnují hodnocení zátěže prostřednictvím tepové frekvence (viz napr. [9, 10, 11]). I když tyto studie nejsou orientovány přímo na řízení letového provozu, ukazují, že prostřednictvím měření a hodnocení variability srdečního rytmu je možné hodnotit zátěž.

Vzhledem k nejednoznačným závěrům plynoucích z hodnocení pomocí srdečního rytmu se i v této práci bude pracovní zátěž posuzovat touto metodou. Simulovaná cvičení použitá pro vlastní měření obsahují jak nestandardní situace, tak i vyšší množství letadel na spojení s množstvím okolního provozu.



## 2 Návrh experimentu a zběru dat

### 2.1 Motivace

Experimentální hodnocení zátěže řídicích letového provozu vzniklo na stanovišti Letových provozních služeb (LPS) spadajících pod Armádu České republiky. Cílem měření bylo zjistit, zda navržený výcvik pro nové příslušníky GCI (Ground Controlled Interception) má nastavenou takovou úroveň náročnosti, jaká se od něj očekává. A zdali se předpokládané zatížení v průběhu simulace na řídicím vůbec projeví. Vzhledem k personální situaci na stanovišti nebylo možné provádět měření s právě cvičeným personálem, nicméně byla přijata opatření, která by dle předpokladů měla tuto negativní stránku eliminovat, viz 2.4.

### 2.2 Metodika návrhu cvičení

Cvičení byla vybrána z výcvikové osnovy jako průřez výcviku. Přímo na sebe nenavazují, ale jsou pro ně charakteristické zvyšující se nároky na řídicího, což dokazuje následující rozbor jednotlivých cvičení. Náročnost každého simulovaného cvičení je graficky znázorněna na níže přiložených Obrázcích 2.2-2.6. Všechny úkony, které řídicí během své práce vykoná, mají své koeficienty náročnosti, které se sčítají do výsledné hodnoty. Tyto hodnoty jsou pak vyneseny na ose  $Y$  v závislosti na čase (osa  $X$ ). Postupy pro tvorbu a bodování náročnosti cvičení jsou detailně popsány ve výukové publikaci, kterou vypracovala Evropská organizace pro bezpečnost řízení letového provozu (EUROCONTROL) [12]. Publikace je metodicky mířena především na tvorbu simulací pro civilní sféru ŘLP, ale lze ji bez omezení aplikovat i na vojenské výcvikové mise. Jak již bylo uvedeno, po celou dobu řízení letového provozu je pracovní kapacita řídicího plněna i uvolňována. Plnění kapacity řídicího daným jevem je číselně (bodově) vyjádřena zjednodušenou tabulkou (Tab. 2.1).

Termín zjednodušená tabulka je použit záměrně, neboť nepostihuje všechny možné podružné jevy, které ovlivňují kapacitu. Bodové hodnocení kapacity lze dále rozdrobit na několik podskupin. Jedna za všechny mluvící je zobrazena v Tabulce 2.2.



Tabulka 2.1: Číselné vyjádření náročnosti vybraných jevů

Faktory ovlivňující zátěž	Bodové hodnocení zátěže
Konflikt	20
Rychlost	10
Vektorování	30
Stoupání / Klesání	5
Sekundární radarový cíl	2
Primární radarový cíl	4
Neznámé letadlo	5

Tabulka 2.2: Podrobnější vyjádření bodového hodnocení

Faktory ovlivňující zátěž	Bodové hodnocení zátěže
Konflikt pod úhlem $90^\circ$	25
Konflikt pod úhlem $60^\circ$	20
Konflikt pod úhlem $30^\circ$	17
Konflikt na vzájemných tratích	15
Konflikt na stejných tratích	15

Po převedení do praxe to znamená, že řešení konfliktu mezi dvěma cíli, jejichž trajektorie svírá úhel  $90^\circ$ , je kapacitně náročnější, než například řešení konfliktu mezi dvěma cíli v úhlech trajektorie  $30^\circ$  a nižší. Jejich větší sblížovací rychlost si totiž žádá rychlejší rozhodovací proces při tvorbě rozstupů a zachování bezpečnosti. Tento princip pro členění lze uplatnit na veškeré možné situace a jejich bodové hodnocení je závislé i na typu řízeného provozu. Bude-li bodovaným faktorem například vektorování, a řízeným provozem bude stíhací letoun, pak index náročnosti pro tento provoz bude nižší, než například pro dopravní letoun, jehož změna kurzu vyžaduje větší množství času vzhledem k jeho obratnosti. Z toho plyne, že si každé stanoviště LPS pro tvorbu svých simulovaných cvičení musí navrhnout vlastní tabulku s bodovým vyjádřením pro dané jevy. Dále si stanoví, jakou zátěží má dané cvičení na řídicího působit a poté jednotlivé jevy skombinuje do předpřipravené tabulky, po jejíž vyplnění vznikne graf pracovní zátěže, který je vidět na Obrázku 2.1.





### 2.3.1 Cvičení č.1

Námětem prvního cvičení je prohloubení přebírací procedury letadel na spojení a následné poskytování LPS ve výcvikových prostorech včetně kompletní procedury záletu. Cílem je upozorňovat piloty na neznámý provoz v prostorech LKTRA a zabezpečovat mezi vlastním a okolním provozem radarové rozstupy. Dále pak koordinovat povolení průletu okolního provozu prostorem odpovědnosti. Toto cvičení je charakteristické následovnými parametry.

#### **Prostory odpovědnosti:**

- LKTRA 30 FL95 – FL305
- LKTRA 37 FL95 – FL420
- LKTRA 31 A010 – FL245

#### **Okolní aktivované prostory:**

- LKTRA 32
- LKTRA 33
- LKTRA 34
- LKTRA 35

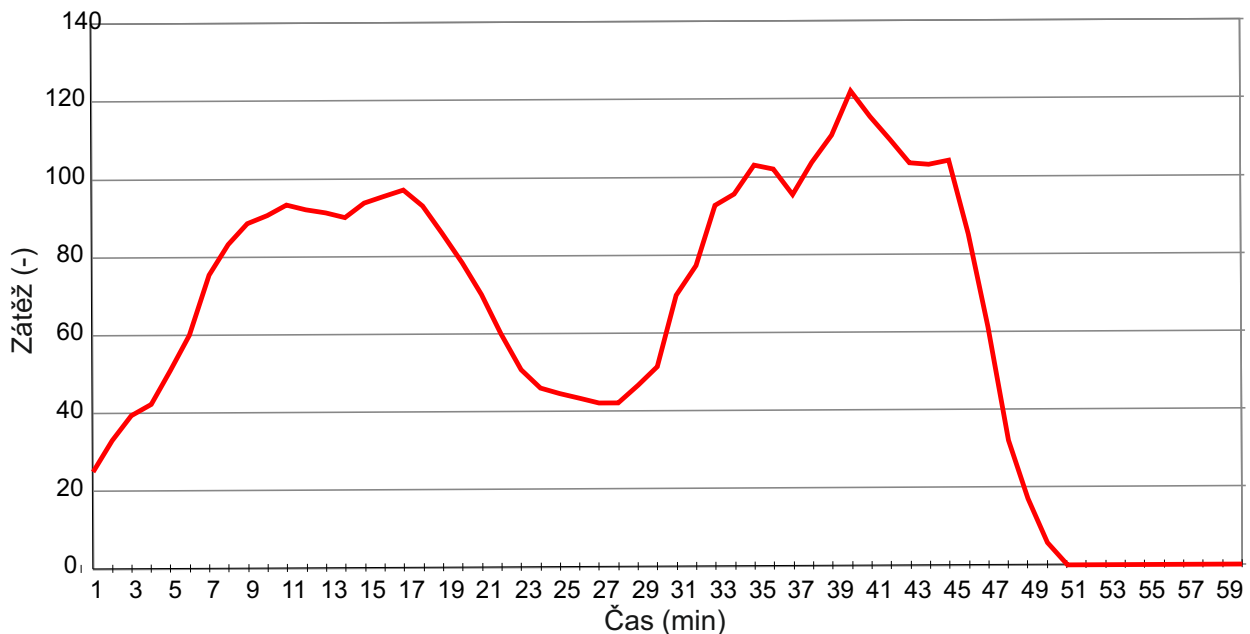
#### **Vlastní provoz:**

- Track 01 zálet v LKTRA 30, LKTRA 37, vzlet z Letiště 1 se spuštěním cvičení
- Track 11 činnost v LKTRA 31, vzlet z Letiště 1 se spuštěním cvičení

#### **Okolní provoz:**

- Provoz 01 - Provoz 11 – 10x Airliner

Cvičení lze popsat následovně. Řídicí postupně přebírá vlastní provoz, který dle předchozí koordinace přechází na spojení a těmto poskytuje LPS. V osmé minutě cvičení musí řídicí



Obrázek 2.2: Zátěžová křivka pro cvičení č.1.

reagovat na průlet Provoz 01 prostorem odpovědnosti. Omezit Track 01 a umožnit tak klesání Provoz 01 po nestandardní trati. V sedmnácté minutě řeší řídicí koordinaci průletu Track 01 z LKTRA 30 do LKTRA 37 s ohledem na okolní provoz. Po přeletu Track 01 do LKTRA 37 řídicí stále udržuje přehled o situaci a upozorňuje na okolní provoz, zejména Track 11, kde je prostor odpovědnosti narušován VFR lety a dochází k omezování vlastního provozu, aby se předešlo sblížení. V pětatřicáté, respektive čtyřicáté minutě Track 01 a Track 11 zahlásí dokončení úkolu s žádostí o návrat na letiště Čáslav.

### 2.3.2 Cvičení č.2

Námět cvičení je obdobný s cvičením č.1 s tím rozdílem, že cvičení slouží k osvojení si postupů při poskytování LPS během mezinárodních cvičení a díky tomu řídicí navíc častěji používá tzv. brevity words. Cílem cvičení je zautomatizovat základní dovednosti řídicího např. používání Letecké orientační mapy a radio management. Nejnáročnější část cvičení nastává v momentě střídání vlastního provozu v rámci plnění stanovených letových úkolů. Řídicí musí vydat taková povolení, aby se vracející se letouny v úzkém koridoru (LKTSA



20, 21, 24) bezpečně vyhnuly letounům na přiletu do prostoru. Výšky pro vstup do prostoru a návrat na základny jsou sice navrženy tak, aby ke sblížení nedošlo, nicméně celou situaci ztěžují žádosti pilotů, které jsou blíže popsány níže, v odstavci věnujícímu se konkrétnímu popisu cvičení. Toto cvičení je charakteristické následovnými parametry.

**Prostory odpovědnosti:**

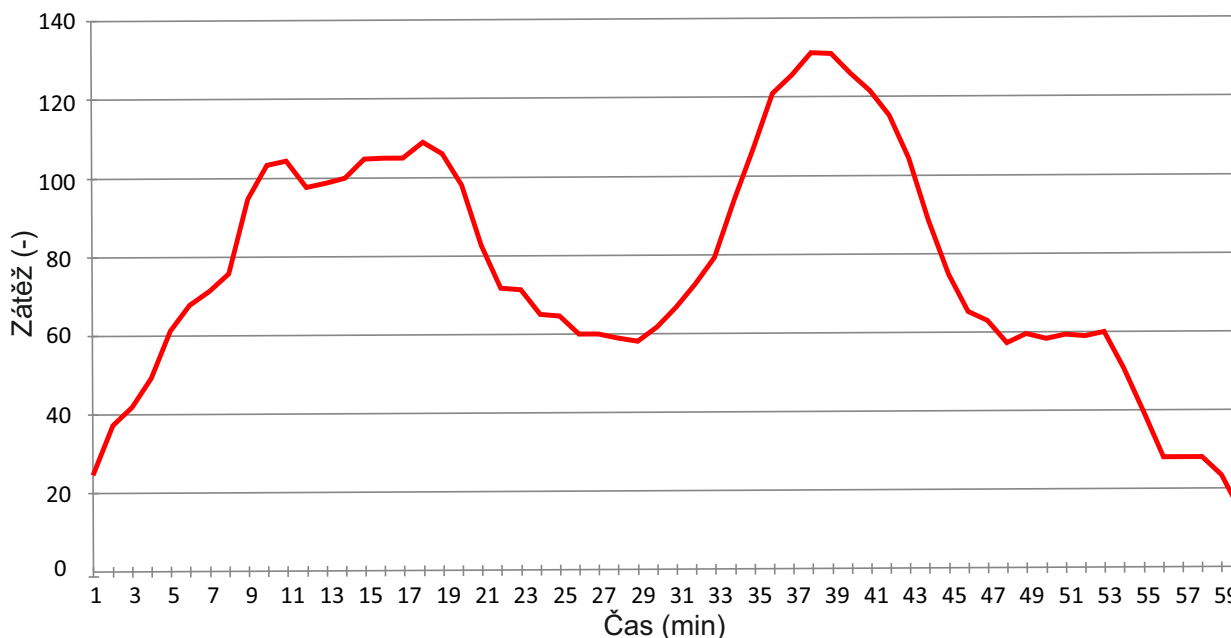
- LKTSA 3 GND – FL245
- LKTSA 20 GND – FL85
- LKTSA 21 GND – FL85
- LKTSA 24 GND – FL85

**Vlastní provoz:**

- Track 01, Track 02 LKTSA 3 (již v prostoru)
- Track 11 LKTSA 3 (již v prostoru)
- Track 21 z Letiště 1 do LKTSA 3 v čase 02:00
- Track 31 z Letiště 2 LKTSA 3 v čase 08:00
- Track 41 z Letiště 2 LKTSA 3 v čase 30:00
- Track 51 z Letiště 1 LKTSA 3 v čase 35:00

**Okolní provoz:**

- Záchranka 01
- Provoz 01 - Provoz 06 6x VFR
- 8x nekonfliktní provoz



Obrázek 2.3: Zátěžová křivka pro cvičení č.2.

Cvičení lze popsat následovně. Řídicí má již na spojení tři letouny v prostoru LKTSA 3, kteří postupně hlásí návrat na základnu přes koridory LKTSA 20, 21, 24. V páté minutě cvičení přechází na spojení Track 21, přičemž v tu samou chvíli dává řídicí pokyny letadlům Track 01, 02 informace pro návrat. Řídicí musí určit priority a rozhodnout, kdo dostane v komunikaci přednost. V šesté minutě se objevuje neznámý provoz u hranice LKTSA 3, který v danou chvíli není konfliktní s ohledem na vracející se letouny na základny, ale je třeba ho neustále monitorovat kvůli očekávanému vstupu nových letounů do prostoru. V sedmé minutě žádá dvojice Track 01, 02 o klesání z důvodu oblačnosti do výšky, která je určená jako odletová hladina z letiště do prostoru, řídicí tuto žádost musí povolit. V tu chvíli se ale vytváří konfliktní situaci, kdy proti sobě letí zmiňovaná dvojice Track 01, 02 a Track 21 z Letiště 1. Řídicí vydává pokyn Track 21 ke změně výšky a v tu chvíli přechází na spojení Track 31 z Letiště 2. Řídicí dává všem letounům na spojení informaci o poloze těch ostatních až do úspěšného vyhnutí a o několik minut později i o neznámém provozu v koridoru. Ve třiatřicáté minutě je vydáno omezení pro Track 21 kvůli průletu zkoordinovaného provozu prostorem LKTSA 3. V následujícím čase se okolo LKTSA 3 pohybuje okolní provoz, o kterém je všem





letadlům na spojení dávána informace. V devětatřicáté minutě opustí zkoordinovaný provoz LKTSA 3 a je pro Track 21 zrušeno omezení a zároveň na žádost pilota vydány pokyny pro návrat na základnu. O chvíli později přechází na spojení poslední dva letouny Track 41 a Track 51, vůči kterým jsou později uplatňovány stejné postupy pro zabezpečení rozstupů od vracejícího se Track 21 jako v úvodu cvičení. Po vyhnutí se je cvičení ukončeno.

### 2.3.3 Cvičení č.3

Novým a hlavním námětem cvičení je vypořádání se s nestandardní situací, která zákonitě zvyšuje hladinu náročnosti. V tomto cvičení nemá řídící na spojení takové množství letounů jako v předcházejícím, ale vzhledem ke vzniku nestandardní situace se jeho obtížnost zvedá. Řídící musí přesněji a důsledněji předávat informace o nově vzniklé situaci svému koordinátorovi a stejně tak důsledně přistupovat ke komunikaci s pilotem, která musí být jasná, stručná a hlavně srozumitelná. K tomu je potřeba předem osvojený teoretický základ řešení nestandardních situací čerpající hlavně z předpisu letecké frazeologie. Toto cvičení je charakteristické následovnými parametry.

#### Prostory odpovědnosti:

- LKTRA 76 1000ft AGL – FL75
- LKTRA 77 1000ft AGL – FL245
- LKTRA 78 1000ft AGL – FL245
- LKTRA 79 FL75 – FL245
- LKTRA 30 FL 95 – FL305
- LKTSA 26 300ft AGL – 1000ft AGL
- LKTSA 27 300ft AGL – 1000ft AGL

#### Okolní aktivované prostory:

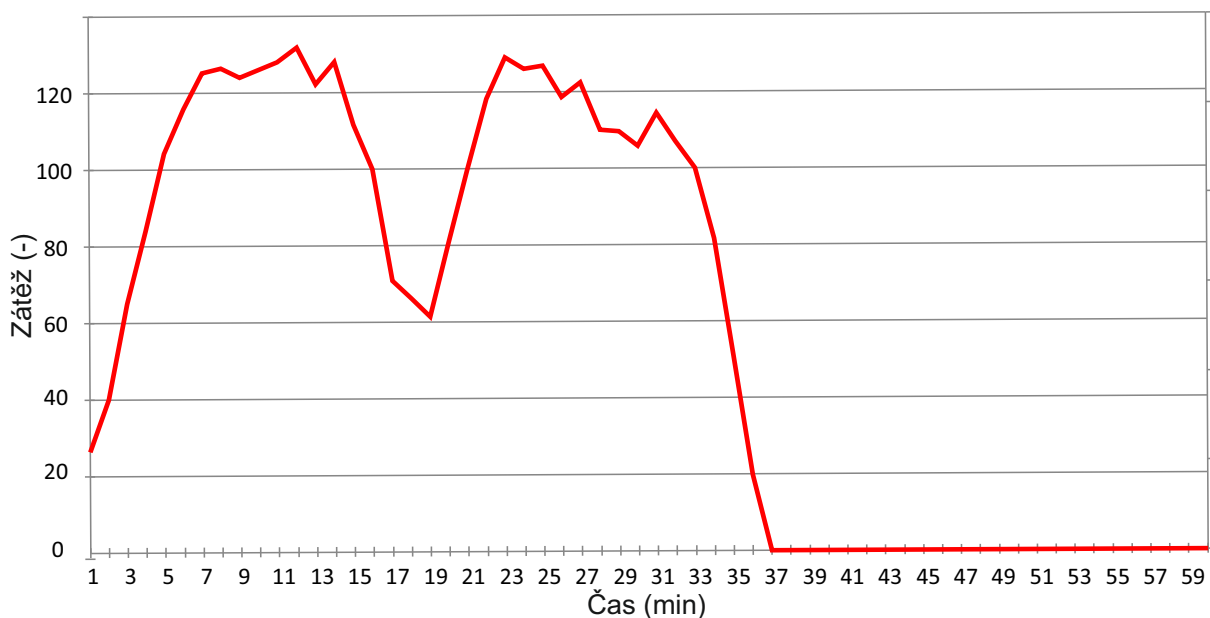
- LKTRA 75 FL95 – 245

### Vlastní provoz:

- Track 01 zálet v LKTRA 30, vzlet z Letiště 1 se spuštěním cvičení
- Track 02 přes LKTSA 26 do LKTRA 76, 77, 78, 79 a zpět přes LKTSA 27, v čase 01:00
- Track 03 přes LKTSA 26 do LKTRA 76, 77, 78, 79 a zpět přes LKTSA 27, v čase 03:00

### Okolní provoz:

- 1x konfliktní Airliner
- 2x neznámý VFR
- 15x nekonfliktní Airliner



Obrázek 2.4: Zátěžová křivka pro cvičení č.3.

Cvičení lze popsat následovně. Se spuštěním cvičení přechází Track 01 na spojení a žádá povolení pro zahájení záletu. Ve druhé minutě přechází na spojení Track 02 a dostává odletové povolení do výcvikových prostorů LKTRA 76-79 přes LKTSA 26. Po necelé minutě hlásí pilot radarový kontakt s okolním provozem a posléze i vizuální, který se nachází mimo LKTSA



26, ale při současném kurzu do ni později vstoupí (stane se konfliktním pro Track 03). Ve čtvrté minutě přechází na spojení Track 03 a dostává od řídicího informaci o již zmiňovaném provozu. V následujících deseti minutách řídicí monitoruje vlastní provoz a informuje piloty o horizontálním či vertikálním narušení hranic výcvikových prostorů a dává jim informace o okolním provozu vně prostoru. V patnácté minutě Track 02 slovně nereaguje na výzvy řídicího o narušení hranice prostoru a neodpovídá ani na zkoušku spojení. Tím vzniká nestandardní situace jednostranné ztráty spojení. Track 02 nereaguje ani na vyvolávání letounem Track 03. Řídicí vysílá naslepo zprávy směřující k Track 02 a zároveň informuje svého koordinátora o situaci. Track 03 má radarový kontakt s Track 02, je k němu naveden do skupiny a stává se vedoucím. Ve dvojici se dle pokynu řídicího vracejí na základnu. V pětadvacáté minutě Track 02 obnoví spojení s řídicím. O minutu později hlásí Track 01 poruchu navigačních přístrojů a žádá okamžitý návrat na základnu. Po vydání pokynů k návratu pro Track 01 tento točí opačným směrem a řídicí je nucen pokračovat dle postupů pro vektorování s poruchou směrových přístrojů. Cvičení končí předáním všech letadel na řídicího z Letiště 1.

#### 2.3.4 Cvičení č.4

Námětem tohoto cvičení je, podobně jako u předcházejícího, řešení nestandardní situace a správná komunikace se svým koordinátorem. Cvičení je obohaceno nutnou spoluprací dvou řídicích během ostrého vzletu hotovostních letounů, které má na spojení druhý řídicí. Vedle prohloubení návyků při řešení nestandardních situací je dalším cílem zabezpečit bezpečný průlet hotovostních letounů vlastním prostorem odpovědnosti tak, aby byly naplněny dohody a postupy pro tento typ řízení. Řídicí musí nově brát v úvahu i dva „pohyblivé“ a různě definované prostory okolo zakročovaného letounu i letounů zakročujících se středem v jejich aktuální poloze. Toto cvičení je charakteristické následovnými parametry.

##### **Prostory odpovědnosti:**

- LKTRA 37 FL95 – FL420
- LKTRA 31 1000ft AGL – FL245
- LKTRA 32 A050 – FL245



- LKTRA 33 A050 – FL245
- LKTRA 34 FL95 – FL245
- LKTRA 35 FL95 – FL245

**Okolní aktivované prostory:**

- LKTRA 62 A030 – FL245
- LKTRA 36 FL125 – FL245
- LKTRA 63 FL95 – FL125

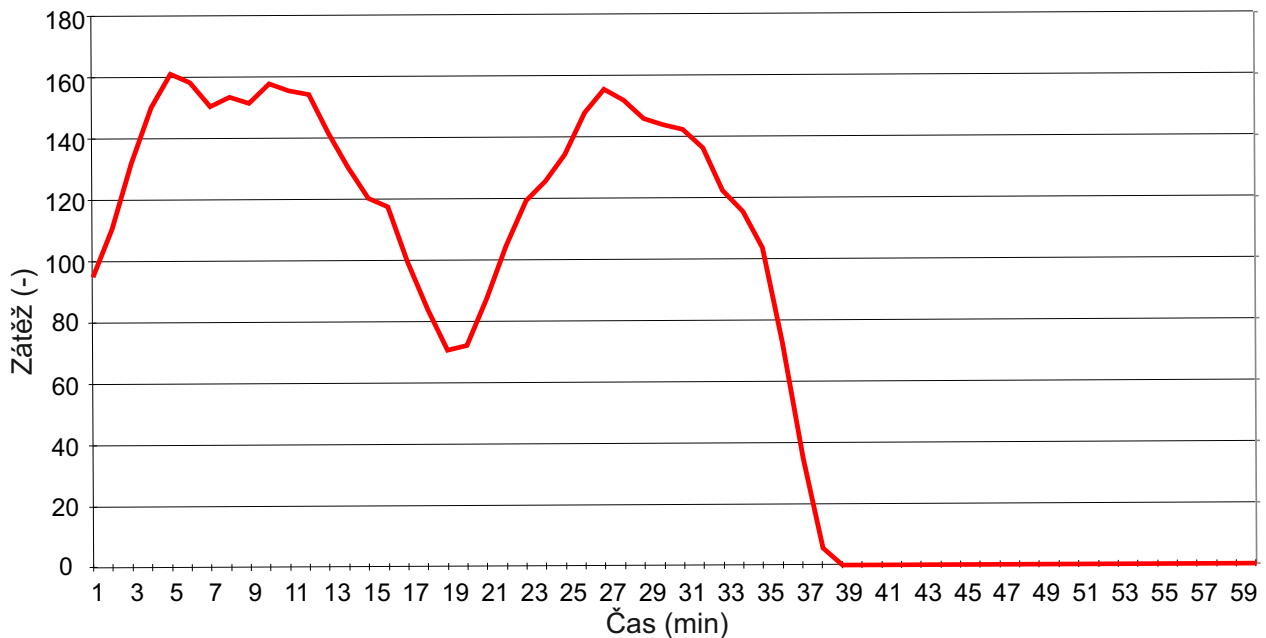
**Vlastní provoz:**

- Track 01 činnost v prostorech LKTRA 31, 32, 33 (vzlet se spuštěním cvičení)
- Track 02 činnost v prostorech LKTRA 34, 35 (v čase 03:45)
- Track 03 západní část LKTRA 37, přes LKTRA 62 (vzlet se spuštěním cvičení)
- Track 04 východní část LKTRA 37, přes LKTRA 36 (vzlet se spuštěním cvičení)

**Okolní provoz:**

- 2x konfliktní Airliner
- 8x nekonfliktní Airliner
- 4x neznámý VFR
- 2x hotovostní letouny

Cvičení lze popsat následovně. Řídící postupně přebírá na spojení Track 03 a Track 04 do prostoru LKTRA 37 a upravuje letové parametry s ohledem na okolní provoz v LKTRA 62, 36 a 63, o kterém později dává pilotům informaci. Dále přebírá Track 01 do prostorů LKTRA 31, 32 a 33. Po vstupu do Track 01 do prostoru odpovědnosti se objevuje neznámý



Obrázek 2.5: Zátěžová křivka pro cvičení č.4.

VFR provoz, vůči kterému musí řídicí držet bezpečné rozstupy. V páté minutě řídicí přebírá na spojení Track 02, který směřuje do vzdálenějších prostorů LKTRA 34, 35. Díky tomu dochází k dalšímu omezení Track 01, aby byl zajištěn průlet prostory LKTRA 31, 32 a 33. Ve stejném okamžiku začíná zákrok hotovostních letounů, s jejichž řídicím musí být provedena koordinace. Hotovostní letouny postupně vstoupí do LKTRA 31-35 a dojde k omezení Track 01 a 02. Mezi tím řídicí stále informuje Track 01 o poloze neznámého VFR provozu. V desáté minutě řídicí napomíná Track 03 i 04 o nedodržení stanovených hranic LKTRA 37 a možném narušení okolních prostorů s obsazených jiným provozem. V patnácté minutě je řídicímu oznámen nutný průlet Airlineru přes LKTRA 37, kde postupně musí omezit Track 03 a 04 a o tomto provozu jim dát informaci. Ve dvacáté minutě opouští hotovostní letouny LKTRA 34 a řídicí ruší omezení pro Track 02. O dvě minuty později se ale hotovost opět vrací zpět na základnu a Track 01 a 02 jsou opět omezeny. Mezi tím řídicí neustále napomíná Track 03 a 04 o nedodržení hranic prostoru a dále předává informaci o prolétávajícím Airlineru. V pětadvacáté minutě Track 03 přestává reagovat na výzvy řídicího o návratu do svého výcvikového prostoru, z čehož plyne nestandardní situace oboustranné ztráty spojení. Řídicí



naveďte Track 04 k Track 03 se ztrátou spojení a vydává instrukce pro společný návrat na základnu, který je zahájen ve třicáté minutě. O dvě minuty později žádají o návrat na základnu jak Track 01, tak i Track 02. Po vydání instrukcí k návratu cvičení končí.

### **2.3.5 Cvičení č.5**

Námětem je podobně jako u cvičení č.2 nácvik řízení provozu během mezinárodního cvičení. Řídicí má postupně na spojení několik různých letadel (jak letounů ze základen, tak vrtulníků, které vzlétají a přistávají na improvizovaných plochách uvnitř střelnice LKTSA 3). Cílem cvičení je nácvik nestandardních situací v relativně malém prostoru střelnice s větším množstvím vlastních letadel na spojení, které musí být vyzvány k udělení přednosti nouzovému letu. Toto cvičení je charakteristické následovnými parametry.

#### **Prostory odpovědnosti:**

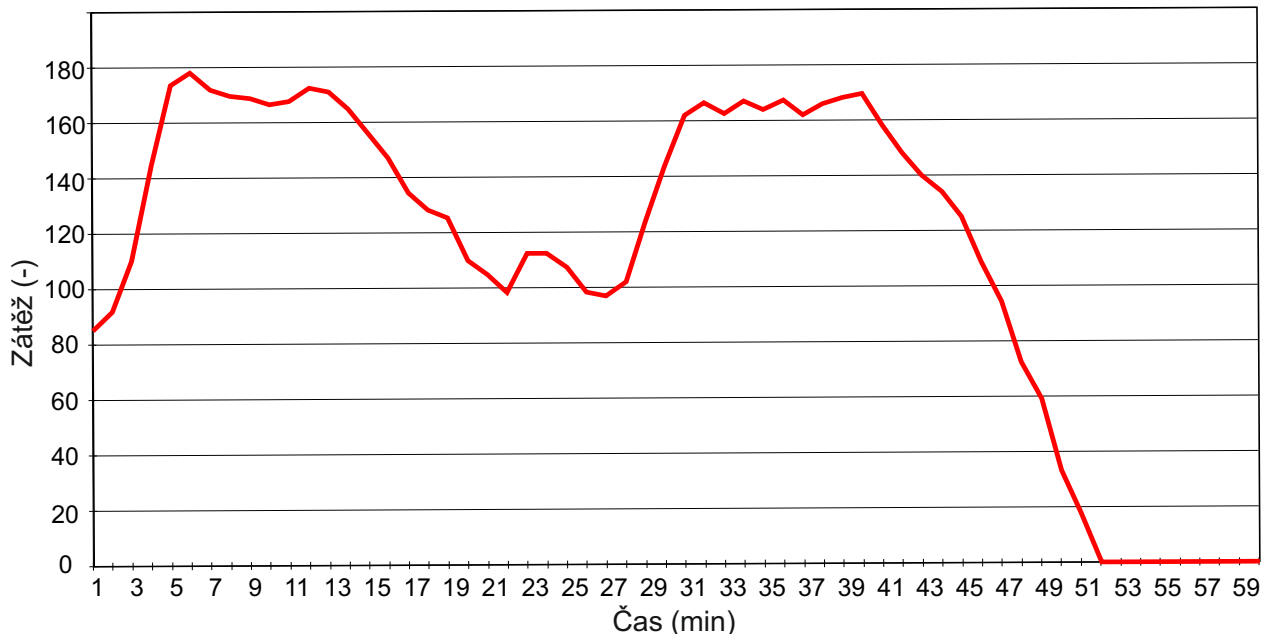
- LKTSA 3 GND – FL245
- LKTSA 20, 21, 24 GND – FL85

#### **Vlastní provoz:**

- Track 01 již v TSA 3
- Track 11, Track 12 přes LKTSA 20 a 24 do LKTSA 3
- Track 21, Track 22 přes LKTSA 21 a 24 do LKTSA 3
- Track 31 přes LKTSA 20 a 24 do LKTSA 3
- Track 41 přes LKTSA 21 a 24 do LKTSA 3
- Track 51, Track 52 vzlet z improvizované plochy

#### **Okolní provoz:**

- neznámý VFR
- Airliner



Obrázek 2.6: Zátěžová křivka pro cvičení č.5.

Cvičení lze popsat následovně. Po zapnutí cvičení žádá Track 01 instrukce pro návrat na základnu. Vzápětí vzlétají z Letiště 1 Track 11, 12 a z Letiště 2 Track 21, 22. O dvě minuty později přecházejí na spojení všechny čtyři letouny ze základen směřující přes koridory LKTSA 20, respektive LKTSA 21 do LKTSA 24 a dále na střelnici LKTSA 3. Díky chybné koordinaci koordinátora jsou všechny letouny na stejné výšce a řídicí řeší jejich dekonflikci. V páté minutě vzlétá dvojice vrtulníků Track 51, 52 z improvizované plochy v LKTSA 3. V šesté minutě opouští Track 01 střelnici a přes koridory směřuje na základnu. Řídicí kontroluje, zda-li Track 01 není hladinově konfliktní se čtveřicí letounů ze základen. V desáté minutě se k LKTSA 3 přibližuje nízký neznámý VFR provoz, který by mohl ohrozit dvojici vrtulníků. Vrtulníky nemají kontakt s provozem, proto řídicí nadále dává informace o tomto provozu. Ve čtrnácté minutě čtveřice letounů ze základen vstupuje do střelnice LKTSA 3. Jsou upozorněni na dvojici vrtulníků a výškově omezeni. O minutu později se neznámý VFR vzdaluje od LKTSA 3 a neohrožuje bezpečnost vrtulníků. Následujících deset minut řídicí hlídá dodržování vydaných omezení pro zabezpečení vertikálních rozstupů mezi vrtulníky a letouny a jejich případné porušení ihned oznamuje. Monitoruje okolní provoz vně LKTSA 3



a oznamuje provozu na spojení jakýkoli blížící se provoz k prostoru. V pětadvacáté minutě přechází na spojení Track 41 směřující přes koridory na střelnici. Ve třicáté minutě hlásí Track 12 střet s ptákem a žádá okamžitý návrat na základnu. Návrat je povolen a ostatní uživatelé prostoru jsou ihned omezeni jak výškou, tak kurzem. Řídicí zjišťuje, že Track 12 nedrží kurz dle vydaných pokynů a zahajuje radarové vektorování, přičemž musí vzít v úvahu protisměrný Track 41 a co nejnižším počtem změn kurzu se mu vyhnout. Vzhledem k nepříznivým meteorologickým podmínkám totiž nelze v koridoru uplatnit vertikální rozstupy. V devětatřicáté minutě vstupuje do prostoru LKTSA 24 neznámý VFR provoz. O minutu později žádá trojice letounů z oblasti střelnice návrat na základny z důvodu špatného počasí. Řídicí návrat povoluje a dává informace o provozu v koridoru s radou k vyhnutí, umožní-li to meteorologické podmínky. Ve dvačtyřicáté minutě vzniká další nestandardní situace u Track 41. Ten žádá o návrat co nejkratší cestou na základnu z důvodu indikace malého množství paliva. Na pokyn řídicího jeho koordinátor domluví se sousedním stanovištěm návrat jeho prostorem odpovědnosti a po předání Track 41 na toto stanoviště cvičení končí.

### 2.3.6 Shrnutí výše popsaných cvičení

Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, cvičení mají různý koeficient náročnosti, do kterého se započítává úplně vše, co řídicí v danou chvíli musí vykonat. Ať už se s přibývajícimi zkušenostmi jedná již o rutinní přebírací proceduru, anebo řešení nestandardní situace. I po několikaleté praxi lze zcela upřímně říci, že jeden nestandardní let představuje pro kapacitu řídicího daleko vyšší zátěž, než několik letounů v několika různých prostorech. Proto se při posuzování náročnosti nelze řídit pouze množstvím letadel na spojení a létaným úkolem. Tento fakt je zjevný při srovnání druhého cvičení, kde má řídicí na spojení postupně až sedm letounů, se cvičením třetím, kde jsou letouny na spojení v uvozovkách pouze tři. Maxima posledních dvou cvičení sice nabývají podobných hodnot, ale jak je patrné, zhruba v polovině nastává útlum, který u cvičení č.5 trvá zhruba osm minut, během kterých má řídicí trochu času na mentální odpočinek na rozdíl od cvičení č.4, kde tato doba trvá přibližně minuty dvě.





Předmětem této studie je zhodnocení, zda se různá pracovní zátěž v jednotlivých cvičeních odrazí i na fyziologických procesech v těle řídicího.

## 2.4 Subjekty

Měření se dobrovolně zúčastnili čtyři řídicí letového provozu s platnou místní doložkou Radarový řídicí, který je oprávněn poskytovat radarové služby v LKTRA anebo ve FIR Praha po předchozí koordinaci se stanovištěm, v jehož prostoru odpovědnosti jsou letouny na spojení. U žádného z nich však doba od úspěšného získání licence nepřesáhla dva roky. Každý z dobrovolníků podobným simulovaným cvičením již alespoň jedenkrát během svého výcviku prošel, proto se parametry cvičení pozměnily a přidalo se jim na náročnosti (více přeslechů a „neposlušnosti“ ze strany pseudopilotů). Dále se na měření podílela skupina podehry, ve které byli jeden až dva pseudopiloti, osoba nahrazující roli ŘLP z okolních stanovišť LPS a pochopitelně instruktor, který dohlížel na práci figuranta.

## 2.5 Prostředí a podmínky experimentu

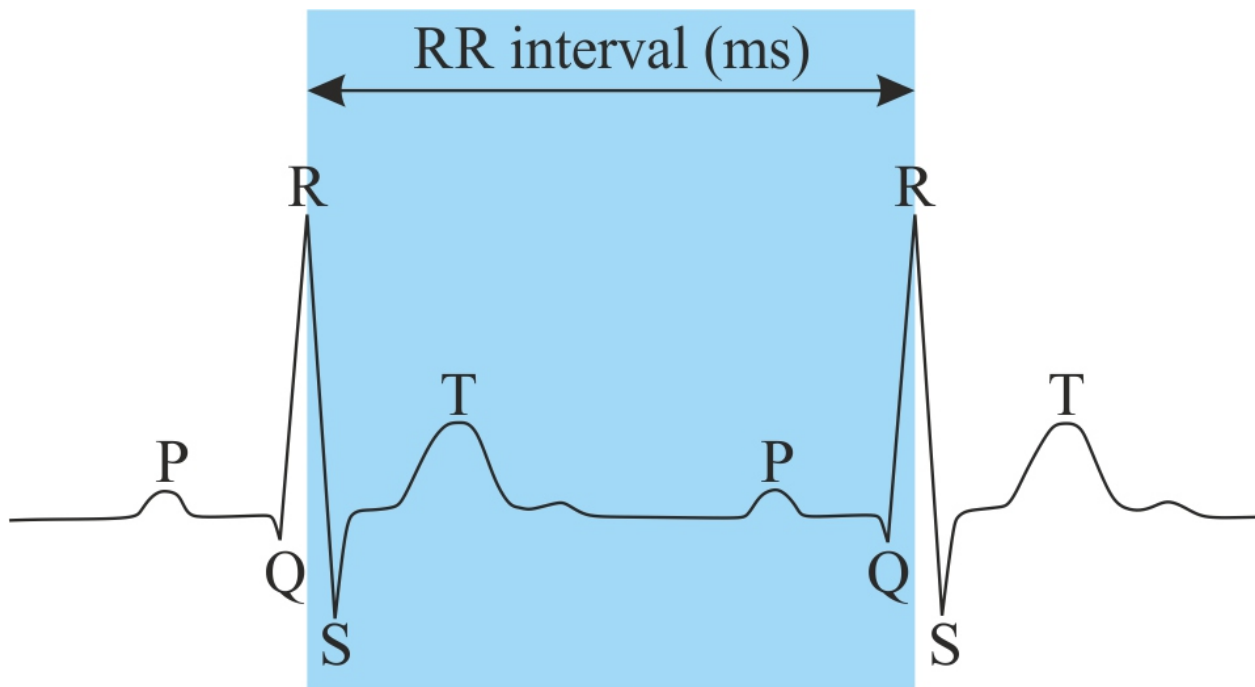
Měření probíhalo na 261. středisku řízení a uvědomování (Control and reporting centre – CRC) spadající pod 26. pluk velení, řízení a průzkumu Brandýs nad Labem – Stará Boleslav. CRC sídlí v zodlněném bunkru pod úrovní země, kde se slouží ve dvanácti nebo v pětadvacetihodinových směnách, tudíž jsou na ŘLP kladeny i jiné, než pracovní nároky – absence přirozeného světla a čerstvého vzduchu, neustálý hluk od klimatizace a stálá okolní teplota mezi 25-26°C. Vzhledem k plnění služebních povinností a úkolů personálu CRC pro NATO Integrated Air and Missile Defence System (NATINAMDS), nebylo možné provádět měření ve stejných denních dobách, ale právě tehdy, kdy nebyl obsazený simulátor a skupina podehry.

## 2.6 Princip měření

Metodou měření byl sběr elektrocardiogramu (EKG) po dobu probíhajícího cvičení. Řídicí na sobě měl několik senzorů, které snímaly jeho srdeční rytmus. Druhotnou funkcí měřicího

přístroje byl sběr informací o dýchání, jakožto o hloubce nádechu a výdechu a jeho frekvence. Bohužel ale už v průběhu měření bylo patrné, že tento výstup nebude zcela relevantní, neboť v několika případech byla zobrazovaná křivka na monitoru naprosto odlišná od reálného nádechu a výdechu figuranta, proto se do výsledků měření tyto hodnoty nijak nepromítly.

Pro sběr EKG byl použit VLV-LAB [13], který má vzorkovací frekvenci 1000Hz. Jedná se o jednosvodové EKG, jehož výstupem je EKG křivka. Základ EKG tvoří QRS komplex, pro který jsou typické vrcholy R, jak je patrné z Obrázku 2.7. Tyto vrcholy byly detekovány Pan – Tompkinsonovou metodou [14, 15].



Obrázek 2.7: QRS komplexy s vyznačenými RR intervaly

Metoda v reálném čase analyzuje změny v srdeční frekvenci. Pracuje na principu digitální analýzy sklonu, amplitudy a šířky EKG křivek. Algoritmus je tvořen dvěma učebními fázemi a následně detekcí. Po sobě jdoucí R vrcholy tvoří tzv. RR intervaly, které jsou dále analyticky zpracovávány. V tomto případě došlo ke zpracování signálu metodou Wavelet transformation (vlnková transformace).



## 2.7 Zpracování dat

Variabilita srdeční frekvence (HRV) je fyziologický jev variace srdečních rytmů. I v klidových stavech totiž dochází k spontánním kolísáním intervalů mezi dvěma po sobě jdoucími srdečními rytmy. Spektrální analýza HRV je neinvazivním a snadno proveditelným nástrojem pro hodnocení srdeční autonomní aktivity [16]. Díky spektrální analýze lze získat dva široce používané parametry kritické frekvenční domény:

Nízkofrekvenční výkon (LF; 0,04 – 0,15Hz), který představuje jak sympatické, tak vagální vlivy. Vysokofrekvenční výkon (HF; 0,15 – 0,40Hz), který odráží modulaci vagálního tónu [17]. Kromě toho jejich poměr, tj. LF/HF, naznačuje rovnováhu mezi sympatickými a vagálními tóny.

Analýza HRV hraje důležitou roli při popisu autonomních dysfunkcí pacientů, sledování přirozených výkyvů autonomní funkce, hodnocení autonomních změn po různých zásazích do organismu a určování prognóz s nimi spojenými.

K získání samotné spektrální analýzy je důležité splnit několik kroků. V první řadě je třeba samotná data navzorkovat a digitalizovat. Následně určit RR intervaly a vytvořit z nich vektor (řadu údajů) pro další zpracování. Pro účely našeho měření byla použita metoda zpracování dat zmíněnou vlnkovou transformací.

HRV analýzu lze rozdělit do dvou kategorií podle doby, po kterou se data sbírají. V první řadě se jedná o krátkodobou HRV analýzu, pro níž sběr dat trvá maximálně 60min a princip tohoto typu analýzy byl využit i pro účely toho měření. S úspěchem se využívá pro zjišťování fyzické i psychické aktivity organismu a odráží vliv prostředí na organismus (zejména teplotu).

Naproti tomu existuje dlouhodobá HRV analýza, která je založena na sběru dat v intervalu zpravidla 1 – 24 hodin. Výhodou je to, že umožňuje komplexní prověření organismu při různých činnostech během celého dne. Nevýhodou je pak její časově náročné zpracování. Dlouhodobý sběr dat totiž obsahuje velké množství šumu, se kterým je třeba se vypořádat.

Při analýze srdečního rytmu proto hodnotila intenzita oscilace srdeční frekvence na jednotlivých srdečních frekvencích [18], tzv. výkonová spektrální hustota. Hledaný spektrální



výkon se získá součtem spektrálních hustot na všech frekvencích určitého frekvenčního pásma. Tento si lze představit jako plochu pod křivkou. Nejčastěji hodnocenými parametry bývá spektrální výkon nízkofrekvenčního pásma (LF power), spektrální výkon vysokofrekvenčního pásma (HF power), jejich poměr (LF/HF ratio) a jejich součet (celkový spektrální výkon – total power – TP). A právě LF/HF poměr se využívá pro výzkum rovnováhy mezi sympatikem a parasympatikem. Sympatikus je aktivován nejčastěji při stresu, který se projevuje jako reakce na jakoukoli významnou tělesnou a duševní zátěž. Parasympatikus naopak směřuje k útlumu a je odpovědný za přechod od sympatiku do klidového stavu, zpomaluje srdeční činnost a tlumí tělesné i psychické pochody.

Ačkoli je spektrální analýza variability srdečního rytmu široce využívána, je potřebné si uvědomit, že standardní přístup s využitím Fourierovi transformace nezabespečí, aby výše vzpomínané pásma bylo možné zobrazit v čase. Proto byla pro zpracování naměřených dat použita vlnková transformace sloužící především ke zpracování nestacionárních obrazů a signálů. Historicky nahrazuje Fourierovu transformaci, která byla základem pro zpracování analogových i digitálních signálů až do poloviny 20. století [19]. Princip vlnkové transformace spočívá v tom, že tvoří časově omezené funkce, které se nazývají vlnky. Díky tomuto zobrazení lze získat informaci nejen o přítomnosti určité frekvence, ale i o okamžiku jejich výskytu. Každá vlnka totiž osciluje pouze v okolí bodu svého momentálního výskytu, což je klíčové pro prostorovou lokalizaci.

Vlnková transformace se řadí do skupiny víceměřítkových transformací, které umožňují účinnější zpracování a analýzu zkoumaných dat. Lze si to představit jako zpracování signálů v různých měřítkových rovinách obsahující různě velké detaily a ty pak zkoumat nezávisle na sobě. Hlavní výhodou je, že vlastnosti nebo rysy signálů, které se neprojeví v rovině jedné, mohou být odhaleny v rovině jiné.

Tato metoda se dá využít k odfiltrování nežádoucích rušení nebo jako ztrátová komprese [?]. Docílí se toho rozložením signálu do jednotlivých částí a ty z nich, které mají malý vliv, se odstraní a posléze se opětovně poskládají dohromady a vznikne tak nový signál s menším počtem dat, avšak ten hlavní hledaný signál se díky tomu zvýrazní.



Sesbíraná data, ve formě RR intervalů u jednotlivých subjektů byla proto dále hodnocena právě prostřednictvím vlnkové transformace. Uvedené bylo realizováno z důvodu vykreslení a následného hodnocení spektra RR intervalů v čase.

Vlnková transformace je konvolucí vlnkové funkce  $\Psi(t)$  se signálem  $x(t)$ . Ortonormální dyadické diskrétní vlnky jsou spojeny se škálovacími funkcemi  $\Phi(t)$ . Škálovací funkce může být spojena se signálem za účelem produkce aproximačních koeficientů  $S$ . Diskrétní vlnková transformace může být zapsána jako:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi_{m,n}(t)dt \quad (2.1)$$

Výběrem ortonormálního vlnkového základu  $\Psi_{m,n}(t)$  můžeme získat originál. Aproximační koeficient signálu na měřítku  $m$  a v místě  $n$  může být zapsán jako

$$S_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Phi_{m,n}(t)dt \quad (2.2)$$

Ale diskrétní vstupní signál má konečnou délku  $N$ . Tudíž rozsah měřítek pak může být zjištěn v  $0 < m < M$ . Hencova diskrétní aproximace signálu může být zapsána jako

$$x_0(t) = x_M(t) + \sum_{m=1}^M d_m(t) \quad (2.3)$$

Kde je hlavní aproximační signál na měřítku  $M$  jako  $x_M(t) = S_{M,n}\Phi_{M,n}(t)$  a detailní aproximační signál koresponduje se škálou  $m$ , konečná délka signálu je dána

$$d_m(t) = \sum_{n=0}^{M-m} T_{m,n}\Psi_{m,n}(t) \quad (2.4)$$

Aproximační signál ve specifické škále je kombinací aproximace a detailu v dalším nižším rozlišení

$$x_m(t) = x_{m-1}(t) - d_m(t) \quad (2.5)$$

Výše uvedený princip byl pro účely popisu převzat z Saritha et al. [20]. Zpracování časových řad RR intervalů proběhlo obdobnou formou za použití software Laboratoře lidského faktoru a automatizace v letectví.



V rámci práce bylo prostřednictvím spomínaného software vytvořen průběh poměru nízkých a vysokých spektrálních pásem, tj. LF/HF. Důvodem je, že tento parameter odráží sympatovagalní balanc, který může být vhodný pro popis reakce organismu na zátěžovou situaci [21].

## 2.8 Statistická analýza

Statistická analýza sestávala z určení míry závislosti mezi trendem zátěže získaného z charakteru cvičení (viz Obr.2.2-2.6) a vypočítaným průběhem LF/HF poměru. Uvedené však představovalo několik problémů, které bylo potřeba vyřešit před samotným vykonáním této analýzy.

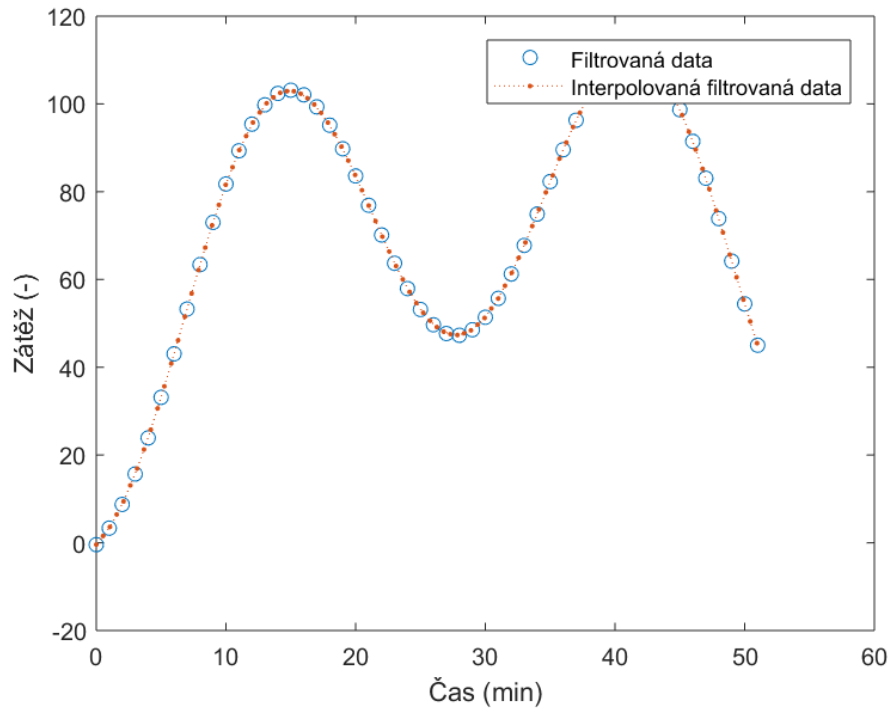
Základním problémem bylo, že data charakterizující průběh zátěže cvičení jsou diskrétně a málo vzorkována. Pro vytvoření více spojitě časové řady byl proto využitý curve fitting tool box, který je součástí programového prostředí Matlab. Z charakteru průběhů ve zmiňovaných grafech je zřejmé, že aproximaci křivky je možné vytvořit pomocí fitování sinusoidy. Uvedené vycházelo ze vztahu:

$$Y_i = C + \alpha \sin(\omega T_i + \phi) + E_i \quad (2.6)$$

kde  $C$  je konstanta definující průměrnou hladinu  $\alpha$  je amplituda sinusové vlny,  $\omega$  je frekvence a  $T_i$  je časová proměnná,  $\phi$  je fáze a  $E_i$  je chyba v aproximování vstupu  $Y_i$ .

Samozřejmě fitování aproximování signálu sinusoid může probíhat v několika řádech. Účelem této aproximace bylo najít takovou sinusoidu, která by popisovala vytvořenou zátěžovou křivku co nejlépe, ve smyslu zbytkové chyby.

Dalším problémem byl nesoulad vzorkovací frekvence mezi fyziologickými daty a zátěžovými křivkami. Zátěžové křivky byly v podstatě vzorkované 1 Hz, kdežto výsledná křivka poměru LF/HF vykazovala téměř 0,5Hz (v závislosti na konkrétním případě). Proto byla aproximovaná zátěžová křivka ještě lineárně preinterpolována tak, aby měla stejný počet vzorků, jako křivka charakterizující LF/HF průběh.

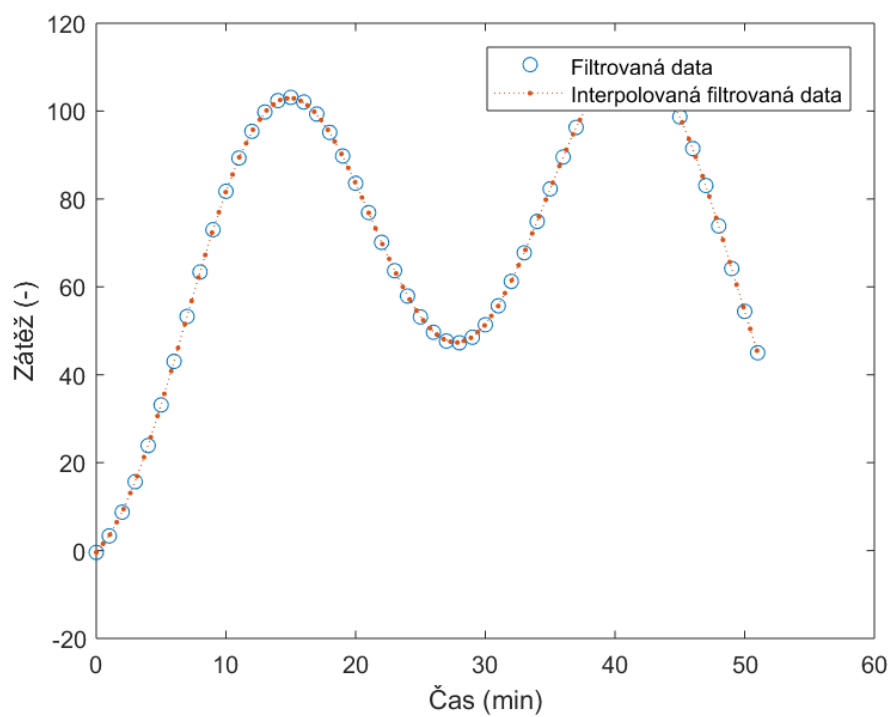


Obrázek 2.8: Ukázka aproximovaných, filtrovaných a interpolovaných data zátěže pro cvičení 2.

Třetím a posledním problémem bylo filtrování LF/HF křivky, a to z důvodu zachycení jejího trendu. Pro tyto účely byl využit mediánový filtr s nastavením okna na 10 vzorků. V případě takového, v podstatě robustního, filtrování bylo možné použít i jiné metody. Vzhledem k charakteru práce a snaze o zjednodušení postupu byla vybrána právě jednoduchá forma mediánového filtru.

Příklad takto upravených dat je znázorněn na Obrázku 2.8 a 2.9.

Takto připravená data byla dále korelována ve snaze zjistit jejich vzájemnou závislost. V případě výskytu statisticky významné závislosti mezi těmito sledovanými parametry by bylo možné tvrdit, že zátěž, respektive náročnost realizovaného úkolu koresponduje s mentálním vypětím.



Obrázek 2.9: Ukázka filtrovaných data parametru LF/HF pro cvičení 2 u subjektu 2.





## 3 Výsledky

### 3.1 Základní popis výsledků pro cvičení č.1

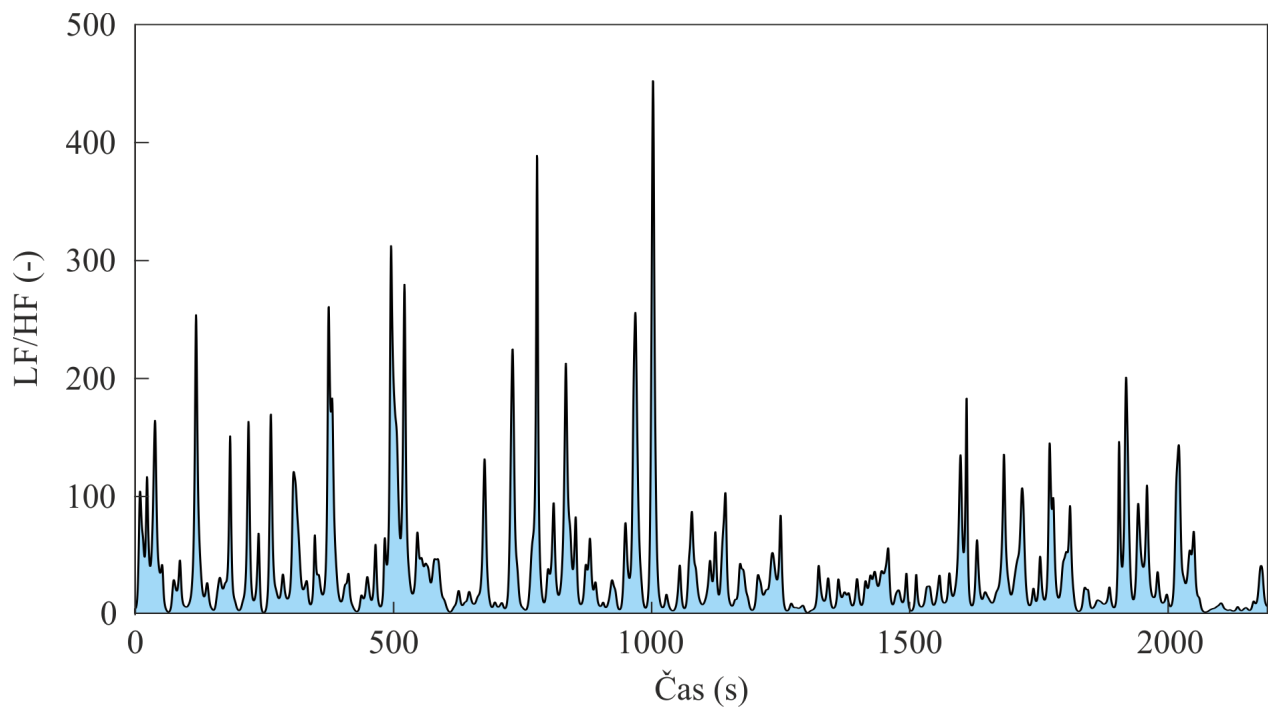
Pro první cvičení jsou charakteristické dva zátěžové vrcholy (Obrázek 11). První vrchol charakterizuje přebírací proceduru letadel na spojení a informaci o pracovních prostorech LKTRA. Za tímto vrcholem je propad, tzv. údolí, kdy řídící pouze monitoruje jemu svěřený provoz a udržuje povědomý o vzdušné situaci. Druhý vrchol je tvořen zejména reakcemi na okolní známý i neznámý provoz a od něj tvořených rozstupů.

Z Obrázku 3.1 pak vyplývá, že subjekt 1 byl v první polovině cvičení ve vyšší stresové zátěži, než v polovině druhé. Je to dáno pravděpodobně nejistotou v přebírací proceduře a ne zcela zažitou frazeologií a také tím, že úvody cvičení jsou pro řídícího obecně náročnější. Nějakou dobu totiž trvá, než se rozmluví a vžije do situace. Druhá polovina cvičení již odpovídala předpokládanému rozložení pracovní zátěže.

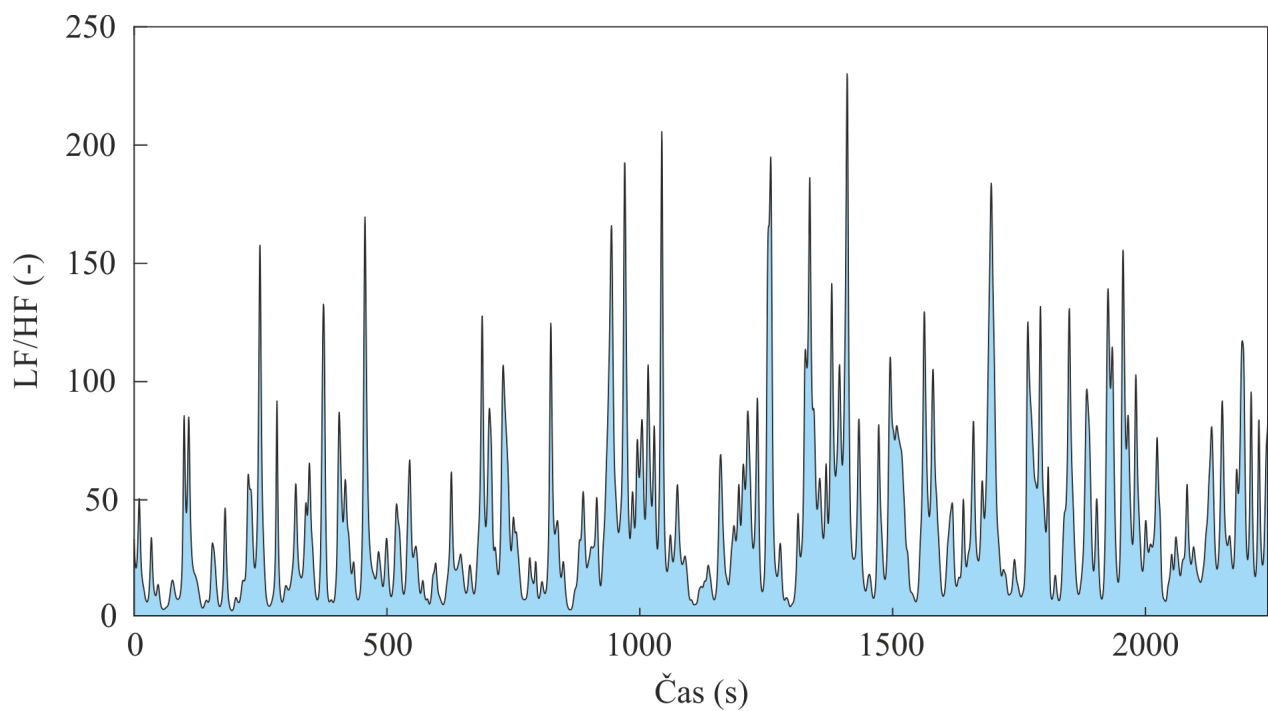
Z Obrázku 3.2 vyplývá, že subjekt 2 byl ve vysoké zátěži po celou dobu cvičení. Úvod cvičení měl klidnější, ale zhruba od poloviny cvičení se dostal do vyšší stresové zátěže, která trvala až do konce cvičení. Tato situace může být zapříčiněna různými faktory. Jeden z nich je ten, že řídící udělá už v úvodu cvičení pár chyb, které se s ním táhnou ještě několik jednotek až desítek minut a s dalšími přibývajícími úkoly v průběhu cvičení se neúměrně plní jeho kapacita. Dalším faktorem může být jeho psychické rozpoložení v době cvičení, tlak ze strany instruktora atd.

Na Obrázku 3.3 je vidět, podobně jako na Obrázku 3.1, že byl řídící v první polovině pod větší zátěží. Příčiny takového rozložení mohou být obdobné s příčinami popsány u subjektu 1.

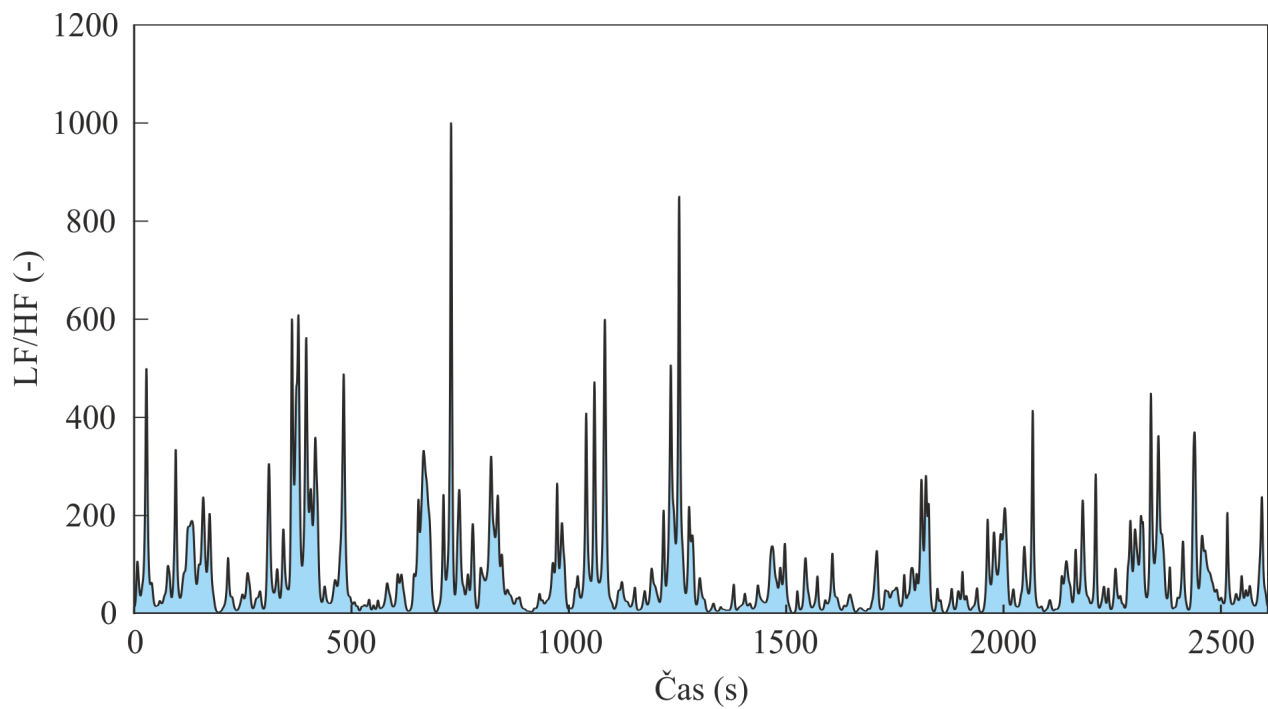
Na Obrázku 3.4 je u subjektu 4 patrná zvýšená zátěž v průběhu prvních zhruba dvou třetin cvičení. Může to být důsledkem nedorozumění vzniklé situace z úvodu cvičení. Dalším relativně častým jevem je i to, že řídící v klidové části cvičení (kdy se téměř nic neděje) začne přemýšlet na tím, zda-li na něco nezapomněl, popř. jestli vše udělal správně a díky tomu sám sebe přivádí do stresu, aniž by to bylo opodstatněné jakýmkoli vnějším vlivem.



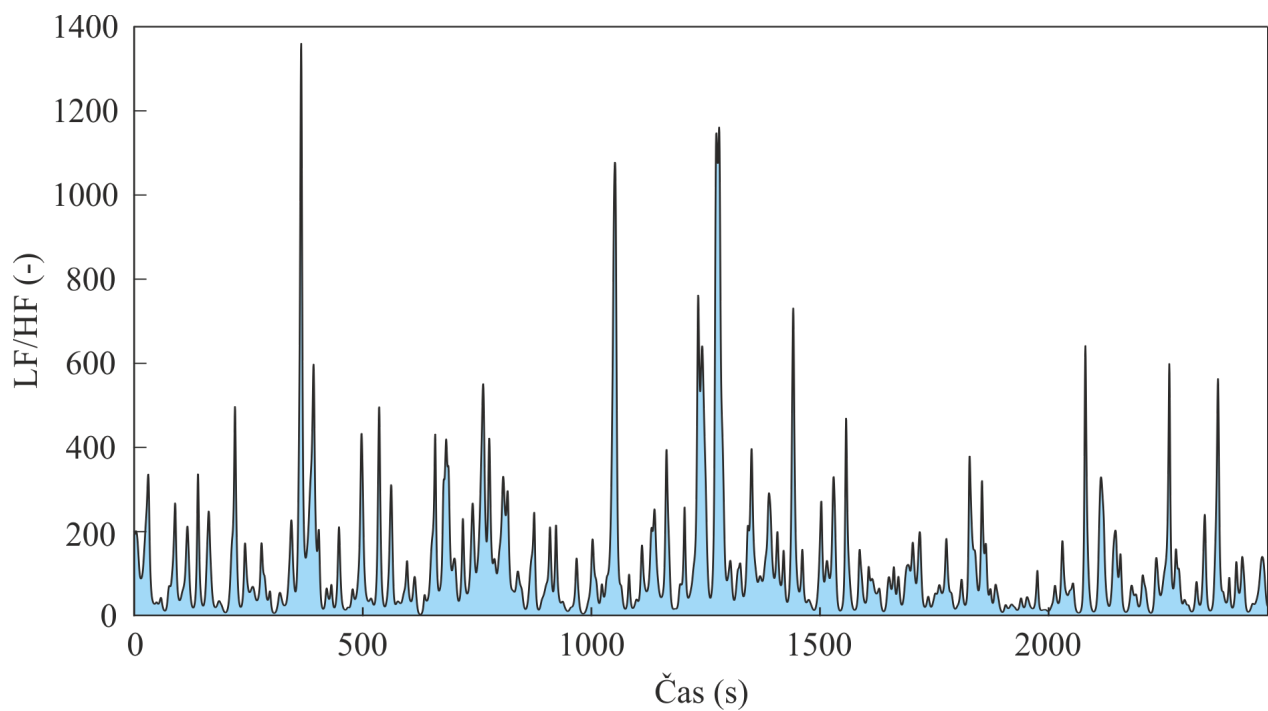
Obrázek 3.1: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 1



Obrázek 3.2: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 2



Obrázek 3.3: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 3



Obrázek 3.4: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.1 pro subjekt 4



## 3.2 Základní popis výsledků pro cvičení č.2

Pro druhé cvičení je charakteristické větší množství vlastního provozu, který proudí ze základen do výcvikových prostorů LKTSA a zpět, a je doplněn neznámým cizím provozem, který má za úkol prověřovat pozornost řídicího po celou dobu cvičení. Nicméně i pro toto cvičení jsou charakteristické dva zátěžové vrcholy, na kterých má největší podíl střídání vlastního provozu v prostoru LKTSA 3 s využitím úzkých koridorů LKTSA 20, 21 a 24. Náročnost tohoto cvičení je silně ovlivněna teoretickou přípravou řídicího. Například pokud má dopředu řádně načtenou leteckou mapu využívaných prostorů a jejich těsného okolí, pak je i vydávání povolení o klesání do určité výšky o něco jednodušší, protože řídicí neztrácí čas s vyhledáváním výškového profilu po trati letu a určení minimální bezpečné výšky nad terénem.

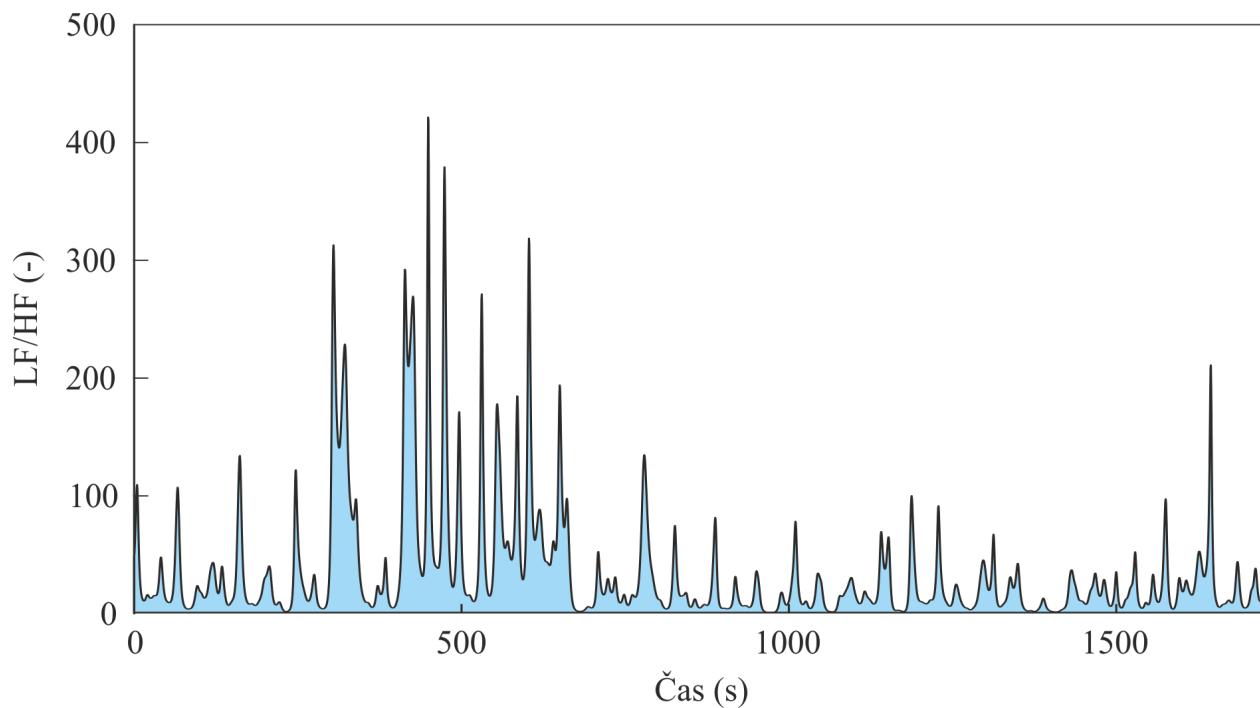
Na Obrázku 3.5 je opět viditelná nervozita řídicího (subjektu 1) v úvodu cvičení, která je pravděpodobně spojena se střídáním vlastního provozu v pracovních prostorech LKTSA. Cvičení s tímto námětem není do výcvikové osnovy zařazeno v takové míře, a tudíž se dá předpokládat, že s ním řídicí bude mít větší práci i přesto, že už jej absolvuje s odstupem času poněkolkáté. Od poloviny cvičení již není patrné žádné enormní vypětí.

Obrázek 3.6, pro subjekt 2, zdánlivě na první pohled neukazuje na enormní zátěž, ale je třeba si všimnout měřítka na ose Y, kde jeden z vrcholů poměru LF/HF dosahuje skokově hodnoty téměř 1400 a tím se graf opticky velice zmírní. Pro posouzení zátěže se bere v úvahu obsah plochy pod křivkou a nikoli její maximální hodnoty, které mohou vzniknout chybou v měření. Na základě toho se dá říci, že se řídicí při tomto cvičení nacházel pod standartní zátěží, která ve druhé polovině cvičení mírně narostla. Mohlo se tak stát díky vyšší míře zátěže, která na řídicího působila z důvodu ne zcela přesného vyřešení dané situace v průběhu cvičení.

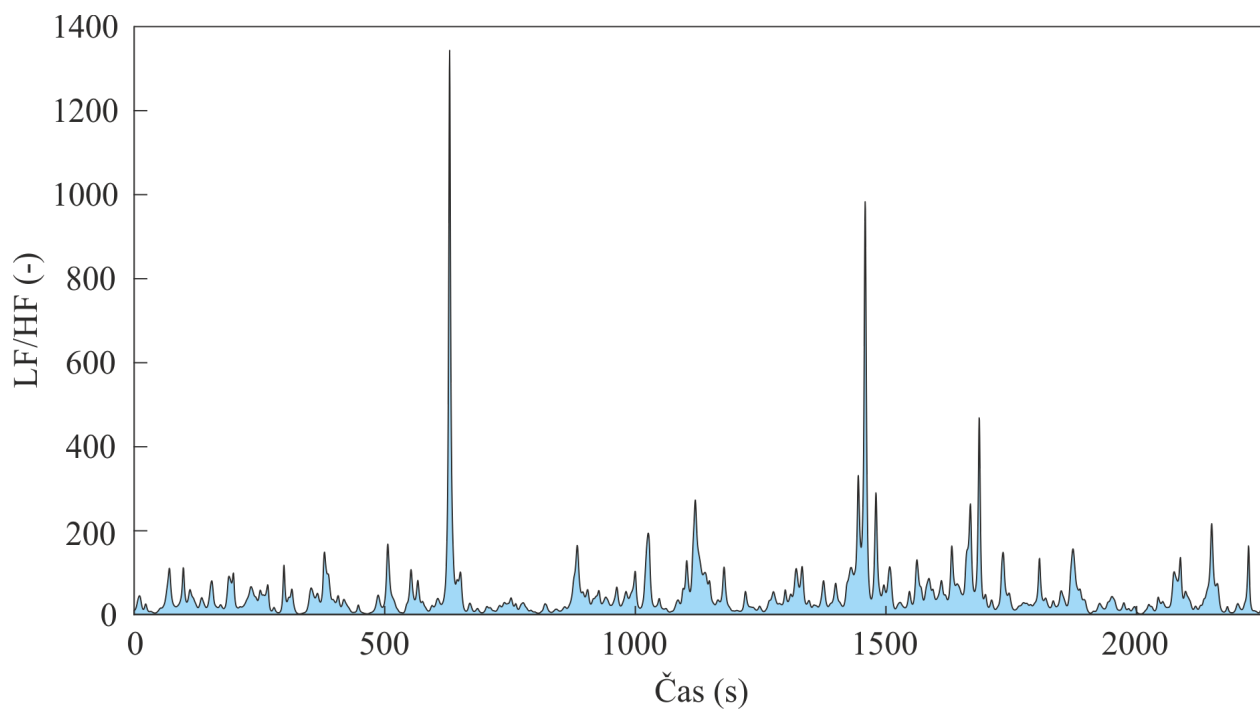
Na Obrázku 3.7 se opět odráží náročnější vstup do cvičení pro subjekt 3 s pozvolným uklidněním, kdy se až v samotném závěru měření objevují vyšší hodnoty LF/HF poměru. Tento nárůst zobrazuje řešení konfliktu mezi letouny, které se střídají v prostu LKTSA 3 a

vyžádají si jinou než naplánovanou přeletovou hladinu z důvodu špatných meteorologických podmínek.

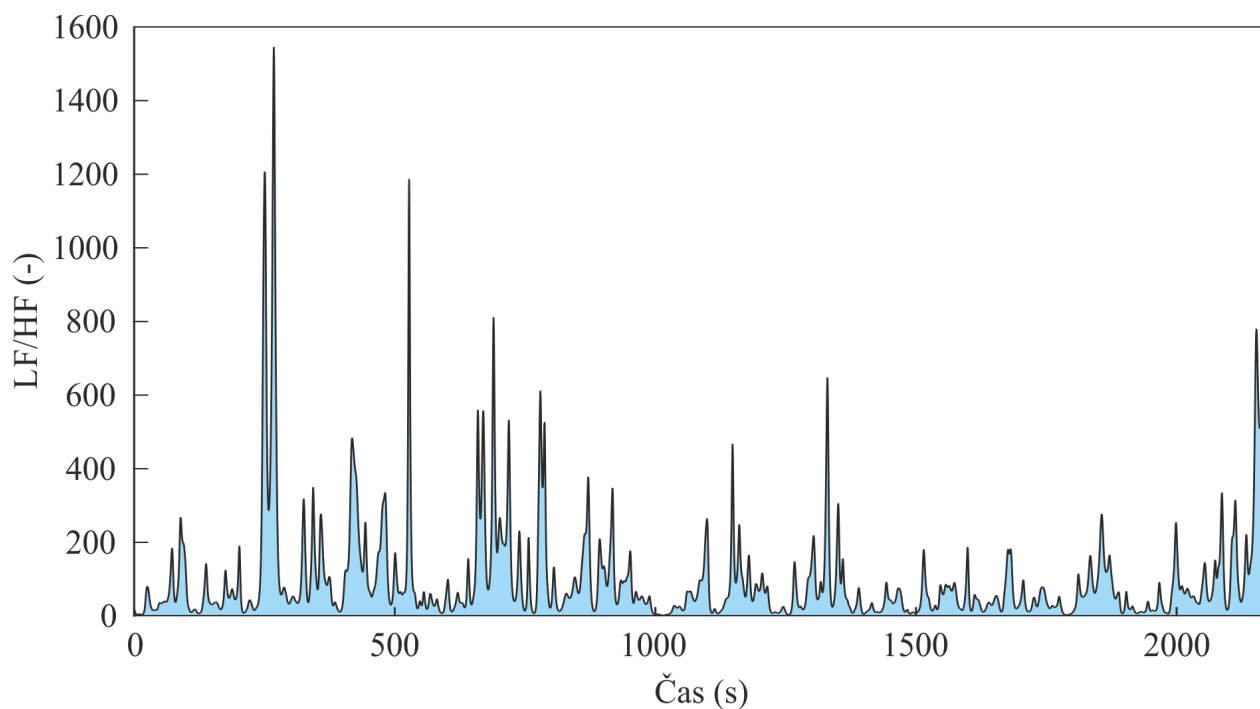
Obrázek 3.8 téměř přesně odráží navrženou zátěžovou křivku charakterizující toto cvičení. V závěru první poloviny cvičení u subjektu 4 poměr nabývá nejvyšších hodnot, následně dochází ke krátkému útlumu následovanému opětovným navýšením hodnot. V takovém případě se dá říci, že řídicí byl na cvičení dobře připravený, konflikty řešil včas a správně a nepřidělal si zbytečnou práci do dalších minut simulace, která by se mohla posčítat s řešením aktuální situace.



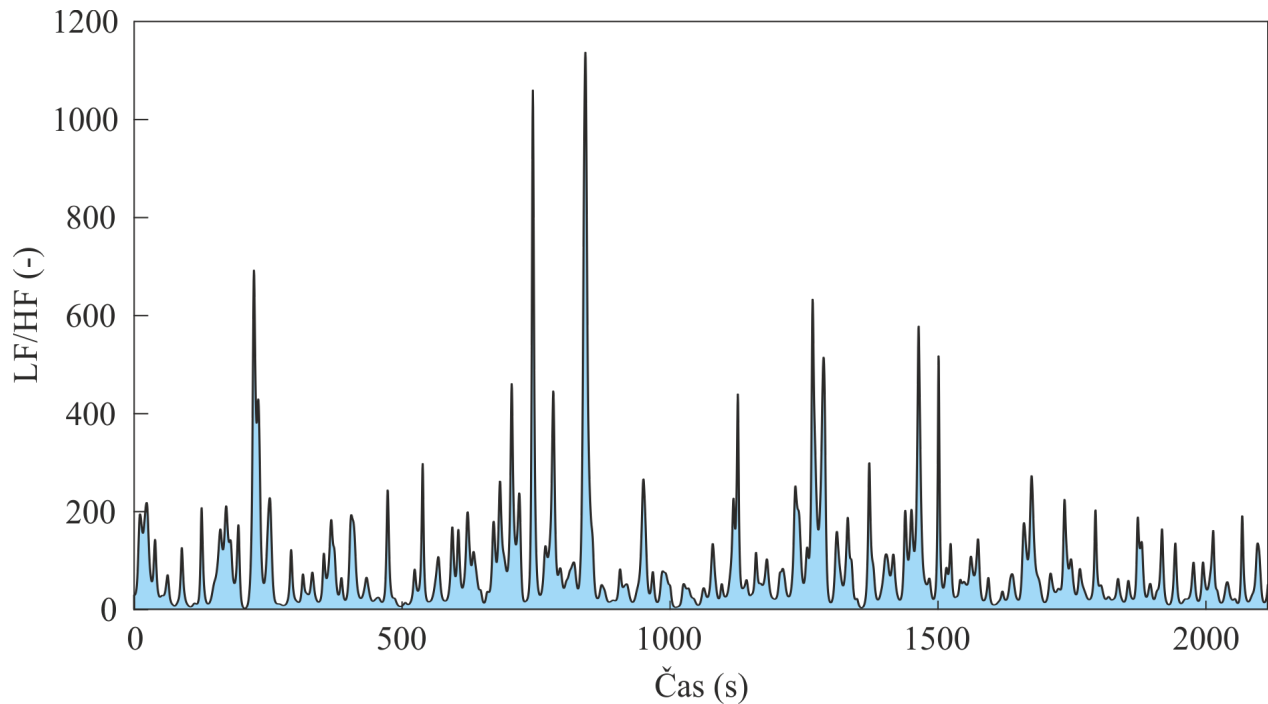
Obrázek 3.5: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 1



Obrázek 3.6: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 2



Obrázek 3.7: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 3



Obrázek 3.8: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.2 pro subjekt 4

### 3.3 Základní popis výsledků pro cvičení č.3

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.3.3, hlavním a zcela novým námětem cvičení je osvojení si postupů pro nestandardní situaci. Míra výcviku řídicího by měla být na takové úrovni, že jemu svěřený provoz zvládne bez jakýchkoli problémů. Konkrétně v tomto cvičení se zhruba v polovině (v závislosti na pokynu instruktora a vývoji cvičení) objevuje ztráta spojení, na kterou musí řídicí reagovat. A krátce před koncem cvičení jiný letoun hlásí poruchu navigačních přístrojů, což pro řídicího teoreticky není tak kapacitně náročné jako ztráta spojení. Vliv těchto jevů na pracovní zátěž je k vidění níže.

Obrázek 3.9 ukazuje již standardní nervózní vstup do cvičení subjektu 1. Následuje krátký útlum a těsně před polovinou cvičení je znát vysoký nárůst hodnot LF/HF poměru, který je spojen se ztrátou spojení s jedním ze dvojice letounů. Po vyřešení situace opět dochází k uklidnění. V závěru cvičení řídicí reaguje na druhou nestandardní situaci, jejíž průběh je taktéž patrný z níže uvedeného grafu.

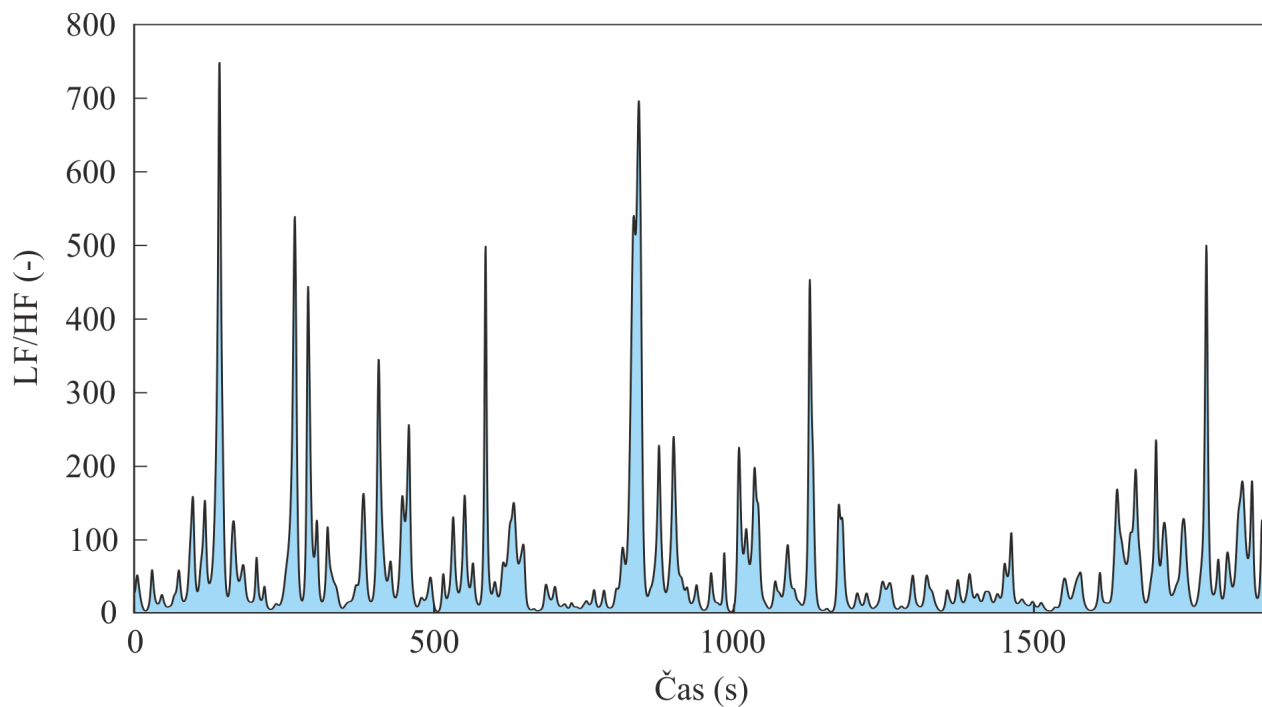


Obrázek 3.10 vykazuje poměrně vyvážené výsledky měření, které díky zachyceným vrcholům LF/HF poměru u subjektu 2 zhruba kopírují navrženou zátěžovou křivku. Nicméně i zde je čitelný, byť velice mírný, nárůst stresu v polovině cvičení. Po krátkém útlumu je pro závěrečnou třetinu cvičení charakteristický nárůst hodnot poměru. V této části řídicí vektoroval letoun se spojením k letounu bez spojení a je třeba s předstihem namyslet takovou trať, aby v závěrečné fázi přiblížení bylo zapotřebí co nejmenší množství opravných kurzů a vektorovaný letoun se co nejplynuleji připojil do skupiny s letounem bez spojení. A právě to může být příčinou takto naměřených hodnot.

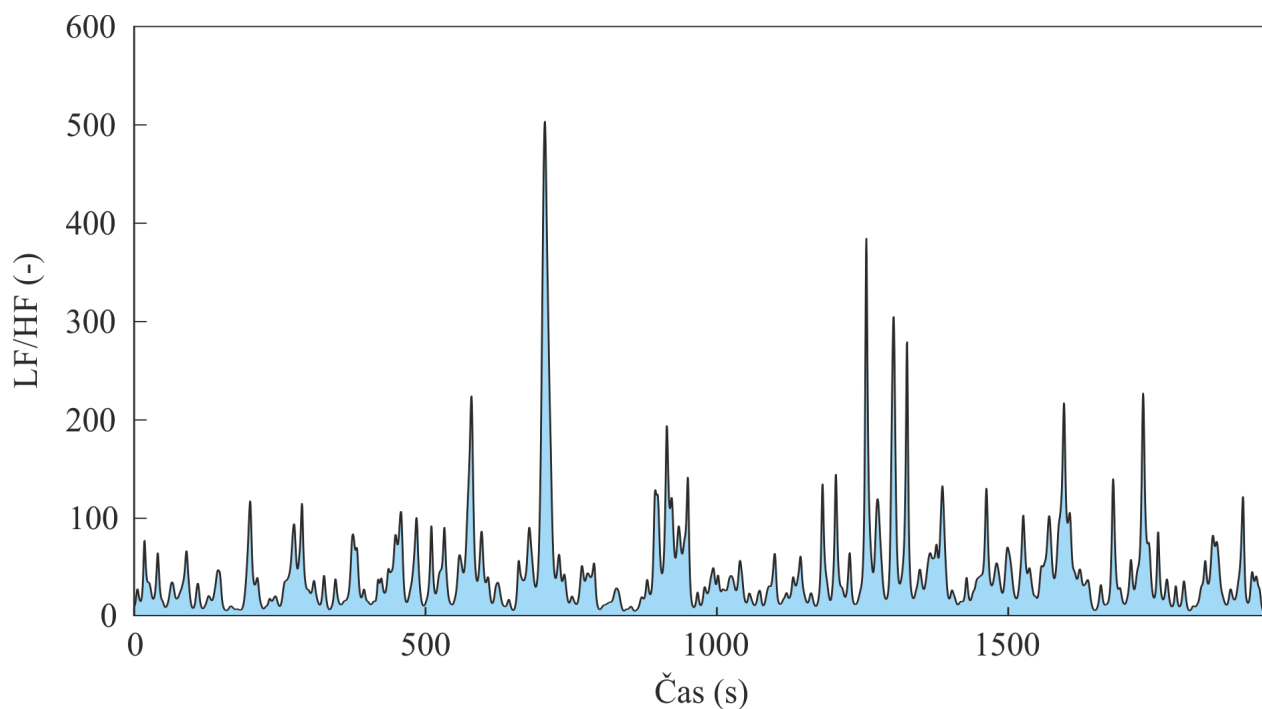
Obrázek 3.11 takřka přesně kopíruje navrženou zátěžovou křivku tohoto cvičení u subjektu 3. Dle toho lze říci, že náročnost cvičení přesně odpovídá vycvičenosti řídicího, a že nově vzniklá nestandardní situace nemá zásadní vliv na jeho pracovní kapacitu.

Obrázek 3.12, pro subjekt 4, opět ukazuje na polovinu cvičení svým nárůstem LF/HF poměru, kde vznikla nestandardní situace. Ta je dle následujících hodnot řešena v klidu, přičemž v závěru cvičení je k vidění opětovný nárůst spojený s druhou nestandardní situací. Dá se říci, že právě takovýto průběh naměřených hodnot je pro toto konkrétní cvičení očekávaný a naprosto přesný.

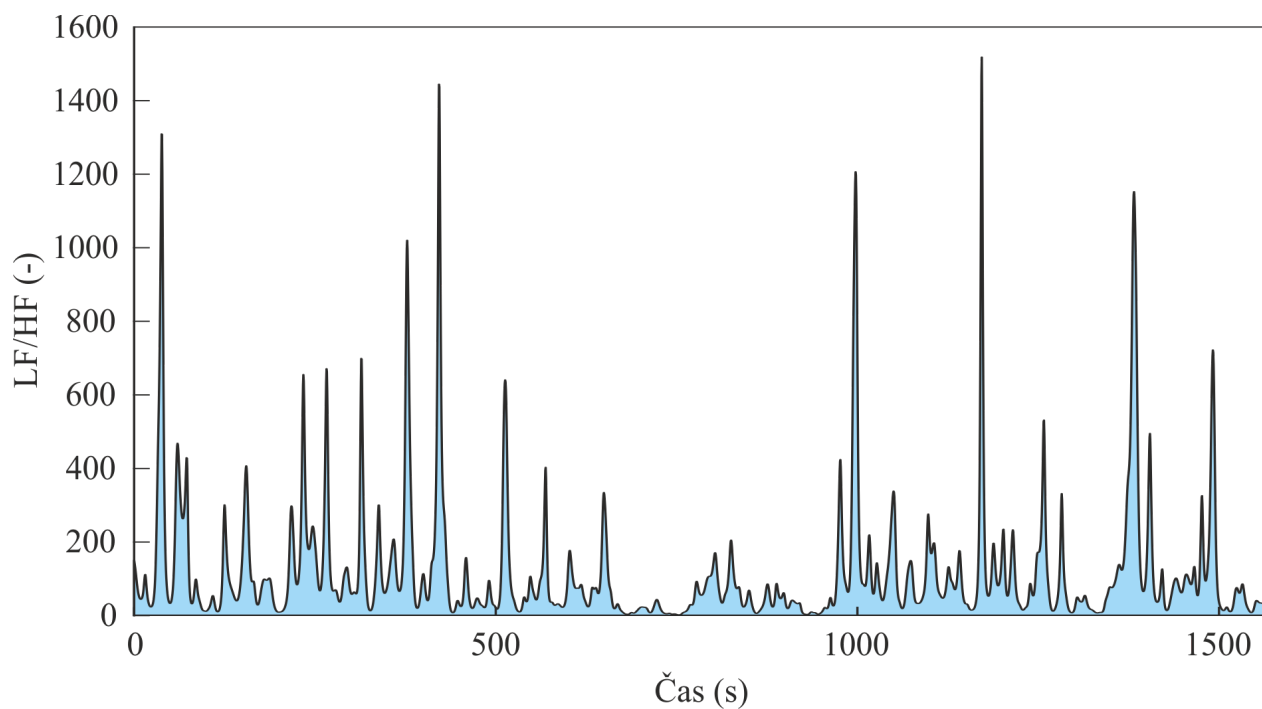




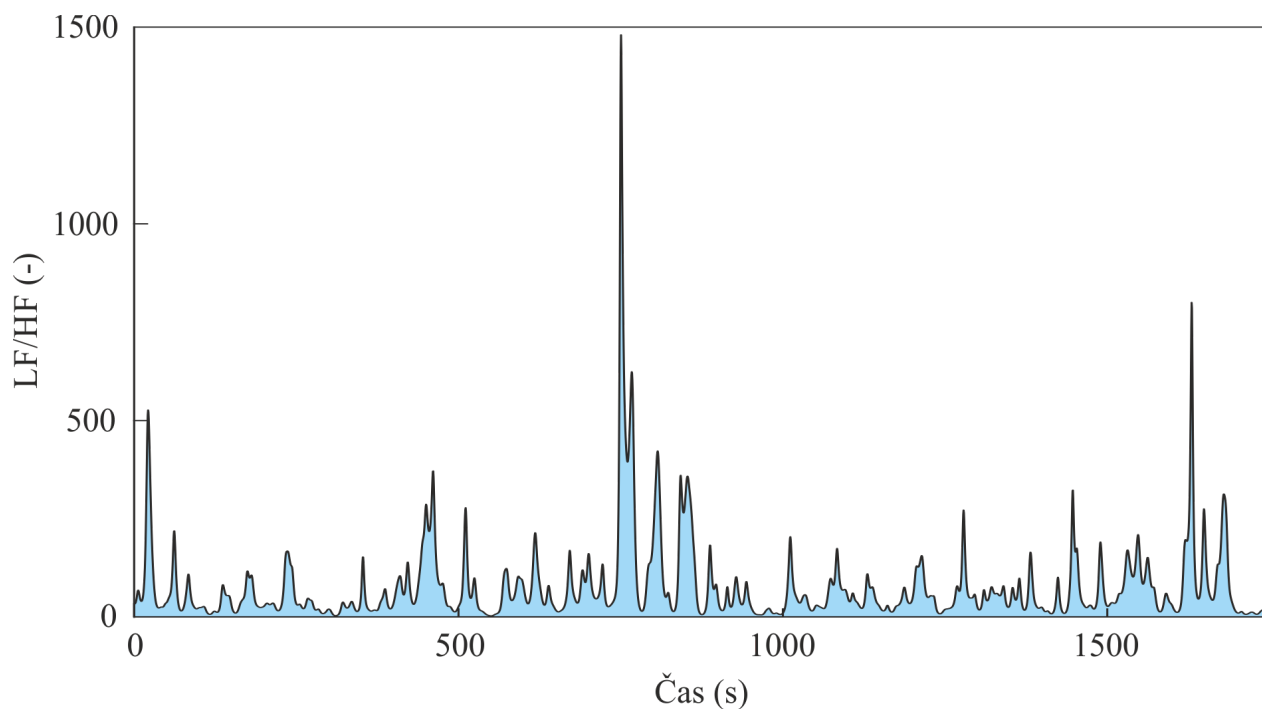
Obrázek 3.9: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 1



Obrázek 3.10: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 2



Obrázek 3.11: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 3



Obrázek 3.12: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.3 pro subjekt 4



### 3.4 Základní popis výsledků pro cvičení č.4

Toto cvičení patří k těm nejnáročnějším v celé výcvikové osnově. Má za úkol prověřit připravenost řídicího před blížícími se závěrečnými zkouškami. Po dobu trvání nemá řídicí prakticky čas na mentální odpočinek. Musí se vypořádat s řešením nestandardní situace, musí vytvářet koridory pro průlet okolního známého provozu a zabezpečovat rozstupy od okolního neznámého provozu. Je těžké určit, která část cvičení je nejnáročnější, protože do hry vstupuje i práce pseudopilotů, kteří, vzhledem k enormní četnosti radiotelefonní korespondence vyplývající z množství omezení a informací o provozu, svými přeslechy a přeréky citelně ztěžují průběh cvičení.

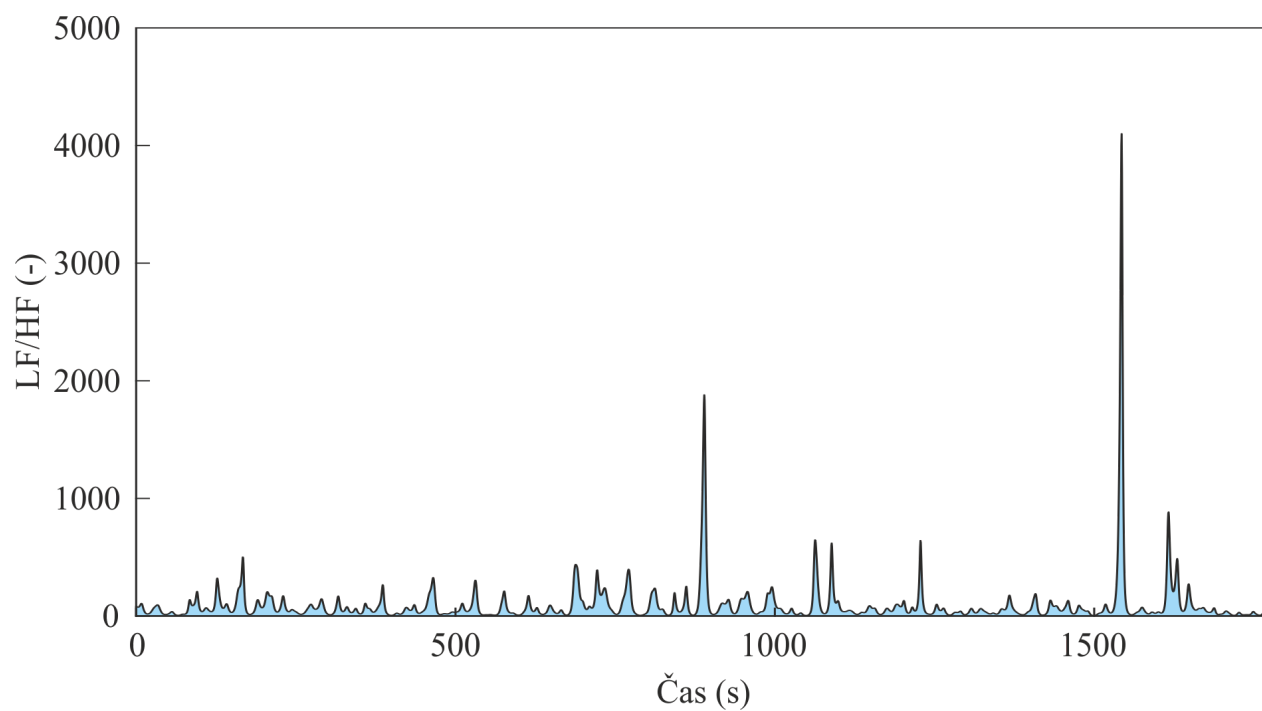
Na Obrázek 3.13, u subjektu 1 se opět nachází příliš vysoká a zavádějící hodnota LF/HF poměru, která čitelnost výsledků ztíží. Nicméně lze podle plochy pod křivkou vyčíst, že druhá třetina plnila kapacitu řídicího nejvíce. V tu dobu řídicí zabezpečuje volný koridor pro průlet hotovostních letounů v jednom prostoru, a zároveň vytváří druhý koridor pro Airliner. Před koncem cvičení dochází ke ztrátě spojení, která s sebou ale nepřináší žádné dramatické změny v LF/HF poměru.

Obrázek 3.14 napovídá, že řídicí (subjekt 2) byl pod kontinuální psychickou zátěží, která v průběhu cvičení kolísala, což je vzhledem k výše popsanému pochopitelné a zcela přirozené a je těžké určit, co konkrétně ono kolísání zapříčinilo.

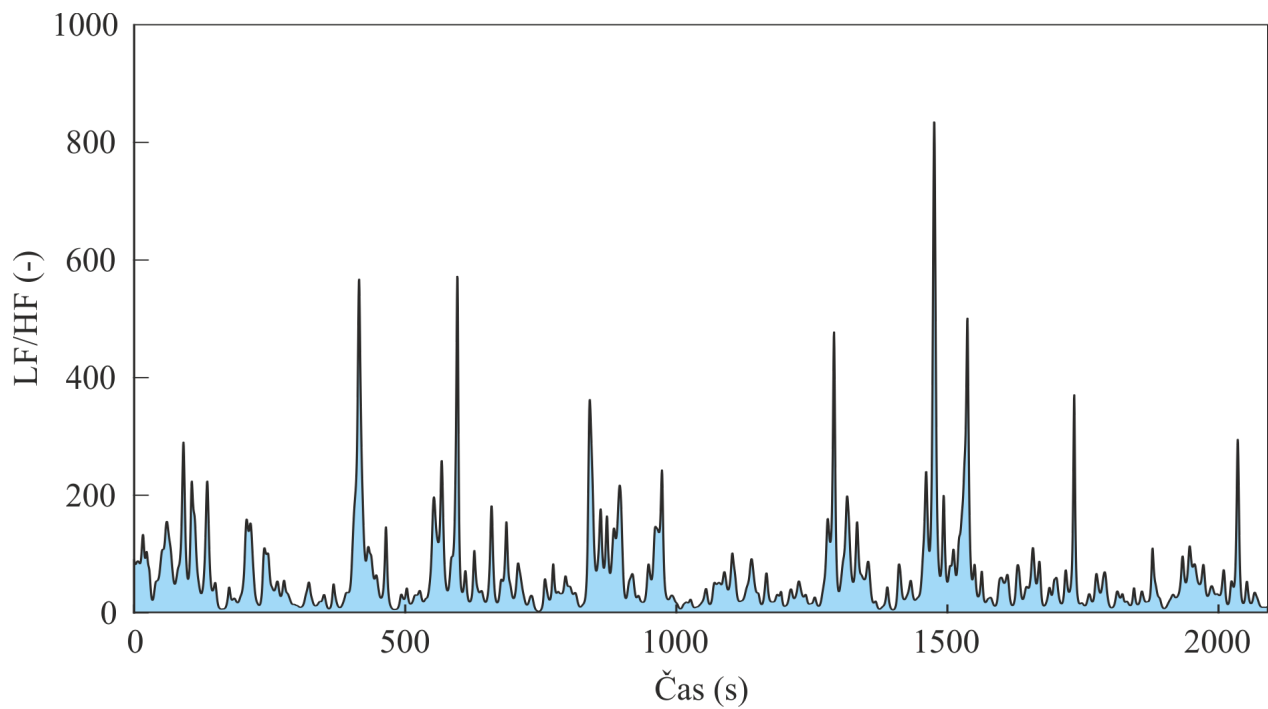
Obrázek 3.15, pro subjekt 3 zobrazuje vyšší naměřené hodnoty v první třetině cvičení. V tu dobu řídicí postupně přebíral provoz na spojení, dával informace o prostorech a okolním provozu a reagoval na přeslechy pilotů. Za zmínku stojí i třetí třetina cvičení, kdy řídicí řeší ztrátu spojení a vytváří koridor pro vracující se hotovostní letouny. V této době opět došlo ke kontinuálnímu nárůstu poměru.

Obrázek 3.16 ukazuje na to, že v první polovině, a zejména na konci první poloviny, cvičení byl řídicí (subjekt 4) pod vyšším tlakem. Příčina je stejná jako je popsána v předcházejícím odstavci. V úvodu druhé poloviny cvičení je viditelný pokles poměru, který je v době, kdy jsou již všechny koridory pro okolní provoz zajištěny. V poslední třetině poměr opět stoupá

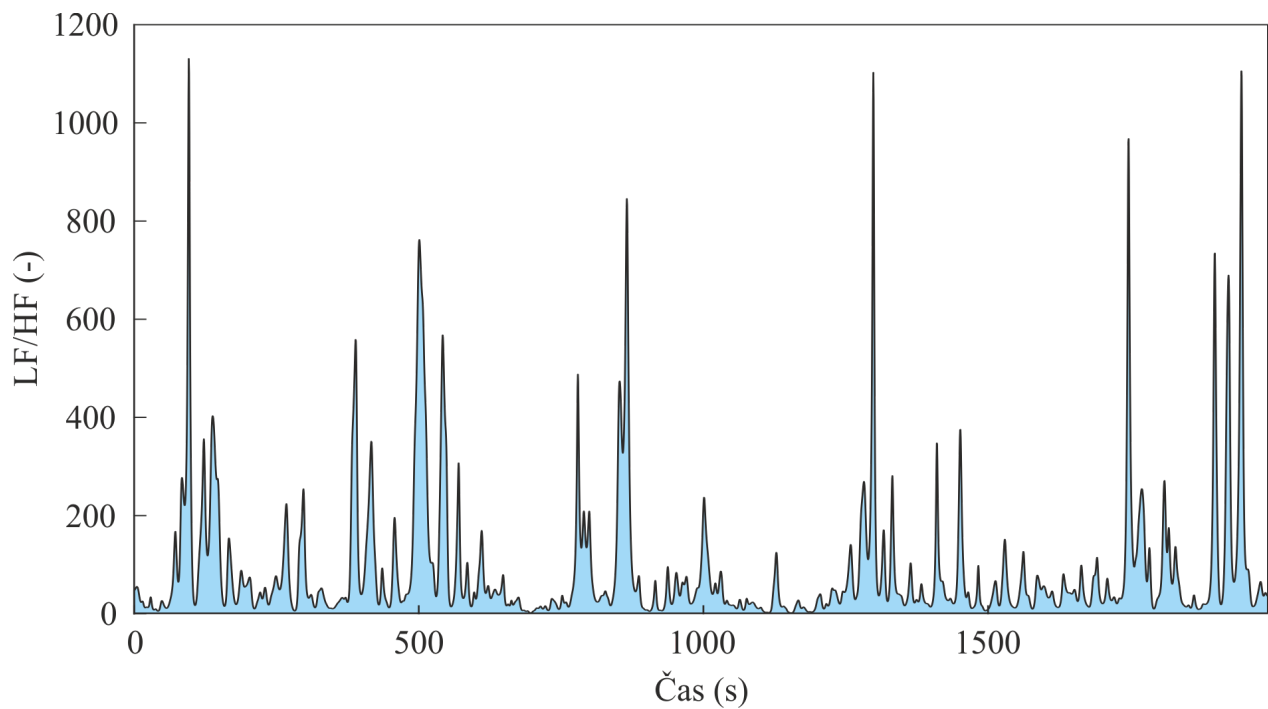
a stává se tak v době, kdy řídící opět omezuje svůj provoz kvůli návratu hotovosti zpět na základnu.



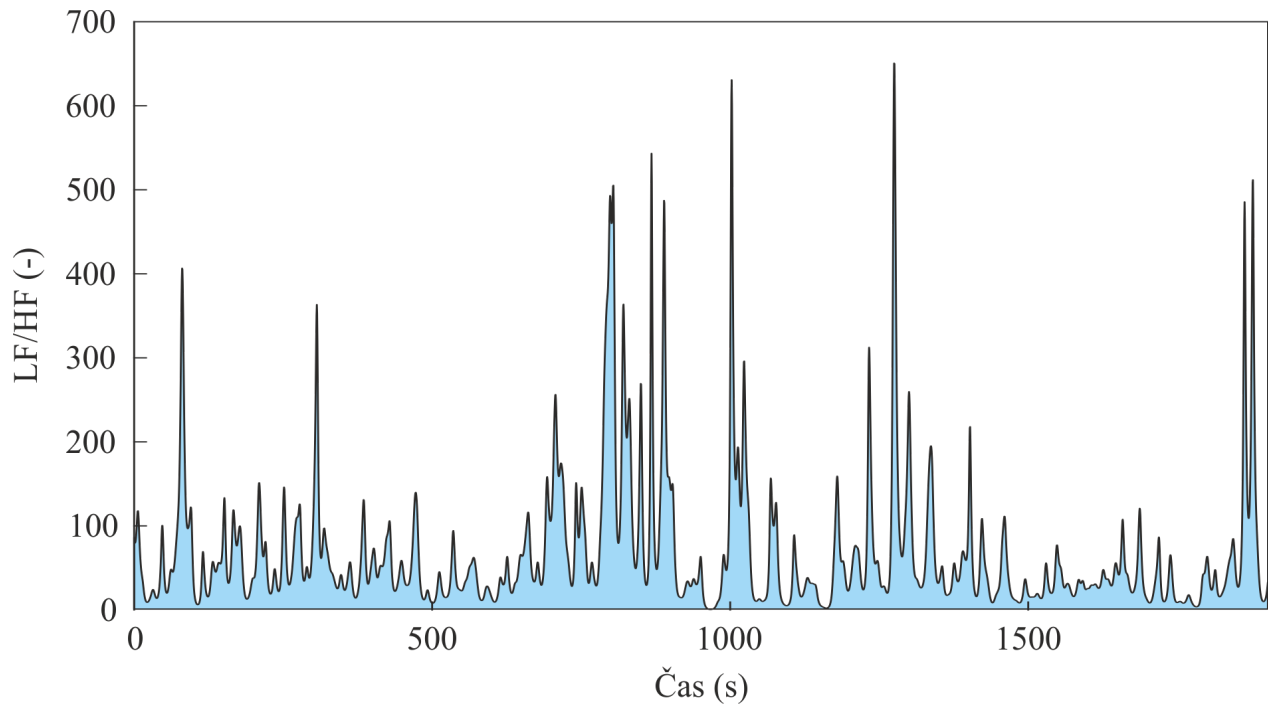
Obrázek 3.13: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 1



Obrázek 3.14: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 2



Obrázek 3.15: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 3



Obrázek 3.16: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.4 pro subjekt 4

### 3.5 Základní popis výsledků pro cvičení č.5

Poslední cvičení z výcvikové osnovy není tak náročné jako výše popsané, kde měl řídicí veliký prostor odpovědnosti se spoustou verbální koordinace zapříčiněné okolním provozem. Toto cvičení je jakési shrnutí všech dříve získaných a zažitých postupů. Z psychologického hlediska by mělo řídicího namotivovat před vykonáním závěrečné zkoušky. To ale neznamená, že je ochuzeno nestandardní situace, četné nepochopení ze strany pseudopilota nebo koordinaci s ostatními stanovišti ŘLP. Zátěžová křivka toho cvičení je nejvyrovnanější ze všech a dle jejího průběhu lze usoudit, že i naměřený LF/HF poměr bude dosahovat hodnot s minimálními výkyvy.

Dle předpokladu je Obrázek 3.13, pro subjekt 1, téměř vyrovnaný po celou dobu cvičení. Ovšem i přesto je v grafu patrné mírné navýšení zátěže, zejména v první čtvrtině cvičení. V tu dobu řídicí řeší dekonflikci mezi právě přebrnými letouny na spojení, a zároveň informuje vrtulníky v LKTS 3 o blízkém okolním provozu, který by mohl ohrozit jejich bezpečnost.

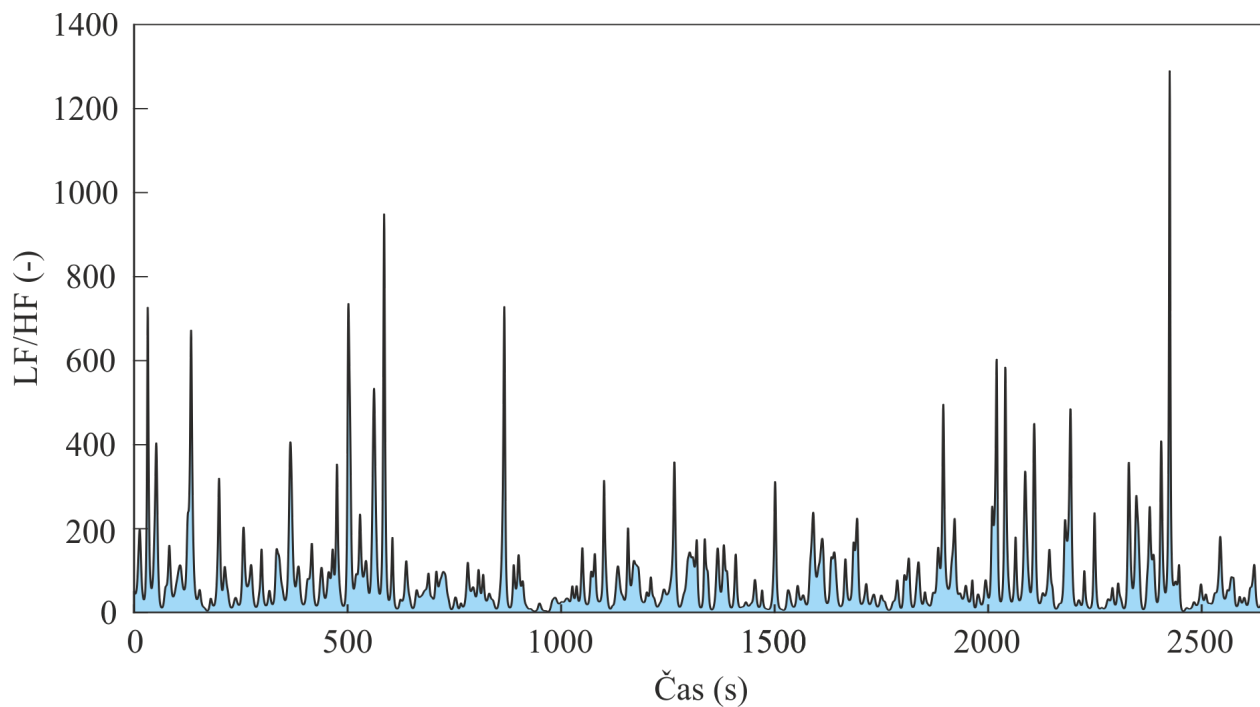


Stejně tak je patrný mírný nárůst v závěrečné čtvrtině cvičení, kdy řídící řeší střet s ptákem a okamžitý návrat na základnu a posléze druhý neplánovaný návrat z důvodu indikace paliva.

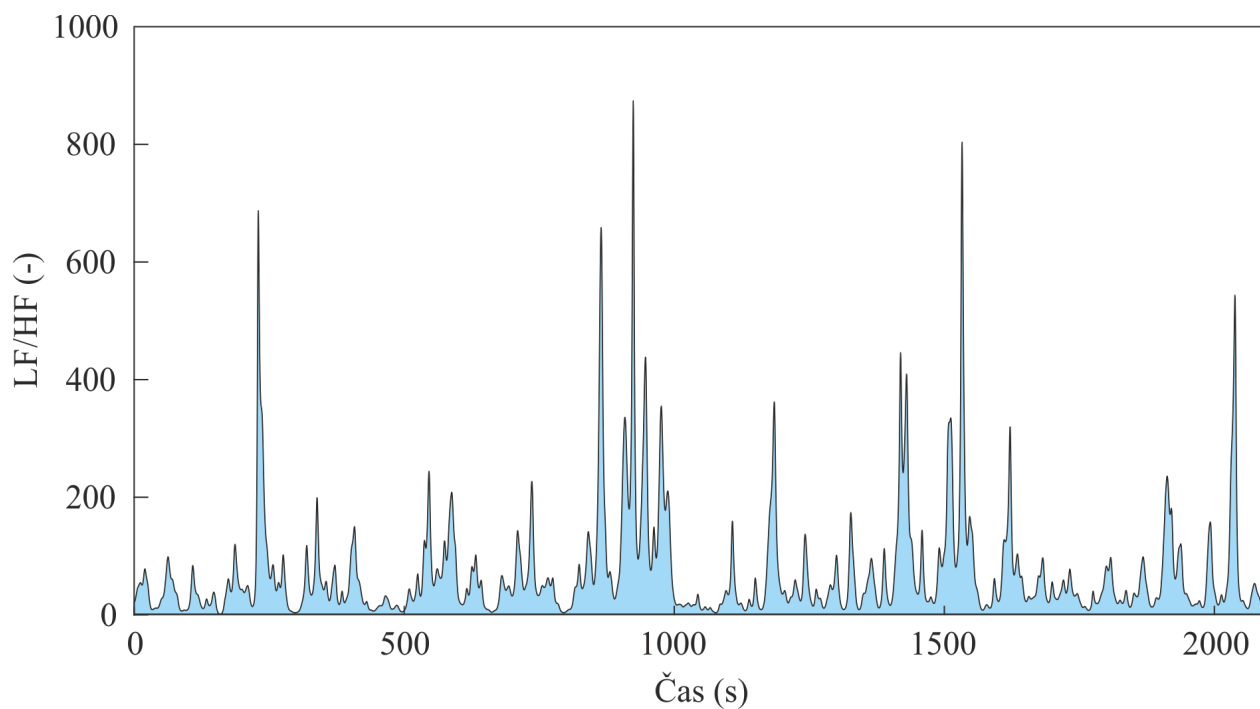
Na Obrázku 3.18 je u subjektu 2 dobře viditelný řešený konflikt hned z úvodu cvičení mezi čtyřmi letouny přecházejícími na spojení. Následně v polovině cvičení je zřetelný nárůst zátěže, který vzniká v momentě, kdy čtveřice letounů vstupuje do prostoru LKTSA 3 a rozlétávají se do pracovních bloků. Třetí zřetelný nárůst poměru vzniká v momentě, kdy na spojení přechází letoun ze základny a následně je jiným letounem ohlášen střet s ptákem. Poslední mírně zvýšený LF/HF poměr se objevuje v době, kdy pilot hlásí nedostatek paliva.

Úvodní polovina křivky na Obrázku 3.19, u subjektu 3, nevykazuje téměř žádné významné zvýšení poměru a drží si svojí konstantní hodnotu. V druhé polovině se ale průběh grafu mění a odráží vzniklé nestandardní situace, na které řídící reaguje.

První vrchol křivky na Obrázku 3.19 u subjektu 4 reprezentuje čas, kdy letoun opouští LKTSA 3 a směřuje proti čtveřici přilétávajících letounů. Tyto letouny jsou již z úvodu cvičení rozděleny hladinově ve dvou dvojicích a je třeba zabezpečit minutí s protichůdným provozem. Následují dva skokové nárůsty LF/HF poměru, které mohou být důsledkem přeslechů či neposlušností pseudopilota. V závěru cvičení je opět patrný nárůst v důvodu řešení již zmíněných nestandardních situací.

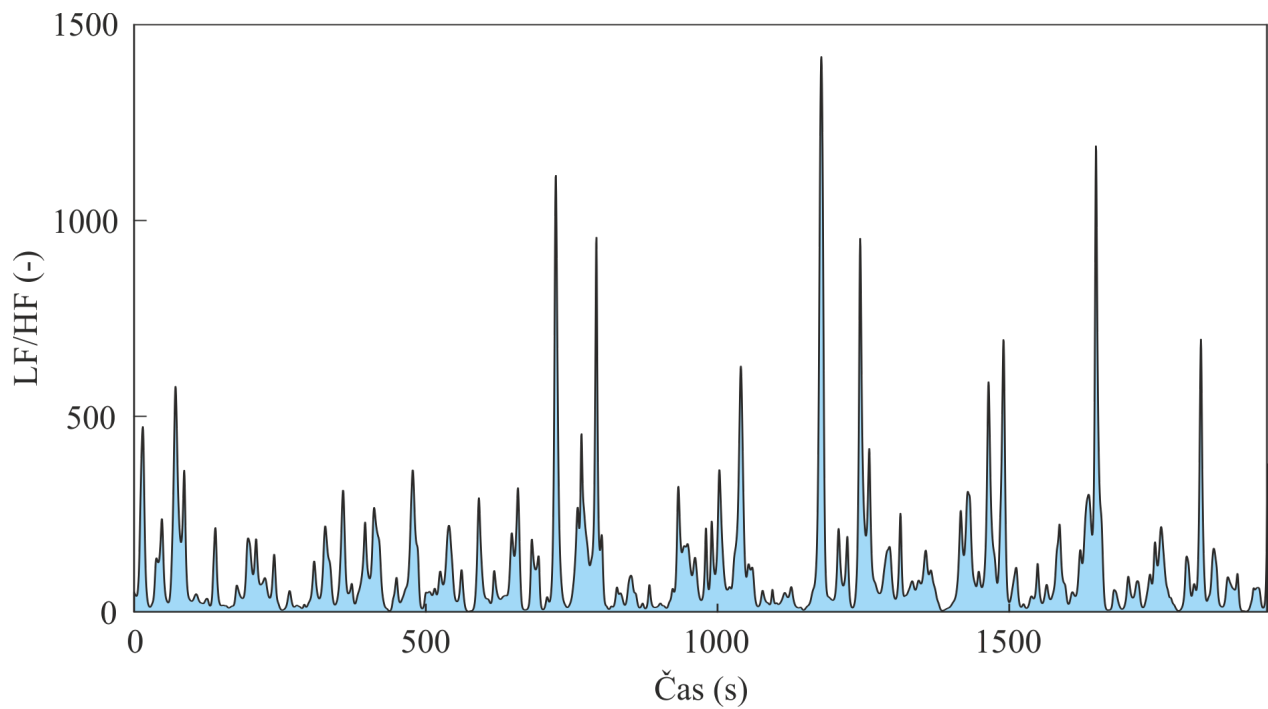


Obrázek 3.17: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 1

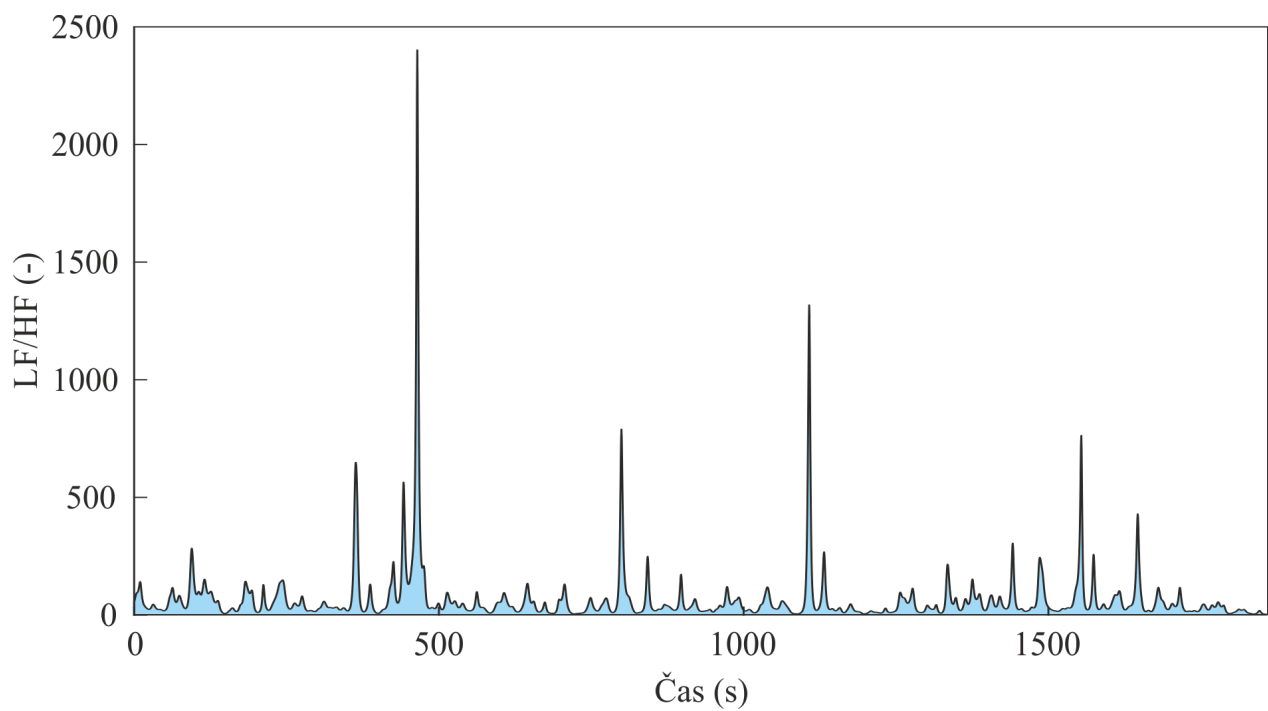


Obrázek 3.18: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 2





Obrázek 3.19: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 3



Obrázek 3.20: Průběh LF/HF poměru ve cvičení č.5 pro subjekt 4



### 3.6 Výsledky závislosti zátěže a poměru LF/HF

Výsledky analýzy závislosti jsou prezentována v Tabulce 3.1. Z výsledků je vidět, že všechny korelace sice jsou signifikantně významné, avšak né dost silné. Je však možné tvrdit, že závislost mezi těmito skoumanými parametry existuje. Nízká síla korelačních koeficientů může být způsobena nedokonalým filtrováním dat, nebo fázovým rozdílem v datech.

Tabulka 3.1: Korelační koeficienty a příslušné p-hodnoty pro určení závislosti mezi zátěží a průběhem LF/HF parametru.

Subjekt	Cvičení	Rho	p
1	1	0,35	<0,05
2	1	0,27	<0,05
3	1	0,31	<0,05
4	1	0,23	<0,05
1	2	0,39	<0,05
2	2	0,37	<0,05
3	2	0,31	<0,05
4	2	0,33	<0,05
1	3	0,35	<0,05
2	3	0,27	<0,05
3	3	0,31	<0,05
4	3	0,23	<0,05
1	4	0,32	<0,05
2	4	0,27	<0,05
3	4	0,31	<0,05
4	4	0,23	<0,05
1	5	0,45	<0,05
2	5	0,27	<0,05
3	5	0,31	<0,05
4	5	0,23	<0,05

Na základě těchto výsledků je možné tvrdit, že předchozí empirická evaluace vycházející z intuitivnosti prezentovaných grafů je správná. I když se tato práce hlouběji nezabývala



hledáním optimálních nastavení filtrace pro účely verifikace závislosti, ukazuje možnosti posunu této problematiky na další úroveň a tím otevírá možnosti dalšího výzkumu v této oblasti.



## 4 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zhodnotit, zda specifický typ řízení letového provozu na stanovišti GCI ovlivní psychofyzilogické procesy v těle. Pro tyto účely bylo vybráno hodnocení zátěže na základě změn v tepové frekvenci. Aby bylo pokryto co nejširší spektrum úkolů, které musí ŘLP během své práce provádět, využila se výcviková osnova, ze které se vybraly náročnější modelová cvičení. Dle závěrů plynoucích z analýzy naměřených dat je patrné, že se určitá změna v těle řídicího odehrává. Nelze ale jednoznačně říci, že řešení nestandardní situace představuje výrazně vyšší zátěž, než například přebírací procedura letadel na spojení. Každá činnost má svá určitá specifika a každý řídicí na ně reaguje odlišně.

Je třeba si uvědomit, že řízení letového provozu je silně ovlivněno celkovým psychickým rozpoložením každého řídicího v danou chvíli a na jeho stavu se podílí několik faktorů. Tím nejdůležitějším je bezesporu únava. Ta silně ovlivňuje reakční dobu, rozhodovací proces a celkový přehled o situaci. Sběr dat pro účely této práce se odehrával během běžného pracovního provozu na stanovišti, a tudíž nebylo možné všem subjektům zajistit stejné podmínky pro měření, což mohlo vést ke zkreslení naměřených hodnot.

Sběr dat během simulovaných cvičení má vedle spousty pozitivních vlastností, které byly v průběhu práce již jmenovány, i svá negativa. Tím největším je fakt, že řídicí může už v úvodu cvičení vydat takový pokyn letadlu na spojení, že dojde k částečné změně jinak předpokládaného průběhu cvičení. Z toho plyne odklonění od předprogramované časové osy a připravená zátěžová maxima se mohou v daném čase zmírnit. Jako příklad lze uvést pokyn k zahájení zatačky o 360° kvůli separaci od okolního provozu. Tím se řízený letoun na trati zpozdí o dvě až tři minuty a to může ovlivnit průběh cvičení až do posledních minut. I z toho důvodu nemusí zátěžová křivka simulovaných cvičení přesně korespondovat s naměřenými hodnotami tepové frekvence v daný okamžik.

Výcviková osnova pro nově příchozí členy GCI obsahuje několik desítek různých cvičení s různým stupněm obtížnosti. Pro tuto práci bylo vybráno pět cvičení ze závěru výcvikové osnovy, přičemž čtvrté v pořadí je nejnáročnější vůbec. Díky závěrům z tohoto měření si může skupina výcviku stanoviště Letových provozních služeb CRC – Hlavenec udělat představu



o tom, jak takto připravená cvičení prověří řídicího i po psychické stránce. Dosud byla náročnost cvičení hodnocena pouze subjektivními dojmy řídicího, popřípadě statistikou, která byla založena na úspěšném či neúspěšném splnění daného cvičení. Takové hodnocení je ale mimo jiné ovlivněno i teoretickou znalostí řídicího před započítáním výcviku. Na sběru dat se podíleli relativně krátce licencovaní řídicí, kteří všechna svá cvičení dle hodnocení instruktora splnili, nicméně i tak byla psychická zátěž měřitelná, což je s ohledem na budoucí výcvik nově příchozích členů pozitivní zjištění.

Pokud by se podobný výzkum měl aplikovat i v budoucnu, popřípadě na jiném stanovišti, bylo by bezesporu výhodné vyčlenit pro samotné měření alespoň dvojnásobný počet cvičení i subjektů a připravit pro ně co nejshodnější pracovní podmínky.



## References

- [1] J. B. Brookings, G. F. Wilson, and C. R. Swain. Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biol Psychol*, 42(3):361–377, Feb 1996.
- [2] C. Collet, P. Averty, and A. Dittmar. Autonomic nervous system and subjective ratings of strain in air-traffic control. *Applied Ergonomics*, 40(1):23–32, January 2009.
- [3] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*, volume 52, pages 139–183. Elsevier, 1988.
- [4] GIOVANNI COSTA. Evaluation of workload in air traffic controllers. *Ergonomics*, 36(9):1111–1120, September 1993.
- [5] Gary B. Reid and Thomas E. Nygren. The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In *Advances in Psychology*, pages 185–218. Elsevier, 1988.
- [6] Cornelis J.E. Wientjes. Respiration in psychophysiology: methods and applications. *Biological Psychology*, 34(2-3):179–203, November 1992.
- [7] ANDREW J. TATTERSALL and PENELOPE S. FOORD. An experimental evaluation of instantaneous self-assessment as a measure of workload. *Ergonomics*, 39(5):740–748, May 1996.
- [8] M. Bauer. Využití simulačního prostředí v oblasti řízení letového provozu. Disertační práce, Univerzita obrany, Brno, 2011.
- [9] A. Alaimo, A. Esposito, C. Orlando, and G. Tesoriere. A pilot mental workload case study in a full flight simulator. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 97(1):27–33, January 2018.



- [10] Rossana Castaldo, Luis Montesinos, Tim S. Wan, Andra Serban, Sebastiano Massaro, and Leandro Pecchia. Heart rate variability analysis and performance during a repeated mental workload task. In *EMBECE & NBC 2017*, pages 69–72. Springer Singapore, June 2017.
- [11] Stéphane Delliaux, Alexis Delaforge, Jean-Claude Deharo, and Guillaume Chaumet. Mental workload alters heart rate variability, lowering non-linear dynamics. *Frontiers in Physiology*, 10, May 2019.
- [12] EUROCONTROL. Design of ATC Simulation Exercises and Courses [HUM-SIM] - Classroom Course, 2019.
- [13] Jakub Schlenker, Vladimir Socha, Pavel Smrcka, Karel Hana, Vladimir Begeera, Patrik Kutilek, Zdenek Hon, Jan Kaspar, Lukas Kucera, Jan Muzik, Tomas Vesely, and Martin Viteznik. FlexiGuard: Modular biotelemetry system for military applications. In *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015*. IEEE, May 2015.
- [14] Christos Pavlatos, Alexandros Dimopoulos, G Manis, and G Papakonstantinou. Hardware implementation of pan & tompkins qrs detection algorithm. In *Proceedings of the EMBEC05 Conference*, 2005.
- [15] Jiapu Pan and Willis J Tompkins. A real-time qrs detection algorithm. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 32(3):230–236, 1985.
- [16] Tjalf Ziemssen and Timo Siepmann. The investigation of the cardiovascular and sudomotor autonomic nervous system—a review. *Frontiers in Neurology*, 10, February 2019.
- [17] M. Malik, J. T. Bigger, A. J. Camm, R. E. Kleiger, A. Malliani, A. J. Moss, and P. J. Schwartz. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3):354–381, March 1996.
- [18] Kai Li, Heinz Rüdiger, and Tjalf Ziemssen. Spectral analysis of heart rate variability: Time window matters. *Frontiers in Neurology*, 10, May 2019.



- [19] Boualem Boashash. *Time frequency signal analysis and processing : a comprehensive reference*. Elsevier, Amsterdam Boston, 2003.
- [20] C Saritha, V Sukanya, and Y Narasimha Murthy. Ecg signal analysis using wavelet transforms. *Bulg. J. Phys*, 35(1):68–77, 2008.
- [21] Shinji Miyake. Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures. *International Journal of Psychophysiology*, 40(3):233–238, April 2001.