



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Ondřej Beneš

Vliv meteorologických podmínek na šíření hluku z letecké
dopravy

Diplomová práce

2018



K621..... **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Ondřej Beneš

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Vliv meteorologických podmínek na šíření hluku z letecké dopravy**

Název tématu (anglicky): Influence of Meteorological Conditions to Propagation of Noise from Air Traffic

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Šíření zvuku
- Stanovení kritických meteorologických podmínek pro šíření zvuku
- Měření hluku v okolí letiště
- Spárování měření hluku s meteorologickými podmínkami
- Využití výsledků v praxi



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: MIŠUN, Vojtěch. Vibrace a hluk. Vyd. 2., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
Metodický návod pro měření a hodnocení hluku z leteckého provozu, vydaný Hlavním hygienikem ČR čj. OVZ-32.0-19.02.2007/6306

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Iveta Kameníková**

Datum zadání diplomové práce: **28. 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: **29. května 2018**

- datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Ondřej Beneš
jméno a podpis studenta

V Praze dne28. července 2017

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kteří mě během tvoření diplomové práce podporovali a jakkoliv mi s ní pomáhali.

Samostatně děkuji oddělení životního prostředí na letišti v Praze, obzvláště panu Dominikovi Zimolovi, za poskytnutí naměřených dat a za odborné vysvětlení problematiky měření leteckého hluku. Dále děkuji panu Pavlovi Předotovi, ze zkušební laboratoře firmy MaREXCOM, za zprostředkování technických materiálů ohledně systému měřící hluk, a za vysvětlení principu činnosti systému.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Bc. Vladimírovi Sochovi, Ph.D. z Dopravní fakulty ČVUT, za nesmírnou pomoc při zpracování poskytnutých dat.

A v neposlední řadě děkuji paní Mgr. Ivetě Kameníkové, vedoucí této diplomové práce, za rady a připomínky.

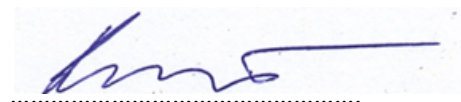
PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní

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

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

V Praze dne 29. května 2018



Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Vliv meteorologických podmínek na šíření hluku z letecké dopravy

diplomová práce

květen 2018

Bc. Ondřej Beneš

ABSTRAKT

Práce se zabývá vztahy mezi meteorologickými podmínkami a šířením hluku letecké dopravy. Nejprve jsou nalezeny fyzikální zákonitosti pro šíření hluku prostorem, ke kterým jsou přiřazeny meteorologické jevy, jež tyto zákonitosti ovlivňují. Následně je provedeno zpracování hlukových a meteorologických dat, se snahou zjistit jejich reálnou závislost. Vlivem velkého množství neznámých proměnných na tento vztah je nalezena pouze důležitost jednotlivých meteorologických vlivů na šíření hluku. Ve spojitosti s úvodními kapitolami práce se však tato důležitost dá převést do praxe a odhadu reálného vlivu meteorologických podmínek na šíření hluku.

ABSTRACT

The thesis deals with the relations between meteorological conditions and the propagation of air traffic noise. First, the physical laws for the propagation of noise through space are found, thenafter conected with different meteorological phenomena that affect these laws. Subsequently, noise and meteorological data processing is carried out with the aim of detecting their real dependence. Due to the large number of unknown variables on this relationship, only the importance of the individual meteorological phenomena on the propagation of noise is found. However, in connection with the introductory chapters of the thesis, this importance can be translated into practice and it is possible to estimate the real impact of meteorological conditions on the noise propagation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hluk, vlastnosti zvuku, šíření zvuku, letecká hluk, měření hluku, meteorologie, ANOMS9, EMU2

KEY WORDS

Noise, noise characteristics, propagation of noise, air noise, noise measurment, meteorology, ANOMS9, EMU2

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČENÍ:

AirCat	kategorie letadla
aircr	aircraft
ANOMS	Airport Noise Monitoring and Management
Č.j.	číslo jednací
durat	doba trvání
EMU	Environment Monitoring Unit
FN	False Negative
height	výška letadla nad terénem
horizon	horizontální vzdálenost
humid	relativní vlhkost vzduchu
ICAO	International Civil Aviation Authority
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
L_{Aeq}	ekvivalentní hladina zvuku
L_{AeqD}	ekvivalentní hladina zvuku v době 6:00 a 22:00
L_{AeqN}	ekvivalentní hladina zvuku v době 22:00 až 6:00
Lamax	maximální hladina akustického tlaku
LAX	hladinová expozice zvuku
LKPR	ICAO označení Letiště Václava Havla Praha

OBSAH

ÚVOD.....	12
1 Zvuk a jeho vlastnosti.....	14
1.1 Odraz, lom a ohyb zvukového paprsku.....	15
1.2 Rychlost šíření zvuku.....	18
1.3 Útlum zvuku v prostoru.....	21
2 Kritické meteorologické podmínky pro šíření zvuku.....	25
2.1 Teplota a tlak.....	25
2.1.1 Teplota.....	25
2.1.2 Chod teploty vzduchu.....	27
2.1.3 Teplotní inverze.....	27
2.1.4 Tlak.....	29
2.2 Směr a síla větru.....	30
2.2.1 Vznik větru.....	30
2.2.2 Denní chod větru.....	31
2.2.3 Vliv frontálních systémů.....	32
2.3 Vzdušná vlhkost.....	32
2.4 Termodynamika vlhkého vzduchu.....	33
2.4.1 Výpar a desublimace.....	34
2.5 Meteorologické stavy vedoucí ke změně vzdušné vlhkosti.....	34
2.5.1 Růst vzdušné vlhkosti.....	34
2.5.2 Pokles vzdušné vlhkosti.....	36
3 Měření hluku.....	37
3.1 Ekvivalentní hladina zvuku L_{Aeq}	38
3.2 Charakteristický letový den.....	39
3.3 Směrodatný letecký provoz.....	40
3.4 Hladinová expozice zvuku LAX.....	40

3.5	Maximální hladina akustického tlaku LAmax	41
3.6	Distribuční procentní hladiny akustického tlaku	41
3.7	Všeobecné požadavky pro měření leteckého hluku.....	42
3.7.1	Atmosférické podmínky pro měření leteckého hluku.....	43
3.7.2	Místa měření	43
4	Popis systému měření hluku v okolí LKPR	45
4.1	Noise and Track Monitoring Systém (NTMS)	45
4.2	Detekce leteckého hluku	46
4.2.1	Měřicí stanice	48
4.2.2	Enviroment Monitoring Unit	50
4.2.3	Meteorologické stanice	51
5	Metody zpracování dat.....	54
5.1	Regresní analýza.....	54
5.1.1	Korelační matice	55
5.2	Regresní stromy (classregtree).....	55
5.2.1	Korelační diagram (Scatterplot)	55
5.3	ROC (Receiver Operating Characteristic) křivka	56
6	Výsledky zpracování dat	58
7	Závěr	67
	Seznam obrázků	70
	Seznam grafů	71
	Seznam tabulek	71
	Použité zdroje.....	72

ÚVOD

Letiště Václava Havla v Praze je na území České republiky největším a nejvytíženějším vzdušným přístavem, který v roce 2017 odbavil více než 15 milionů cestujících. Takové navýšení odbavených cestujících, ve srovnání s předchozími roky, nemusí znamenat vždy navýšení frekvencí letů. Za tohoto předpokladu se pražské letiště snaží motivovat letecké provozovatele ke zvyšování kapacit jednotlivých letů, nikoliv k zvyšování jejich frekvencí. Jednou z příčin této snahy je snížení hluku vytvářeného provozem spojeným s leteckou přepravou, což je jeden ze způsobů, kterým se letiště snaží hluk snížit. Je to právě hluk, který je vnímán jako nejvíce negativní složka letecké přepravy a proto je potřeba hluk, jeho vznik, šíření a dopad na obydlené oblasti sledovat a zmírňovat.

Letiště se věnovalo monitorování hluku již v minulých desetiletích a 1. ledna 2008 zavedlo nový systém monitorování hluku nazvaný ANOMS8 (nyní používá novější verzi ANOMS9), provozovaný zkušební laboratoří MaREXCOM, partnerem australské společnosti Lochard a dánské firmy BRÜEL & KJÆR. Celý systém je používán k monitorování dodržení hygienických limitů vztahující se na hluk z letecké dopravy. Tento limit je vyjadřován v ekvivalentní hladině hluku jako 60dB pro denní hodiny a 50db v nočních hodinách. Zároveň je systém schopný dohledat případné hříšníky, kteří nedodrželi protihlukové postupy stanovené provozovatelem letiště. Nezbytnou nutností při monitorování hluku je i sledování aktuálních meteorologických podmínek, které ovlivňují šíření a útlum leteckého hluku. Extrémy různých meteorologických podmínek, vyskytujících se v době měření, mohou způsobit, že měření nemůže být uznané za platné. Takovéto vymezení meteorologických podmínek, během kterých měření může probíhat, je pravděpodobně spojeno s anomáliemi šíření hluku při takovýchto podmínkách. Vzdušná vlhkost, směr a síla větru... To jsou jen některé příčiny změny vlastností šíření zvuku otevřeným prostorem.

Tato diplomová práce si nejprve dává za cíl vyhledat teoretické poznatky ohledně fyzikálních zákonitostí a spojitostí s šířením zvuku prostorem. Následně se bude snažit o nalezení souvislostí mezi změnou těchto fyzikálních veličin a výskytem různých meteorologických jevů na území České republiky, převážně v okolí Prahy, kde bylo také prováděno měření pro ověření nalezených faktů.

Naměřená data byla poskytnuta odborem životního prostředí na Letišti Václava Havla v Praze, kde lze z těchto dat vyčíst aktuální meteorologické podmínky v době hlukových událostí. Diplomová práce se následně bude snažit pomocí statistických metod určit závislosti mezi velikostí hluku a proměnou různých meteorologických aspektů, popsat ji a srovnat s poznatky nalezenými v úvodní části práce.

Tímto popisem a jeho následnou analýzou výsledků by měly být stanoveny aspekty, které mají nejzásadnější vliv na šíření hluku. Tyto aspekty pak budou spojeny s průběhem určitých meteorologických situací, při kterých dochází k největšímu hlukovému zatížení okolních městských částí a obcí.

1 Zvuk a jeho vlastnosti

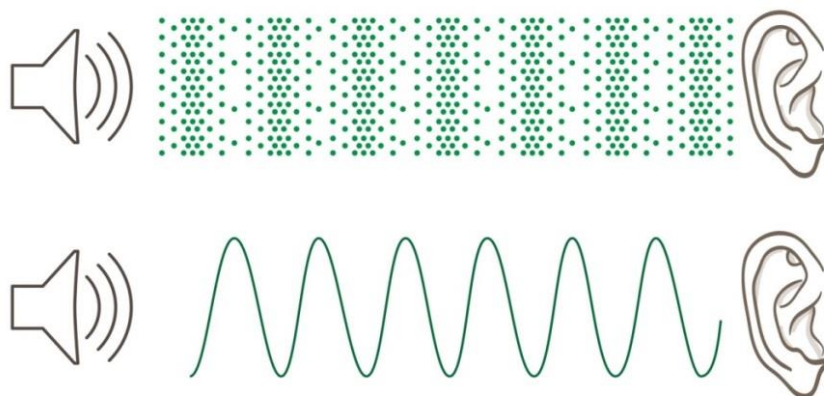
Tato kapitola je zaměřena na vysvětlení fyzikální podstaty zvuku jako vlnění, jeho vzniku, šíření a útlumu v prostoru.

Zvuk je mechanické vlnění, které vzniká kmitáním (vibracemi) objektů. Jako zvuk se označuje pouze slyšitelné pásmo frekvencí kmitání, které je pro člověka v rozmezí 20 Hz až 20 kHz. Ostatní frekvence se označují pouze jako kmitání nebo vibrace a jsou mimo jiné důležité z hlediska únavy materiálů nebo ergonomie prostředí.

Dynamické síly, jež mohou být vnitřní a vnější, vyvolávají v mechanických soustavách a konstrukcích kmitání, které způsobuje hluk. Toto kmitání zdroje je přenášeno do okolí díky pružným vazbám mezi částicemi prostředí. Rozruch se od zdroje šíří zhušťováním a zředováním prostředí, neboli kmity jednotlivých částic, okolo své rovnovážné polohy. Tyto kmity mohou být buď kolmo, nebo podélně orientované na směr šíření zvuku - takto se v určitých částech homogenního prostředí mění lokálně hustota látky. V případě vzduchu tedy dochází lokálně k nárůstu tlaku oproti své statické/atmosférické hodnotě. Tento přírůstek, vznikající vlivem kmitání prostředí, se nazývá akustický tlak p a je zobrazen na obrázku číslo 1 [1]. Matematicky lze vyjádřit zmíněné tvrzení následovně:

$$p = p_i - p_t$$

kde p_i je celkový okamžitý tlak ve sledovaném bodě a p_t je barometrický tlak.



Obr. 1 – Akustický tlak [2]

Při šíření zvukové vlny dochází k dvojímu pohybu. Jedním pohybem jsou jednotlivé kmity částic látky, ve které se zvuk šíří, s rychlostí v [m/s], a druhou rychlostí je samotné šíření vlny rychlostí c [m/s] prostředím. V homogenních podmínkách je rychlost nezávislá na směru šíření, což však z důvodu změny např. teploty nebo hustoty (nehomogenním prostředím) neplatí [1].

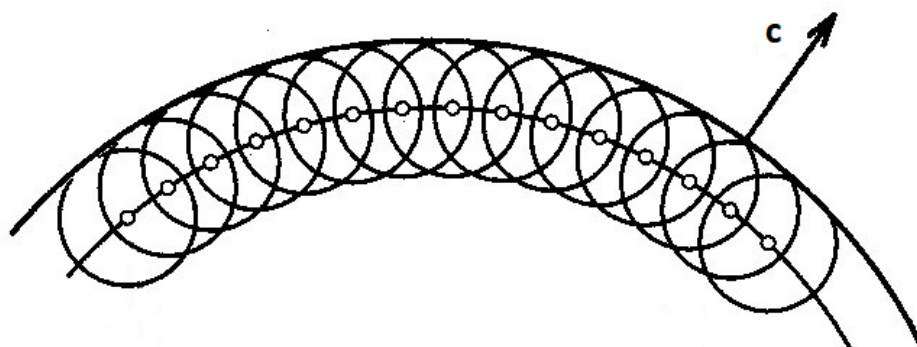
Volné zvukové pole předpokládá úplné a neomezené šíření akustické energie všemi směry. Tvar zvukového pole, a tedy i vlnoploch, ovlivňuje jakákoliv překážka vložená do cesty jeho šíření. Kromě přirozeného snižování akustické intenzity se vzdáleností, vlivem mechanických příčin na molekulové bázi, existuje mnoho faktorů, které ovlivňují šíření zvukového vlnění prostředím v reálném médiu, tedy v atmosféře. Rychlostní a teplotní gradient mění směr zvukových paprsků a způsobuje jejich deformaci. Viskozita atmosféry zase ovlivňuje absorpci akustické energie. Absorpční účinek je mnohonásobně vyšší pro vyšší frekvence zvuků než pro ty nižší. Dalo by se říci, že atmosféra působí jako dolno-propustný filtr, který zeslabuje vysoké frekvence, čímž deformuje frekvenční spektrum zvuku. K této deformaci dochází při snižování jeho energie a mění cesty jeho šíření. Důležitý je také povrch země, který má značný vliv na šíření, odražení a pohlcování akustické energie. Zvýšená absorpce zvuku roste se zvyšující se teplotou, naopak se snižuje s vyšší relativní vlhkostí vzduchu, což se projevuje při mlze nebo smogu [3].

1.1 Odraz, lom a ohyb zvukového paprsku

Při průchodu zvukového signálu, skrze nehomogenní prostředí, dochází k ovlivňování přímočarého šíření vlivem odrazu od překážek, ohybem v prostředí do prostředí s jinými vlastnostmi, nebo lomem při přechodu z jednoho do jiného prostředí.

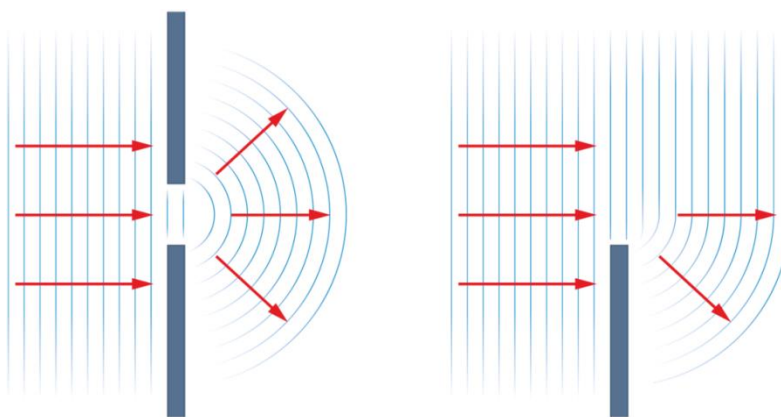
Odraz vlnění nastává v případě, kdy postupující vlna narazí na překážku a platí, že rozměr překážky má stejnou nebo větší velikost, než ji má vlnová délka λ . Jestliže je rozměr překážky podstatně větší, než délka dopadající vlny, lze užít zákona o úhlu odrazu vlny rovnajícího se úhlu dopadu. Intenzita odraženého vlnění je závislá na pohlcujících vlastnostech překážky, od které se vlna odráží.

Ohybem paprsku se nazývá jev, který je vysvětlován pomocí Huygensova principu. Podle Huygensova principu je každý bod vlnoplochy zdrojem vlnění šířícího se ve tvaru kulových vlnoploch. Součtem čelních stran jednotlivých vlnoploch vznikne opět čelo hlavní zvukové vlny tak, jak je naznačeno na obrázku 2 [3].



Obr. 2 – Huygensův princip [4]

K ohybu vlnění dochází na hranách překážek a způsobuje, že se vlnění šíří do míst takzvaného akustického stínu za překážku, která brání v přímočarém šíření zvuku. Podle Huygensova principu je hrana překážky bodový zdroj vlnění. Vlivem akustického stínu za překážkou neexistuje další zdroj vlnění, se kterým by se vlnění od hrany složilo a směr šíření vlnění se ohne. Velikost odchýlení paprsku závisí na vlnové délce vlnění a na velikosti překážky. Pokud je otvor v překážce, kterou prochází vlnění, ve srovnání s vlnovou délkou příliš malý, vzniká podle Huygensova principu kulová vlna. Pokud je otvor ve srovnání s vlnovou délkou stejný nebo větší, dochází k průchodu vlny [1]. Celý princip je vyobrazen na obrázku 3.



Obr. 3 – Ohyb vlnění [5]

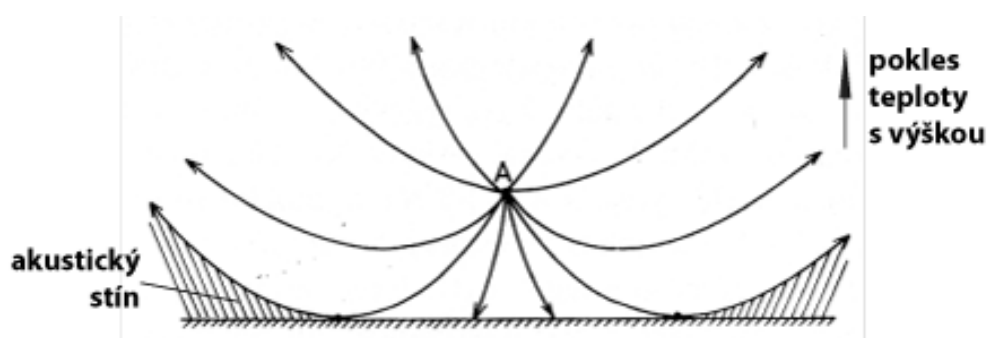
Postupuje-li vlna do prostředí s jinými vlastnostmi, které ovlivňují rychlost jejího šíření, nastává lom paprsku. Platí, že pokud vlna vstupuje do prostředí, ve kterém se šíří rychleji, lomí se paprsek směrem od kolmice ke styčné ploše těchto dvou prostředí. Pokud je úhel vstupu paprsku do nového prostředí příliš velký, větší než mezní úhel, dochází k jeho odražení. Pokud paprsek vstupuje do prostředí, ve kterém se šíří pomaleji, nedochází k odrazu při žádném úhlu dopadu. Za změnu prostředí lze považovat i vzduchové hmoty s odlišnou teplotou. Teplota vzduchu se však nemění skokově, ale plynule. Tímto způsobem dochází k postupnému ohýbání paprsku a to v závislosti na tom, zda

postupuje do teplejší nebo studenější vzduchové hmoty. Závislost lomu paprsku na teplotě, tedy na rychlosti šíření zvuku, vyjadřuje Snellův zákon:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

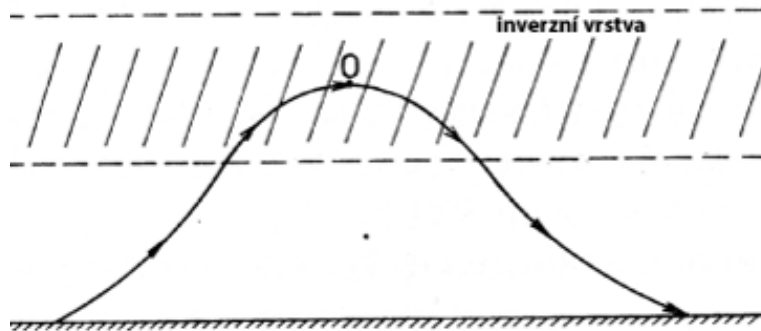
Kde α je úhel dopadu paprsku na rozhraní dvou vzduchových hmot, β úhel lomu zvukového paprsku, c_1 a c_2 jsou rychlosti šíření zvuku v jednotlivých prostředích.

V případě, že je zdroj zvuku umístěn v prostoru a teplota vzduchu s výškou klesá, dochází k tomu, že paprsky, které míří vzhůru, jsou ohýbány ke kolmici. Paprsky, které za takovéto situace míří k zemi, vchází do teplejší vrstvy vzduchu a lámou se od kolmice. V určitém momentě dojde k ohnutí paprsku natolik, že na rozhraní další vzduchové hmoty již přichází pod kritickým úhlem a dojde k jeho odrazu. Od této chvíle paprsek vchází opět do studenější vzduchové hmoty a nastává lom ke kolmici. Na obrázku číslo 4 lze vidět vyšrafované plochy znázorňující oblast akustického stínu, kam se zvuková vlna díky svému postupnému lomu nedostane. Tohoto jevu si lze všimnout jak při bouřkách, tak při průletech letadel [5].



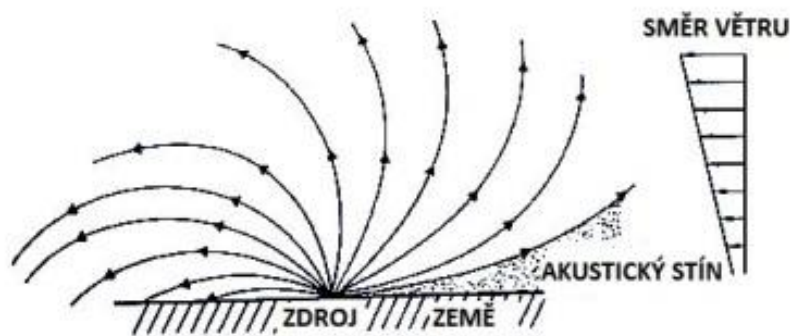
Obr. 4 – Lom zvukové vlny [5]

Podobným principem vzniká jev nazvaný anomální slyšitelnost. Tento jev je podmíněn silnou inverzní vrstvou vzduchu ve výšce, která způsobí, že se zvukový paprsek, směřující vzhůru pryč od zemského povrchu po dosažení vrstvy s teplotní inverzí, začne lámat od kolmice. Paprsek se láme do té doby, než začne přicházet na další vrstvu vzduchu pod kritickým úhlem a dojde k jeho odrazu. V tomto momentě opět vstupuje do studenějších vrstev a láme se ke kolmici. Zvukový rozruch se samozřejmě šíří také podél zemského povrchu, kde však dochází vlivem terénních nerovností k silnému útlumu. Tento jev tedy vede k tomu, že se za zónou přímé slyšitelnosti zvuku vyskytují zóna ticha a následně opět zóna slyšitelnosti, kam zvuk dopadá již ohnutou vlnou. Tyto jevy vznikají mnohem častěji během zimního období, kdy jsou teplotní inverze četnější [5]. Celý jev je znázorněn obrázkem číslo 5.



Obr. 5 – Vznik anomálie slyšitelnosti [5]

Vliv větru na šířící se paprsek zvukového vlnění záleží na jeho směru, směru větru a jeho síle. Pokud vítr vane proti směru šíření akustického paprsku, zapříčiňuje vychýlení paprsku nahoru směrem od zemského povrchu. Vlivem směru větru shodného se směrem šíření akustického paprsku dochází k ohýbání paprsku směrem k zemskému povrchu. Obrázek číslo 6 znázorňuje tuto popsanou skutečnost. V prvním případě platí, že zvuková energie slábnou v přímé závislosti na síle větru, kdy tóny vyšších frekvencí slábnou rychleji než při frekvencích nižších (nízké a střední frekvence slábnou v průměru o 3-5 dB/100m). V tomto případě vzniká také u země oblast akustického stínu, kde horní hranice zeslabení může dosahovat až 30 dB [3].



Obr. 6 – Deformace zvukového pole vlivem větru [3]

1.2 Rychlost šíření zvuku

V této kapitole je objasněna závislost rychlosti šíření zvuku na proměnlivých meteorologických podmínkách.

Jak již bylo zmíněno, rychlost zvuku je závislá na proměnných parametrech atmosféry. To je zapříčiněno tím, že rychlost vychýlení částice, tedy šíření vlny prostorem, je závislá na pružnosti prostředí. Čím je prostředí pružnější, tím se rozruch šíří pomaleji [6].

Jednotlivé vlastnosti, které atmosféra má, tedy teplota, tlak a hustota, mají vliv na „pružnost“ atmosféry, a tedy na rychlost zvuku c , který se skrze ni šíří. Závislost šíření zvuku v plynech je dána následujícím vztahem [3]:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$$

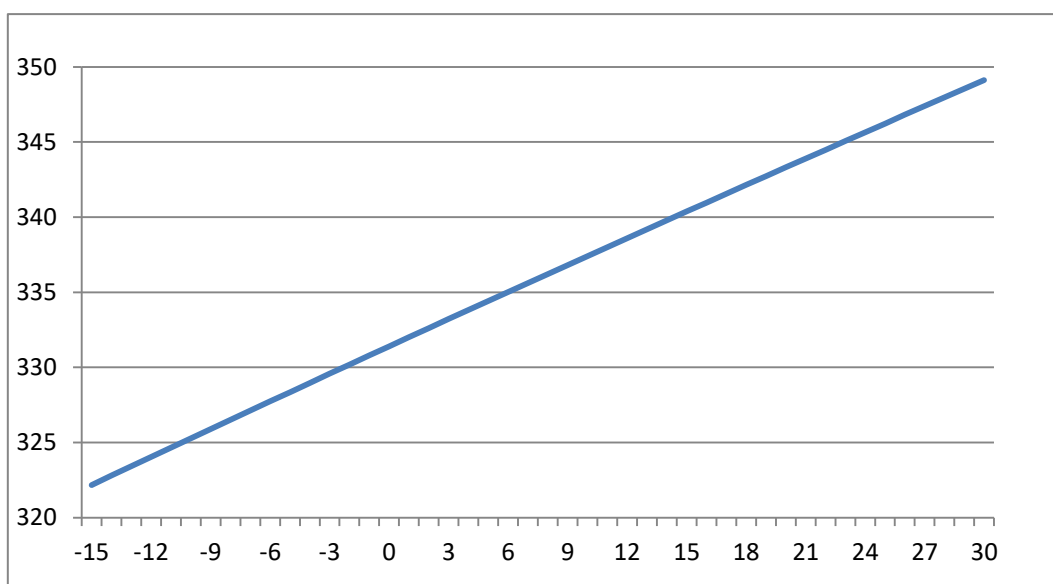
kde κ je adiabatický exponent suchého vzduchu ($\kappa=1,402$), p je statický tlak [Pa] a ρ je hustota daného plynu [kg m^{-3}].

Za předpokladu, že ρ lze vyjádřit jako $\rho=p/rT$ a následným dosazením do vztahu pro rychlost šíření zvuku v plynech, dostaneme následující vztah:

$$c = k\sqrt{T}$$

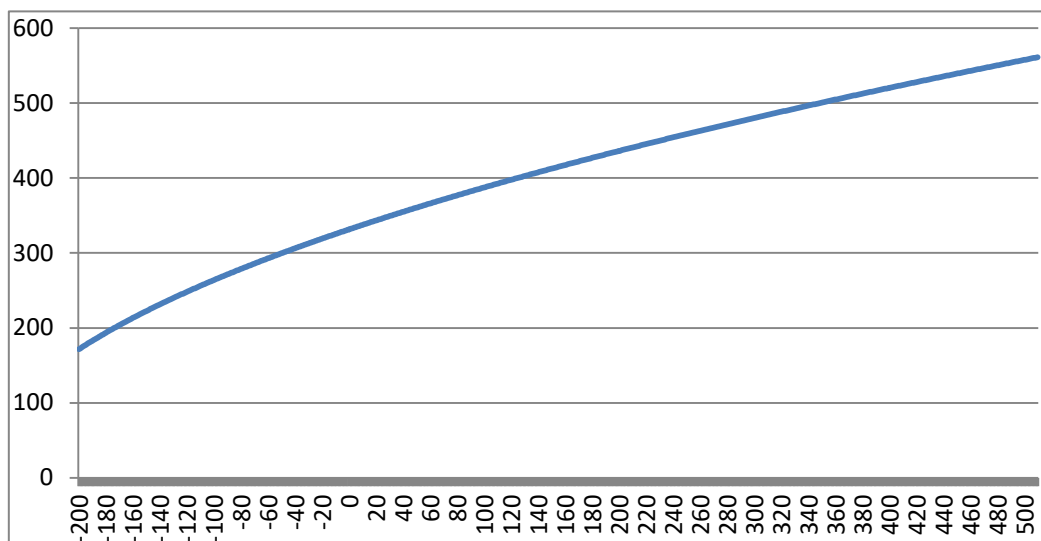
kde pro suchý vzduch platí, že r je plynová konstanta suchého vzduchu ($r=287,11 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), T je absolutní teplota [K] a k je konstantní hodnota závislá na plynu. Pro suchý vzduch platí, že $k=20,063$.

Z tohoto vzorce lze usoudit, že rychlost šíření zvuku v suchém vzduchu závisí pouze na jeho teplotě. Závislost rychlosti šíření zvuku na teplotě je znázorněna v grafu číslo 1, kde vodorovná osa značí teplotu ve stupních Celsia $^{\circ}\text{C}$ a svislá osa znázorňuje rychlost šíření zvuku ve vzduchu v metrech za sekundu m/s [7].



Graf č. 1 – Vliv teploty na rychlost zvuku v suchém vzduchu

Graf je vytvořen pro teploty $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je běžný teplotní rozsah dne na území ČR. V tomto teplotním rozsahu hodnoty rychlosti zvuku dosahují rychlostí $322,2 - 349,1\text{ m/s}$, a dle grafu se jeví být téměř přímo úměrné teplotě. Dle grafu číslo 2, který je vytvořen pro teplotní rozmezí $-200\text{ }^{\circ}\text{C} - +510\text{ }^{\circ}\text{C}$, je však vidět mírné konkávní prohnutí této závislosti.



Graf č. 2 – Vliv teploty na rychlost zvuku v suchém vzduchu

Reálný vzduch v sobě obsahuje velké množství vlhkosti. Tato vlhkost má značný vliv na rychlost šíření zvuku. Ve vztahu pro výpočet rychlosti zvuku byly použity hodnoty měrné plynové konstanty pro suchý vzduch a také hodnoty Poissonovy konstanty. Vzdušná vlhkost však ovlivňuje hodnoty těchto konstant, a tak je ovlivněna i výsledná rychlost zvuku. Samotné změny konstant jsou závislé na množství vlhkosti následovně:

$$r_v = r(1 + 0,61s)$$

$$\kappa_v = \kappa(1 - 0,12s)$$

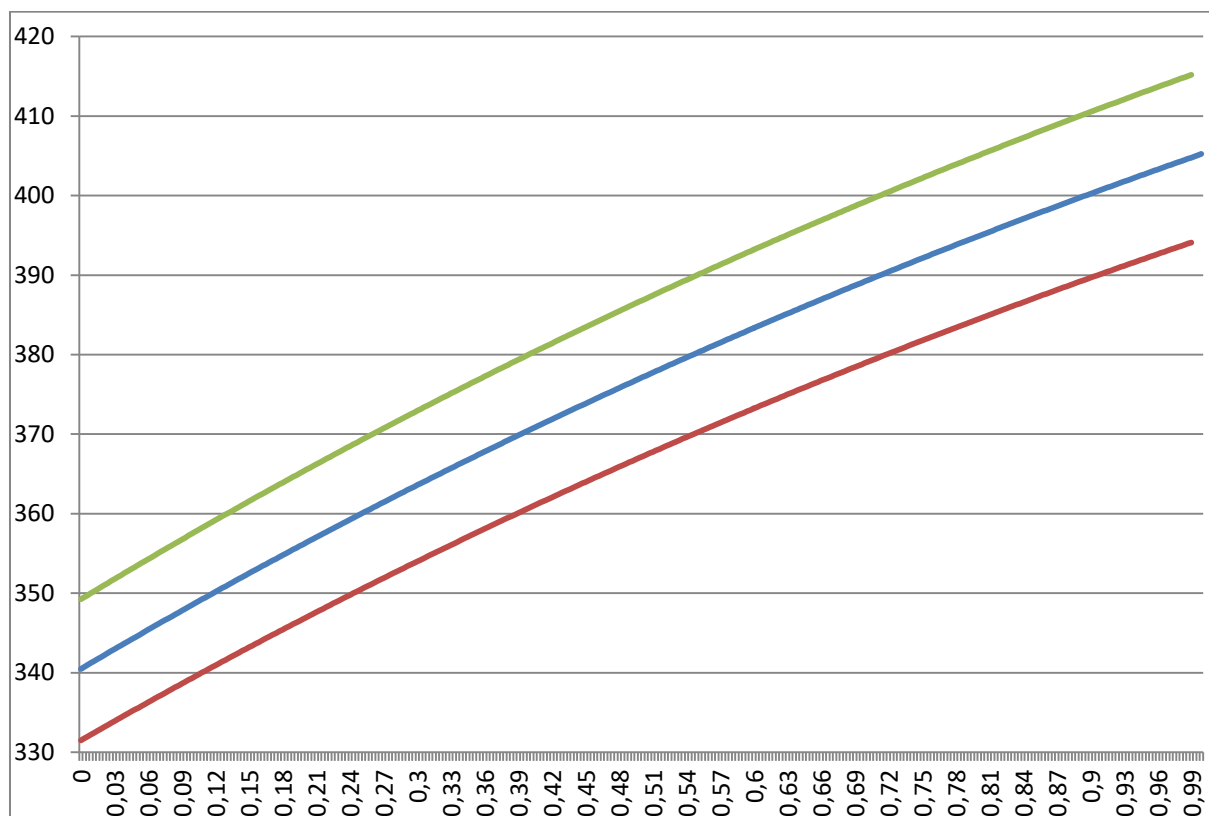
kde r_v je měrná plynová konstanta vzduchu s obsaženou vlhkostí, κ_v je Poissonova konstanta vzduchu s obsaženou vlhkostí a s je měrná vlhkost vzduchu, tedy množství vodní páry vyjádřené v gramech, které jsou obsaženy v 1000 gramech vzduchu [8].

Po matematickém odvození lze psát vztah pro rychlost šíření zvuku ve vlhkém vzduchu následovně [5]:

$$c_v = 20,063\sqrt{T(1 + 0,61s)(1 - 0,12s)}$$

kde c_v je rychlost zvuku ve vlhkém vzduchu [ms^{-1}].

Graf číslo 3 znázorňuje závislost rychlosti šíření zvuku na měrné vlhkosti ve vzduchu v rozsahu 0-990 gramů dle výše zmíněného vztahu. Červená křivka znázorňuje průběh pro teplotu 0°C, modrá pro 15°C a zelená pro 30°C. Osa x interpretuje množství vlhkosti ve vzduchu [g], osa y znázorňuje velikost rychlosti šíření zvuku [ms^{-1}].



Graf č. 3 – vliv měrné vlhkosti na rychlost šíření zvuku

1.3 Útlum zvuku v prostoru

Zvuky šířící se v atmosféře jsou zeslabovány působením výměny tepla mezi oblastmi zhuštění a zředění, vazkosti vzduchu a především rozptylu zvukových vln na nehomogenitách ve vzduchu i na nerovnostech zemského povrchu.

Pro popis tlumení akustického vlnění v prostoru je třeba zavést základní veličiny, které vlnění popisují.

Jakýkoliv zdroj akustického vlnění se dá charakterizovat svým akustickým výkonem. Tento výkon není závislý na žádných meteorologických podmínkách jako jiné veličiny, které se z výkonu dají dopočítat. Pro definování akustického výkonu je potřeba vědět, že akustická energie W je mechanická energie všech částic plynu ovlivněných vlněním. Tento předpoklad platí na základě toho, že akustické vlnění má sinusový charakter s frekvencí f . Platí tedy následující vztah:

$$W = \frac{Mv^2}{2}$$

Dále lze říci, že amplitudu rychlosti částice lze vyjádřit jako $v = \omega A = 2\pi fA$. Lze tedy říci, že akustická energie roste s druhou mocninou amplitudy výchylky A , a s druhou mocninou kmitočtu f .

kde M je hmotnost všech rozkmitaných částic v objemu plynu [kg], v je amplituda akustické rychlosti rozkmitaných částic [ms^{-1}], π je Ludolfovo číslo, f je frekvence kmitání [Hz] a A je amplituda výchylky kmitání [m].

Akustický výkon je poté definován jako množství akustické energie procházející kulovou plochou libovolného poloměru, kde bodový zdroj energie je umístěn ve středu této kuloplochy. Platí následující vztah:

$$P = \frac{W}{t}$$

Akustický výkon, který je možno zachytit v určité vzdálenosti akustického prostředí, procházející přes danou plochu S , lze nazvat akustickou intenzitou výkonu I . Zmíněná situace je popsána následujícím vztahem:

$$I = \frac{W}{St}$$

Z výše uvedeného vztahu, za podmínky volného zvukového pole, lze odvodit následující vztah:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

kde I je akustická intenzita [W/m^2].

Ze vztahu lze vidět, že množství výkonu, protékající danou plochou je přímo úměrné čtverci akustického tlaku p , neboli síle zdroje akustického vlnění a nepřímo úměrné hustotě plynu ρ společně s rychlostí šíření vlnění c .

Pokud zanedbáme ztráty mechanické povahy, lze říci, že akustická energie je v libovolném objemu konstantní. Což znamená, že při rovinné vlně nemá vzdálenost od zdroje akustického vlnění na velikost akustické intenzity vliv, protože vlna prochází konstantní plochou. Nicméně v případě bodového zdroje, kterým může být pro pozorovatele letadlo letící ve výšce, se vlnění šíří pomocí kuloploch. Tak, jak se vlnění vzdaluje od zdroje, narůstá poloměr kulové plochy a tím také její povrch. Důsledkem toho je snižování akustické intenzity procházející daným povrchem. Velikost dané

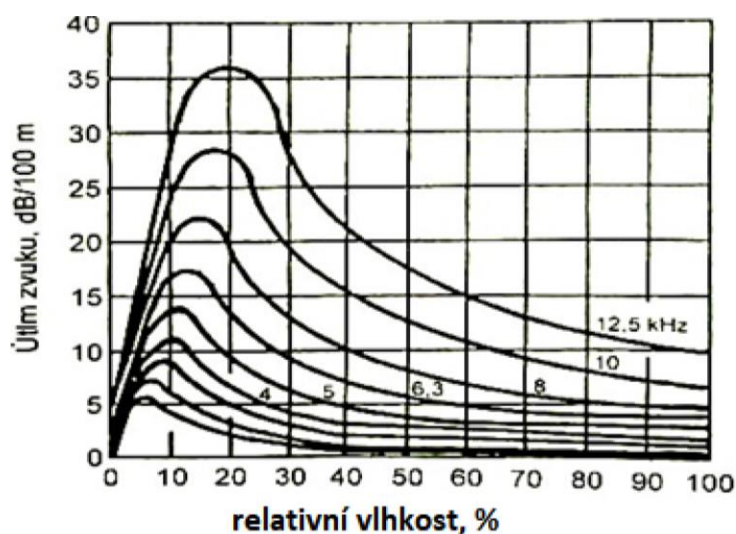
intenzity tedy klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje zvuku [9]. V předchozím tvrzení jsou zanedbány ztráty mechanické povahy, které v reálné atmosféře také nastávají a projevují se přeměnou akustické energie na teplo. K přeměně akustické energie na teplo dochází následujícími způsoby [3]:

- Intenzita zvuku klesá se vzdáleností vlivem tepelné vodivosti, vyzařováním tepelné energie, viskozity vzduchu a také vlivem difuze. Takovéto snižování intenzity není ovlivněno vlhkostí vzduchu, ale je úměrné druhé mocnině frekvence šířícího se vlnění. Z toho plyne, že signály vyšších frekvencí jsou pohlcovány více než signály nižších frekvencí. Hodnoty útlumů zobrazuje tabulka číslo 1.

Vzdálenost m	Frekvence/Hz			
	500	1000	2000	4000
	Útlum /dB			
100	0,4	1	2,1	8,1
200	0,8	1,8	4,1	14,2
400	1,3	2,8	6,5	21
700	1,6	3,6	8,8	30,1
1000	2,1	4,5	11,2	38,4
2000	4	8,4	20,5	73

Tabulka č. 1 – Vliv frekvence na útlum zvuku [1]

- K úbytku akustické intenzity dochází vlivem molekulové absorpce, která je založena na relaxaci při pohybu molekul kyslíku. Takovéto snížení intenzity je významně závislé na relativní vlhkosti vzduchu. Závislost útlumu zvuku na relativní vlhkosti a na jeho frekvenci je znázorněna v grafu číslo 4.



Graf č. 7 – Útlum zvuku vlivem relativní vlhkosti [3]

Ve vztahu pro výpočet intenzity figuruje ve jmenovateli součin hustoty ρ a rychlosti šíření vlnění c . Tento součin vyjadřuje akustickou impedanci, neboli vlnový odpor prostředí, značenou písmenem Z [1].

$$Z = \rho c$$

V akustice má tento součin většinou větší význam, než jednotlivé veličiny samostatně. V ideálním plynu jsou tyto veličiny na sobě do jisté míry závislé podle stavových rovnic plynu. V reálné atmosféře však může docházet vlivem tlakových změn a různé sluneční aktivity k situacím, kdy hodnoty těchto veličin nabývají hodnot s různými odchylkami, a tedy neřídí se přesně stavovou rovnicí ideálního plynu. Stavová rovnice ideálního plynu dává do vzájemného vztahu vlastnosti plynu, kterými jsou tlak plynu p , jeho objem V , jeho látkové množství n , molární plynovou konstantu R a jeho termodynamickou teplotu T . Tvar stavové rovnice je následující [10]:

$$pV = nRT$$

Rovnice platí pro ideální plyny a pro reálné plyny pouze pokud mají nízký tlak a teplotu. Takovéto základní vyjádření vztahu mezi jednotlivými parametry plynu odpovídá pouze úzkému spektru podmínek v reálném plynu, a pro různé případy (vysoký tlak nebo teplota) existují i jiná vyjádření stavové rovnice. Dle výše uvedeného textu lze usoudit, že akustické impedance je tedy závislá na hustotě prostředí a na rychlosti šíření zvuku, ale zároveň jsou na sobě závislé tyto dvě veličiny na základě stavové rovnice plynu.

Měření reálného útlumu zvukové vlny však neodpovídá těmto teoretickým poznatkům a je větší. To ukazuje na velký význam utlumení vlny vlivem nehomogenit, různých teplotních polí, turbulentních vrstev nacházejících se ve vzduchu, aerosolových částic, apod. [1].

2 Kritické meteorologické podmínky pro šíření zvuku

V předešlé kapitole se práce věnovala fyzikální podstatě zvuku, jeho vzniku, přenosu a útlumu. Stejně tak zde byly nastíněny některé fyzikální vztahy ovlivňující šíření zvukových vln. V této kapitole se diplomová práce věnuje konkrétním jevům, které zapříčiňují změny těchto fyzikálních podmínek, jež můžou vést ke změnám vedení a tlumení zvuku. V závěru této práce budou srovnány tyto předpoklady s naměřenými a zpracovanými daty, pocházející z měřících stanic v okolí pražského letiště. Z tohoto důvodu jsou i meteorologické jevy vztaženy k oblasti střední Evropy (Prahy).

2.1 Teplota a tlak

V ideální atmosféře jsou na sobě teplota a tlak závislé dle stavové rovnice plynu. Stavová rovnice pro ideální plyn má následující podobu:

$$pV = nRT$$

kde p je tlak ideálního plynu, V je objem ideálního plynu, n je látkové množství plynu, R je molární plynová konstanta a T je termodynamická teplota plynu.

Tento vztah platí, jak již bylo zmíněno, pro ideální plyn. V reálné atmosféře tato závislost platí pouze částečně, a to z důvodu mnoha dalších faktorů, které ovlivňují vývoj teplot, tlaku i hustoty [10].

Ze stavové rovnice lze určit hustotu vzduchu, která je velice důležitým prvkem v mnoha vztazích uvedených v kapitole číslo 1 (rychlost šíření zvuku – kapitola 1.2, akustická intenzita a impedance - kapitola 1.3). Hustota vzduchu se tedy určí jako podíl tlaku p a součinu plynové konstanty R , teploty T zvlášť pro suchý vzduch a pro vodní páru. Celková hustota je spočítána jakou součet hustoty suchého vzduchu a vodní páry (pro nenasycený vlhký vzduch). Vodní pára je za srovnatelných podmínek se suchým vzduchem lehčí v poměru 0,622:1 [10].

2.1.1 Teplota

Fyzikální veličiny a jevy závislé na teplotě tak, jak bylo stanoveno v kapitole číslo 1 této práce:

- vliv na velikost absorpce (impedanci)
- vliv na velikost intenzity
- lom akustického paprsku

- změna rychlosti šíření akustického vlnění

Zdrojem tepla na planetě Zemi je Slunce. Energie proudící ze Slunce se vlivem absorpce v zemské atmosféře a na zemském povrchu mění na tepelnou energii. Množství slunečního záření, dopadající na vrchní okraj atmosféry, je udáváno takzvanou solární konstantou (S). Solární konstanta je tedy množství energie dopadající na jednotku plochy kolmé ke slunečním paprskům za čas při průměrné vzdálenosti Slunce od Země. Hodnota solární konstanty je dohodnuta jako $S = 1393 \pm 20 \text{ Wm}^{-2}$. Reálná hodnota se v průběhu roku mění. Tato hodnota je udávána pro vrchní okraj atmosféry z důvodu, že atmosféra sluneční záření pohlcuje. Míra pohlcování slunečního záření atmosférou je asi 15% S . Vlivem nečistot (prach, kouř) a vodních par v atmosféře dochází i k rozptylu slunečního záření. Celkový rozptyl v atmosféře je hoden asi 25% S . Zhruba 60% tohoto rozptýleného záření se poté vrací zpět k zemi v podobě zpětného záření atmosféry, které velkou mírou přispívá k ohřevu zemského povrchu (zahřívání zemského povrchu dlouhovlnným zářením). Zemský povrch částečně toto dopadající záření odráží. Charakteristika popisující míru odrazuschopnosti zemského povrchu na množství dopadajícího záření se nazývá albedo. Průměrné albedo zemského povrchu je okolo 40% (povrch půdy má albedo cca 8%, čerství sníh cca 80%) [8].

Každé těleso, včetně zemského povrchu, mající teplotu vyšší jak $-273,15^\circ\text{K}$ do svého okolí vyzařuje energii. Během dne jsou tepelné ztráty pokryty dodáním nové energie z přímého nebo rozptýleného záření Slunce. Efekt záření zemského povrchu se projeví po západu Slunce, kdy přestane přijímat energii, a vlivem vyzařování energie začne docházet k poklesu teploty. Energie vyzářená zemským povrchem může být odrážena zpět k zemi v důsledku vodních par a oblačnosti v atmosféře. Lze tedy říci, že výskyt oblačnosti v noci snižuje množství vyzářené energie, a zabraňuje poklesu teploty tak, jak je tomu při jasných nocích.

Atmosféra je od zemského povrchu ohřívána několika způsoby:

- molekulární vodivostí
- termickou konvekcí
- mechanickou (dynamickou) turbulencí
- radiací
- latentní teplo z kondenzace vody

2.1.2 Chod teploty vzduchu

Denní chod teploty v České republice je jednoduchý a lze ho interpretovat vlnkou. Maximálních hodnot dosahuje teplota v době kolem 13. hodiny a minimálních při východu Slunce. Tato závislost významně záleží na množství oblačnosti, poloze místa, větrnosti a povrchu půdy. Například díky povrchu je denní teplotní maximum ve městech a v lidské zástavbě posunuto asi o 2 hodiny. Tento posun je způsoben akumulováním a následným vyzařováním tepla typickým městským povrchem. Vrstva, ve které se projevuje denní chod teploty, se nazývá mezní vrstva. Velikost této vrstvy se liší v závislosti na ročním období a na denní době. Tento chod je ovlivňován přítomností různých tlakových útvarů, přechodu atmosférických front a množstvím oblačnosti.

Roční chod teplot je důležitou klimatickou charakteristikou určitého místa. Lze jej interpretovat taktéž jednoduchou vlnou, kdy svého maxima nabývá v období červenci až srpnu a minima v lednu a únoru. Pravidelný a hladký průběh je opět narušován různými tlakovými útvary, z nichž některé mají i klimatologický význam a pravidelně se opakují [8].

2.1.3 Teplotní inverze

Dle mezinárodní standardní atmosféry dochází s rostoucí výškou k poklesu teploty. Mezinárodně dohodnutým teplotním gradientem je $-6,5^{\circ}\text{C}$ na 1000 výškových metrů. V reálné atmosféře se tento gradient mění na okolních podmínkách. V případě, kdy nastane stav, že teplota s rostoucí výškou stagnuje, hovoříme o izotermii. Pokud teplota s výškou roste, jedná se již o inverzi. Jak inverze ovlivňují šíření zvukových vln je pojednááno v kapitole 1.1 Odraz, lom a ohyb zvukového paprsku. Inverze se vždy zabírá vzduchovou vrstvou. Hovoříme pak o tloušťce inverzní vrstvy a o její výšce. Rozlišujeme tak přízemní a výškové inverze. Podle příčin vzniků inverzí se dají dělit také následovně [8]:

- Radiační inverze

Tento druh inverzí byl již částečně popsán v kapitole 2.1.1 Teplota. K radiační inverzi dochází vždy, když je energie vyzařovaná povrchem větší než energie přijímaná. Kromě nočních inverzí popsaných v tomto odstavci tak mohou vznikat i denní inverze, obvykle nazývané zimní. V zimním období často dochází k tomu, že sluneční záření nedodává dostatečné množství energie k pokrytí vyzařovacích ztrát. Tato situace nastává hlavně při anticyklonálních situacích.

Vlivem vyzařování zemského povrchu dochází k jeho podchlazování a následnému ochlazení i nízkých vzduchových vrstev. Tyto nízké vrstvy jsou nyní chladnější, než vyšší vzduchové vrstvy. Noční inverze dosahují mohutnosti několika desítek metrů, zimní inverze mohou sahát až do výšky

1500 metrů. Ve volné atmosféře mohou radiační inverze vznikat vyzařováním horní stranou oblačnosti.

Celý princip radiační inverze je zobrazen na obrázku číslo 7.



Obr. 7 – Zpětné záření oblačnosti [11]

- Frontální inverze

Tyto druhy inverzí jsou sdružené s frontálními útvary. Dochází k tomu, že studený vzduch se podsouvá pod teplou masu vzduchu a na rozhraní těchto dvou hmot se vytváří inverzní vrstvy. Stejným způsobem se může inverze vytvořit, pokud se po dlouho trvajícím studeném období, začne na území nasouvat teplá vzduchová hmota. Spodní vrstvy této hmoty začnou být ochlazovány zemským povrchem, kdežto vrchní vrstvy zůstávají stále teplé.

- Inverze způsobené turbulencí

Působením turbulence může nastat proces, kdy spodní teplé vrstvy vzduchu mohou být vyneseny do výšky, a naopak studenější vzduch z výšky může být snesen níže.

- Inverze způsobené stlačováním vzduchu

Takovéto inverze nastávají v období působení anticyklony, kdy dochází k sestupu vzduchu z volné atmosféry, a následným roztékáním tohoto vzduchu od středu anticyklony do stran. Vzduch, nad tímto roztékajícím se proudem, se vlivem vyššího tlaku otepluje, a tak vzniká inverzní vrstva, neboť sestupující vzduch si zachovává své původní vlastnosti.

Vliv na teplotu má:

- poloha daného místa (orientace ke Slunci, návětrná strana, atd.)
- roční a denní doba

- stupeň znečištění atmosféry
- povrch, na který dopadá sluneční a rozptýlené záření
- množství oblačnosti a vodních par v atmosféře
- frontální systémy

2.1.4 Tlak

Fyzikální veličiny závislé na tlaku, tak jak byly stanoveny kapitolou číslo 1:

- akustická intenzita

Změny tlaku mohou být pozorovány v souvislosti s několika pohledy:

- vývojem tlakového pole
- v souvislosti s přechodem vzduchových front
- denní chod tlaku

Při pohledu na přízemní povětrnostní mapu lze spatřit čáry nazývané izobary, které vymezují místa se stejným atmosférickým tlakem. Celkově se tak tyto obrazce nazývají tlaková pole. Tlakové pole se vytváří na základě odlišného množství a intenzity slunečního záření v různých oblastech. Takovýmto způsobem vznikají tlakové výše (anticyklona) a níže (cyklona), které se mohou pohybovat i několik stovek kilometrů po zemském povrchu. Hodnoty tlaku mohou dosahovat hodnot okolo 990 hPa při tlakových nížích a 1030 hPa při tlakových výších [8].

Ke změně tlaku dochází i vlivem přechodů vzduchových front. Příchod frontálního útvaru lze podle změny tlaku rozpoznat tak, že tlak klesá. Pokud dochází k přechodu teplé fronty, tlak po jejím přechodu zůstává stejný, nebo zaznamenáváme jeho mírný pokles. V případě studené fronty zaznamenáváme po jejím přechodu opět strmý nárůst tlaku. K největším tlakovým propadům dochází při přechodu výškové okluzní studené fronty. Obzvláště je tomu tak v místech blízkých okluznímu bodu. Tento bod nastává v polohách, kde se setkává teplá a studená fronta [8].

Kromě velkých tlakových změn, které souvisí s výše uvedenými důvody, dochází též k dennímu chodu tlaku. Rozdíl v tlacích v průběhu dne v našich zeměpisných podmínkách může být okolo 0,5 – 1 hPa. Tlakové minimum nastává okolo 4. a 16. hodiny. Maximálních hodnoty jsou pozorovány okolo 10. a 22. hodiny. Změny tlaku na denní bázi jsou většinou překryty výraznějšími tlakovými výkyvy, souvisejícími s přechodem tlakového útvaru, popřípadě frontálního systému. V letních obdobích je denní chod tlaku ovlivňován i počasím, například bouřkami (před příchodem bouřky tlak klesá). [10]

Vliv na tlak má:

- změna tlakového pole (blížící se tlakové níže nebo výše)
- přechod frontálního systému (studené, teplé nebo okluzní fronty)
- lokální jevy (bouřky, atd.)

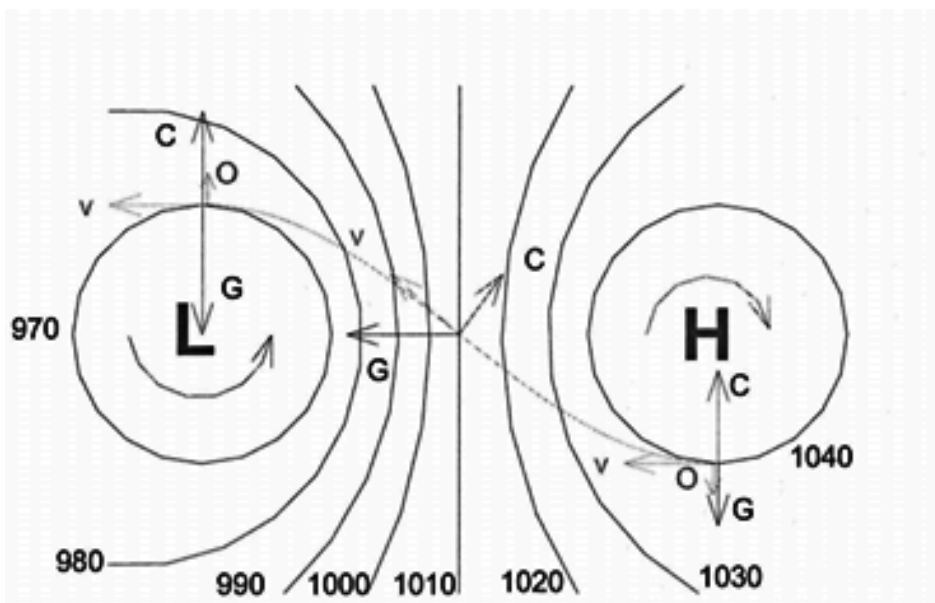
2.2 Směr a síla větru

V kapitole 2.1 byla zmíněna deformace zvukového pole vlivem větru. Podle principů zmíněných v této kapitole dochází k „unášení“ zvukového pole společně s větrem, ohýbání zvukových paprsků a vytváření akustických stínů. Mělo by tedy platit, že zvuková událost, která se odehrála proti větru z pohledu pozorovatele, by pro něj měla být snadno slyšitelná. Naopak pokud vítr vane směrem od pozorovatele, událost bude těžko postřehnutelná.

2.2.1 Vznik větru

Vznik samotného větru je velice úzce spojen s tlakovým polem. Vlivem nerovnoměrného zahřívání zemského povrchu a od něj vzduchových mas, dochází k vytváření nehomogenního tlakového pole. Existují tedy místa s vyšším a současně s nižším tlakem, tudíž v horizontální rovině vzniká rozdíl tlaků v jednotlivých oblastech. Tento rozdíl tlaků je označován jako horizontální barický gradient G , a je vždy kolmý k izobarám, znázorňující tlakové pole. Velikost tohoto gradientu je určována pomocí tlakové změny na horizontální vzdálenosti. Velké barické gradienty jsou tedy v místech zhuštění jednotlivých izobar. Tento gradient tedy uděluje vzduchové částici zrychlení a jeho směr je kolmý na izobary směřující od vyššího tlaku k nižšímu. Současně na pohybující se vzduchovou částici začne působit Coriolisova síla C , která je způsobena rotací Země a působí na všechny na objekty, jež se na ní pohybují. Tato síla má na severní polokouli směr takový, že stáčí vítr doprava. Jelikož Coriolisova síla působí kolmo na směr zrychlení G , dochází k zakroucení směru větru. Vlivem tohoto zakroucení směru větru působí na vzduchové částice i odstředivá síla O , která směřuje vždy od středu oběhu proudu vzduchu. Další silou, která působí na pohyb vzduchových částic, je síla třecí R . Ta vzniká jak mezi zemským povrchem, tak mezi samotnými molekulami vzduchu a mezi vzdušnými hmotami. Jelikož třecí síla zpomaluje rychlost větru, tak i snižuje účinky Coriolisovy a odstředivé síly. Po sečtení všech sil působících na vzduchovou hmotu, vzniká výsledná síla, která udává vzduchovou masu do pohybu rovnoběžného s izobarami. Směr proudění je takový, že kolem tlakové výše se vzduch pohybuje po směru hodinových ručiček, a naopak je tomu v okolí tlakové níže (při pohledu shora). Celý princip a vznik větru je znázorněn na obrázku 8 [8].

Pokud srovnáme směry a rychlosti větru ve výškách od země do zhruba 1000 metrů nad povrchem, lze zaznamenat změnu směru přízemního větru směrem doleva a úbytek rychlosti. Tato změna směru je způsobena třením proudu vzduchu o zemský povrch. Tímto třením se rychlost proudění u země snižuje a zmenšuje tak efekt Coriolisovy síly – směr větru protíná izobary pod větším úhlem. Síla větru ve výšce okolo 1000 metrů nad povrchem je tedy mnohem vyšší než u země, neboť zde chybí třecí síla povrchu.



Obr. 8 – Tlakové pole a vznik větru [8]

Celá situace nemusí probíhat v takto velkém měřítku, ale i na lokální úrovni. Tento případ nastává například v místech, kde dochází k různému ohřívání vzduchu - mezi městskou zástavbou a lesem nebo vodní plochou (princip pobřežní brízy). Zde pak vliv Coriolisovy síly není tak markantní, a spíše dochází k vyrovnávání tlaků [8].

Situaci cyklonálního a anticyklonálního proudění ovlivňuje primární cirkulace atmosféry, kdy je oblast mírného pásu ovlivňována azorskou anticyklonou. V nižších vrstvách ovzduší převládají jiho-západní směry větrů, zatímco ve výškách nad 500 metrů je směr tohoto proudění západní až severo-západní. V šířkách mírného podnebného pásu neustále vznikají putující cyklony a anticyklony, které mají za následek protichůdné směry vzdušného proudění [10].

2.2.2 Denní chod větru

Na denní chod větru má velký vliv přijímané sluneční záření, které je příčinou termické turbulence. Tato termická turbulence vytváří odpor pro rychle proudící vrstvy vzduchu ve výšce. To způsobuje

během dne nárůst rychlosti větru v nižších vrstvách vzduchu (v zimě cca 50 metrů, v létě cca 100 metrů), a brždění rychlého proudění vzduchu ve větší výšce. V noci je tento smysl opačný - termická konvekce oslabuje a nedochází k takovému přenosu rychlosti vyšších vrstev vzduchu na vrstvy spodní. Podobný efekt může mít i přítomnost teplotní inverze, která zabraňuje vertikálnímu promíchávání vzduchu, tudíž přenosu rychlosti z větších výšek do nižších [8].

2.2.3 Vliv frontálních systémů

Příchod teplé fronty se vyznačuje obvykle větrem z jihu až jihovýchodu. Po přechodu teplé fronty se směr větru stáčí k jihozápadu. V případě blízkosti přechodu studené fronty pozorujeme směry větru z jihu až jihozápadu. Po přechodu studené fronty se směr větru stáčí k severozápadu až severu. Přechod studené fronty bývá často doprovázen i bouřkovou činností, která má sama o sobě velký vliv na změnu větru. V případě teplé okluzní fronty je vítr jižních směrů a nejsilnější je před výškovou studenou frontou. Po jejím přechodu slábne a zachovává směr a po přechodu spodní teplé fronty se ostře stáčí vpravo na severozápad až západ a sílí. Vítr před studenou okluzní frontou má většinou jižní až jihozápadní směr, po přechodu spodní studené fronty zachovává svůj směr, sílí a po přechodu výškové teplé fronty se ostře stáčí vpravo na severozápad [8].

Vliv na změnu větru má:

- okolní tlakové pole
- lokální krajinný charakter
- charakter povrchu země
- denní doba
- přítomnost teplotní inverze

2.3 Vzdušná vlhkost

Fyzikální veličiny a jevy závislé na vzdušné vlhkosti tak, jak byly stanoveny v kapitole číslo 1 této práce:

- rychlost šíření akustického vlnění
- útlum akustického vlnění

V minule kapitole, týkající se fyzikální podstaty šíření a útlumu zvuku v prostoru, práce zmiňuje vliv vlhkosti na rychlost šíření a útlum akustické vlny. Tato kapitola se zabývá vlhkostí vzduchu a způsobem, jak se vzduch vlhkostí nasycuje a při jakých meteorologických situacích dochází ke změnám vlhkosti vzduchu, jakožto i k ovlivnění šíření zvuku.

2.4 Termodynamika vlhkého vzduchu

Pro popis vzniku různě vlhkého vzduchu je nutné nejprve popsat termodynamické děje, které zde nastávají. Nejprve je nutné zmínit, že suchý vzduch a vodní pára (tedy i vlhký, ale nenasycený vzduch) se dají uvažovat jako plyny ideální, a platí pro ně stavová rovnice plynu (viz. úvodní část kapitoly 2.1) a dále 1. věta termodynamická, která tvrdí, že celková energie izolované soustavy zůstává konstantní. Z hlediska výpočtů a hledání vlastností se s vlhkým vzduchem pracuje tak, že se uvažuje jeho složení ze dvou složek. Tedy ze suchého vzduchu a vodní páry, kde výsledný tlak vlhkého vzduchu je součtem jejich parciálních tlaků, oba plyny mají stejnou termodynamickou teplotu T , zaujímají stejný objem V . Co se týká vodní páry, tedy nasyceného vzduchu vlhkostí, je zde nutno brát v úvahu latentní teplo, které se uvolňuje, popřípadě spotřebovává, při jednotlivých fázových přechodech, jež je například vypařování, kondenzace, sublimace, desublimace, tání a tuhnutí [8].

Jak již bylo zmíněno výše, množství vodní páry obsažené ve vzduchu ovlivňuje celkovou vlhkost vzduchu. Samotná vodní pára, považovaná za plyn, má samozřejmě svůj tlak. Tento tlak závisí na velikosti výparu a teplotě vzduchu. Závislost maximálního množství vodní páry v suchém vzduchu lze popsat tak, že čím je vyšší teplota vzduchu, tím vyšší je možný tlak vodní páry v případě nasyceného vzduchu. Dalo by se také říct, že vzduch je schopen při určité teplotě přijmout jenom určité množství vodní páry, než se z nenasyceného stane nasycený. Neboli, čím vyšší teplota vzduchu, tím více vodní páry je schopen udržet, aniž by se stal nasyceným. Tato vlastnost určuje důležitou charakteristiku vzduchu, kterou je teplota rosného bodu. Teplota rosného bodu vyjadřuje teplotu vzduchu, na kterou musí být izobaricky ochlazen bez dodávání další vlhkosti zvenčí, aby se z nenasyceného stal nasycený. Při poklesu teploty vzduchu pod hodnotu rosného bodu začne docházet ke kondenzaci ve formě tvorby rosy, mlhy nebo dešťových srážek [8].

Míra vlhkosti vzduchu se dnes nejčastěji vyjadřuje pomocí relativní vlhkosti r (%) a měrné vlhkosti s (g/kg). Relativní vlhkost udává poměr skutečného obsahu vodní páry v daném objemu vzduchu k maximálnímu možnému obsahu vodní páry za dané teploty.

V kapitole 1.2 je uveden vztah pro změnu rychlosti šíření zvuku na vzdušné vlhkosti. Tento vztah využívá hodnot měrné vlhkosti, která uvádí množství vzdušné vlhkosti v gramech v kilogramu vlhkého

vzduchu. V běžném životě se člověk častěji setkává s relativní vlhkostí. Vztah mezi relativní vlhkostí a měrnou vzdušnou vlhkostí je následující [12]:

$$r = \frac{p_{VV}s}{p_v(0,6219 + s)}$$

kde r je relativní vlhkost [%], p_{VV} je tlak vlhkého vzduchu, P_v je tlak vodní páry a s je měrná vlhkost vzduchu.

2.4.1 Výpar a desublimace

Vodní pára se do ovzduší dostává pomocí fázové přeměny z kapalného skupenství, případně přeměny ze skupenství tuhého. Nejčastějším případem je výpar vlhkosti z vodní hladiny, popřípadě vypadávajících srážek, ze zemského povrchu, vegetace. Na vliv množství vodní páry může mít i průmyslová a městská zástavba, kdy některé podniky mohou vypouštět do ovzduší značné množství vodní páry, která následně ovlivňuje mezoklima a mikroklima okolí. V zimě se může vlhkost do ovzduší dostávat pomocí sublimace sněhové pokrývky nebo ledové plochy [8].

Výpar vodní páry je ovlivněn několika vnějšími faktory. Výpar je ovlivněn teplotou, kdy platí, že výpar je tím větší, čím vyšší je teplota odpařovaného povrchu, menší vzdušná vlhkost a vyšší rychlost větru. Výpar má také svůj denní chod a je závislý na výše zmíněných parametrech, jejichž denní chod je objasněn v kapitolách 2.1.2 a 2.2.2. Denní chod výparu je shodný s denním a ročním chodem těchto podmínek. Tedy nejvyšší výpar bývá kolem poledne v létě, a nejnižší v noci během zimy [8].

2.5 Meteorologické stavy vedoucí ke změně vzdušné vlhkosti

Jak je patrné z obrázku číslo 6, který znázorňuje závislost absorpce akustického vlnění prostorem na relativní vlhkosti, dochází k největším útlumům při relativní vlhkosti v rozmezí 10-30%, kde největší absorpci podléhají vysokofrekvenční zvuky. Naopak nejmenší absorpce nastává při vysokých relativních vlhkostech, kdy částice vody napomáhají přenášení zvuku [13]. Tomuto také nasvědčuje graf číslo 3, který znázorňuje závislost rychlosti zvuku na vzdušné vlhkosti.

2.5.1 Růst vzdušné vlhkosti

Indikací vysoké relativní vlhkosti může být začínající kondenzace vodní páry do stavu, kdy začíná ovlivňovat dohlednost. Vzduch se tedy přiblíží stavu bodu nasycení vodní parou, neboli vzdušná

teplota se dostane blízko rosného bodu. Prvotní indikací je kouřmo. Jedná se o meteorologický termín, který vyznačuje sníženou dohlednost v rozmezí 10-1 kilometru. Pokud dohlednost klesá pod hodnotu jednoho kilometru, nazývá se tento jev mlha.

Vlhkost vzduchu v našich zeměpisných šířkách může být zvyšována několika způsoby [8]:

- Pomocí radiace zemského povrchu

O radiaci zemského povrchu bylo již pojednáváno v kapitole číslo 2.1.3, zabývající se inverzemi. V tomto případě nastává situace, při které se během dne vzduch nasycuje vlhkostí, a vlivem vysoké teploty vzduchu se hodnoty relativní vlhkosti pohybují hluboko pod bodem kondenzace. V momentě, kdy se vzduch začíná radiačně podchlazovat od přilehlého povrchu, dochází též k jeho nasycování a relativní vlhkost roste. Ideální podmínky pro růst vzdušné vlhkosti pomocí radiačního ochlazení vzduchu nastávají tedy při bezoblačné obloze, slabém přízemním větru na níže položených místech a údolích. Z těchto míst může být vlhký vzduch i přesouván na poměrně velké vzdálenosti.

- Pomocí vypařování vlhkosti

V případě přítomnosti vodních ploch, které jsou teplejší než vzduch, který je nad nimi, dochází k vypařování vlhkosti do tohoto vzduchu a zvyšování jeho vlhkosti. V případě blízkosti městské, nebo průmyslové zástavby, může vlivem vysoké koncentrace kondenzačních jader (znečištění vzduchu) docházet i ke vzniku takzvaných městských mlh.

- Přechodem vzdušné fronty

Vzdušná vlhkost může být zvyšována i díky vypařování frontálních srážek, popřípadě klesnutí frontální oblačnosti až k zemskému povrchu. Zvyšování vzdušné vlhkosti takto především probíhá před hranou teplé fronty. Zde z oblačnosti teplé fronty vypařávají srážky a padají skrze studený vzduch pod hranicí obou vzduchových front, který má nyní blíže k nasycení. Podobným principem dochází k nasycování vzduchu vlhkostí u pomalu postupujících studených front prvního druhu. V tomto případě se vzdušná vlhkost zvyšuje za frontou.

- Přítomnost teplotní inverze

Růst vzdušné vlhkosti může zapříčinit i přítomnost teplotní inverze. Tato teplotní inverze má za následek zabránění promíchávání spodních vrstev vzduchu s vyššími vrstvami a drží veškerou vlhkost vzduchu u země. K těmto inverzím může docházet buď při advekci teplého vlhkého vzduchu, který je

následně ochlazován od studeného podkladu, čímž roste i jeho relativní vlhkost nebo pomocí tepelného vyzařování zemského povrchu.

2.5.2 Pokles vzdušné vlhkosti

Pokles vzdušné vlhkosti může být způsoben několika vlivy. Prvním vlivem je přítomnost terénní překážky, vlivem které dochází k efektu fénu. Tento děj nastává za horskými hřebeny a vysokými kopci, tedy neovlivňuje oblast, kde byla data pro tuto diplomovou práci sbírána.

Dalším vlivem, který způsobuje nízké hodnoty vzdušné vlhkosti je příchod studeného arktického, nebo mořského vzduchu, který díky své nízké teplotě obsahuje velmi malé množství kondenzačních jader a vzdušné vlhkosti.

Vliv na vzdušnou vlhkost má:

- Teplota vzduchu a podkladu, ze kterého se odpařuje vlhkost
- síla větru
- denní doba
- dostupnost zdroje vlhkosti pro výpar
- přechod frontálního systému
- přítomnost teplotní inverze
- původ příchozí atmosférické vzduchové hmoty

3 Měření hluku

Zvuk je po fyzikální stránce definován svojí intenzitou a kmitočtem (u sinusového průběhu), respektive více kmitočty. Ve fyziologii odpovídá intenzitě zvuku hlasitost a kmitočtu přibližně výška tónu. Avšak závislosti mezi fyzikálními a fyziologickými veličinami nejsou jednoduché a nikde se mezi nimi nenachází přímá úměra. Jejich vztah lze popsat pomocí Fechner-Weberova zákona. Základem fyzikálního popisu hluku je akustický tlak, jež je označován L_p . Jako minimální referenční hodnota, kterou je člověk schopen slyšet, je $20 \mu\text{Pa}$ při kmitočtu 1000 Hz. Maximální hodnota, která je nazvána prahem bolesti, je pak hodnota 20 Pa. Tento rozsah je shodný s rozsahem lidského slyšení, kterým je rozsah 0-140 dB. Vyjádření hluku v decibelech sice odpovídá fyziologii slyšení, kdy lineární přírůstek sluchového vjemu odpovídá relativní změně podnětu, zároveň je také vhodnější pro třídění hlukových událostí, ale lineárně neodpovídá hladinám akustického tlaku. Důvodem je energetická charakteristika hladiny akustického tlaku a také to, že lineární přírůstky hladin odpovídají kvadratickému nárůstu akustického tlaku. Hladina se tedy definuje jako logaritmický poměr akustického tlaku p v určitém bodě k referenční hodnotě akustického tlaku, tedy $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Matematicky vyjádřeno [3]:

$$L_p = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

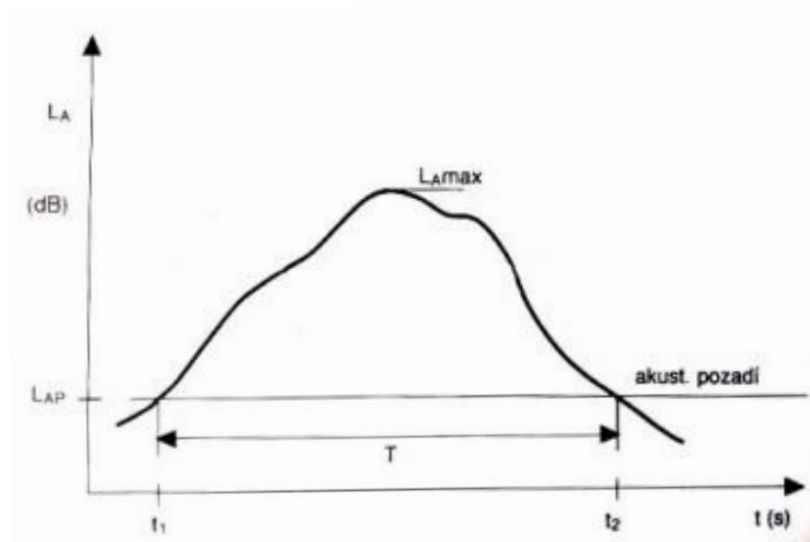
Tento vztah platí pouze pro referenční hodnotu kmitočtu 1000 Hz. Pro jiné kmitočty by muselo dojít k úpravě.

Pro akustické hladiny se zavádí jednotka bel, respektive decibel, která nemá fyzikální rozměr a je číselnou jednotkou. Decibel se využívá k zhodnocení míry zatížení okolního prostředí hlukem a vyjadřuje se prostřednictvím hladiny akustického tlaku.

Dle výše zmíněného vztahu lze odvodit, že těsně nad prahem slyšení je nárůst hladiny o 2 dB zanedbatelný, avšak při uvážení hladin okolo 100 dB je již nárůst akustického tlaku mnohem vyšší [1].

Důvodem pro měření leteckého hluku může být několik příčin. Měření hluku má možnost sloužit jako údaj o akustických vlastnostech konkrétního letadla, podklad pro územní plánování a rozhodování, kontrolu hlukových zón v okolí letiště, případně ke stanovení hlukové zátěže daného území. Měření leteckého hluku může být prováděno buď jako měření hluku jednotlivých průletů letadel, což se používá spíše jako měření za přesně definovaných podmínek pro získání akustických charakteristik letadla v rámci hlukové certifikace letadla, nebo pro ověření a doplnění numerického modelu hluku leteckého provozu. Další možnosti je soustavné monitorování a měření hluku leteckého provozu

(sledu hlukových událostí) v případě, kdy hluk letadel převládá nad ostatními hluky. Toto měření zaznamenává charakteristiky leteckého a neleteckého hluku spojitě. Nejčastěji měření leteckého hluku monitoruje odlétávající a přilétávající letadla. Takovéto zvukové události jsou charakterizovány tím, že hladiny hluku vždy vystoupí a následně klesnou pod hluk pozadí. Průběh hlukové události je na obrázku číslo 9 [1].



Obr. 9 – Průběh zvukové události [1]

Takto naměřený průběh hlukové události se dále zpracovává tak, aby bylo možné nastavit hlukové hygienické limity a to do formy hladin zvuku označované písmenem A (dB).

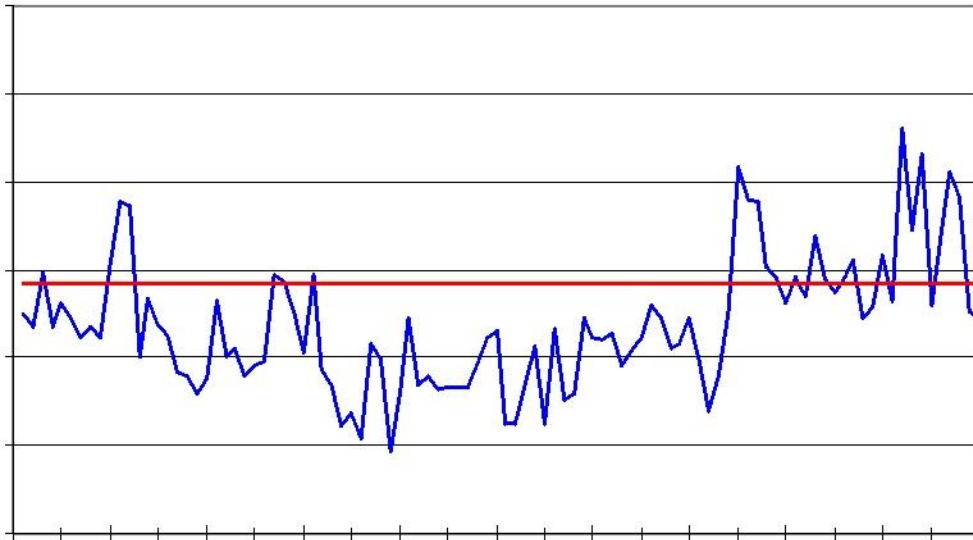
3.1 Ekvivalentní hladina zvuku L_{Aeq}

Obvykle během zvukové události dochází ke změnám toku akustické energie v čase. Popis podobné události je v takovéto formě obvykle velice složitý. Zjednodušením je převedení tohoto reálného průběhu události na ekvivalentní hladinu zvuku L_{Aeq} (dB) pomocí energie. Převedení je uděláno zprůměrováním akustické energie (reprezentovanou kvadráty okamžitých hodnot akustického tlaku za časový interval T) a vytvoření jedné konstantní hladiny zvuku, která je shodná s energetickou hodnotou za časový interval průběhu události. Pro výpočet ekvivalentní hladiny zvuku se využívá následující vzorec [1]:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt$$

kde $p(t)$ je okamžitý akustický tlak s vážením A [Pa], T je doba trvání zvukové události, p_0 je referenční tlak 20 μ Pa a t je partikulární čas v době měřené události ($t(0, T)$).

Princip je zobrazen na obrázku číslo 10, kde modrá křivka znázorňuje reálný průběh energie zvukové události v čase a červená křivka znázorňuje energetický průměr stejné události za zobrazený čas [1].



Obr. 10 – Ekvivalentní hladina zvuku [11]

Výsledná hladina akustického tlaku, způsobeného leteckým provozem, je získána na základě zpracování naměřených dat v souladu s METODICKÝM NÁVODEM pro měření a hodnocení hluku z leteckého provozu Č.j. OVZ-32.0-19.02.2007/6306. Ekvivalentní hladina zvuku musí být vždy vztažena k časovému údaji, který popisuje. V leteckém provozu se využívá úpravy ekvivalentní hladiny akustického tlaku na denní a noční hodnoty. Denní doba je definována jako období mezi 6:00 – 22:00, tedy 16 hodin a značí se L_{AeqD} . Pro noční období se jedná o čas od 22:00 do 6:00, tedy 8 hodin a značí se jako L_{AeqN} . Hodnoty L_{AeqD} a L_{AeqN} se navíc vztahují k rozsahu směrodatného leteckého provozu v charakteristickém letovém dni. Definice charakteristického letového dne a směrodatného leteckého provozu jsou vypracovány níže [1][16].

3.2 Charakteristický letový den

Charakteristický letový den udává průměrné provozní podmínky na letišti, odvozené pro posouzení dlouhodobého působení hluku. Definuje se počtem N vzletů a přistání všech letadel na daném letišti ve všech provozních směrech za 24 hodin. Počet N vzletů a přistání za 24 hodin se stanoví jako průměrná hodnota z celkového počtu letadel operujících na daném letišti v období posledních 6 měsíců. Měsíce, které se započítávají do výpočtu N letadel, jsou květen až říjen. Jedná se tedy

o letní měsíce s vyšším provozem než zbylé měsíce. Dále se rozlišuje mezi pohyby v denní době (6:00-22:00), tedy N_D a pohyby v době noční, tedy N_N [15].

3.3 Směrodatný letecký provoz

Lze definovat jako provoz, kterým se dokládají počty pohybů v charakteristickém letovém dni všech letadel, které tvoří charakteristickou skladbu letadel, a připadající na jednotlivé provozní směry vzletových a přistávacích drah. To znamená, že z měření jsou vyloučeny typy letadel, které se na letišti běžně nevyskytují. Úprava charakteristické skladby letadel je možná lokálními předpisy - např.: omezení noční letové činnosti některých typů letadel. Výsledná hladina akustického tlaku se odvodí pro směrodatný letecký provoz, který v daném místě měření představuje průměrné podmínky v charakteristickém letovém dni. Vychází se z poměrného počtu vzletů a přistání, připadajících na denní, resp. noční dobu, charakteristického letového dne, na jednotlivé směry vzletových a přistávacích drah, při zachování směrodatné skladby letadel v daných směrech vzletových a přistávacích drah [15].

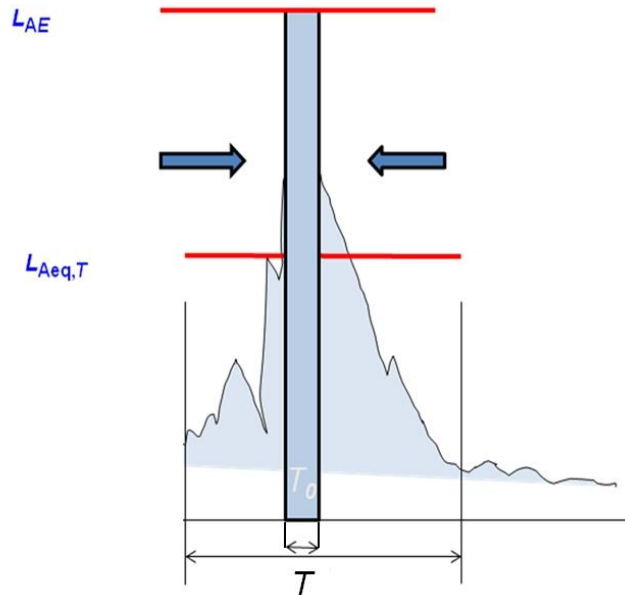
Pro odvození podmínek směrodatného leteckého provozu v charakteristickém letovém dni se vyžadují tyto údaje a o leteckém provozu, nejlépe jako průměry za poslední 1 rok:

- Celkový počet vzletů a přistání během 1 roku
- Z toho celkový počet vzletů a přistání v nočním době za rok
- Charakteristická skladba kategorií nebo typů letadel členěných dle jejich maximální vzletové hmotnosti, typu pohonu, a počty vzletů a přistání letadel jednotlivých kategorií (ve formě celkových počtů nebo jejich procentuálního zastoupení)
- Celkový počet vzletů a odletů během letní sezóny v noci a ve dne
- Případně další údaje o možných anomáliích z normálního provozu, např: pořádání leteckého dne

3.4 Hladinová expozice zvuku LAX

Neboli také hluková zátěž je dalším parametrem charakterizující reálný průběh zvukové události. Dochází zde však k jiné úpravě energetického průběhu oproti úpravě na ekvivalentní hladinu zvuku. Pro získání hladinové expozice zvuku je třeba energii celé zvukové události komprimovat do časového úseku. Obvykle se pro usnadnění práce s těmito hodnotami jedná o čas jedné sekundy. Je to tedy obdoba ekvivalentní hladiny zvuku, nicméně se nevztahuje k času reálné události, ale je

komprimována do doby jedné vteřiny. Princip je zobrazen na obrázku číslo 11, kde je vidět porovnání mezi ekvivalentní hladinou zvuku s časem zvukové události a hladinou zvukové expozice s časem 1 s [1].



Obr. 11 – Hladinová expozice zvuk [17]

Matematicky lze hladinovou expozici zvuku vyjádřit následujícím vztahem [1]:

$$L_{AX} = 10 \log \frac{1}{t_0} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt$$

kde t_0 je 1 vteřinový referenční časový interval

3.5 Maximální hladina akustického tlaku L_{Amax}

Maximální hladina je jednou ze zaznamenávaných hladin přeletu letadla v okolí měřící stanice. Jedná se o maximální hodnotu časově proměnné hlukové události, která je hodnotou nejvyššího bodu časového průběhu na obrázku číslo 9.

3.6 Distribuční procentní hladiny akustického tlaku

V případech, kdy jsou požadovány podrobnější výsledky měření, se často využívají distribuční hladiny akustického tlaku. Obecné značení pro takovéto hladiny je L_X , kde hodnota X (%) nabývá hodnot 1 až 99. Hodnota procentní akustické hladiny vyjadřuje hodnotu akustického tlaku, která byla

překročena v X procentech časového intervalu měření. Pomocí distribuční hladiny akustického tlaku lze třídit hlukovou zátěž přesněji než pomocí maximální nebo ekvivalentní hladiny akustického tlaku. Při měření leteckého hluku se využívá hodnota distribuční hladiny 90, popřípadě i 95 a 80 [3].

3.7 Všeobecné požadavky pro měření leteckého hluku

Tyto požadavky se vztahují na měření hluku způsobeného leteckou dopravou za účelem zjištění ekvivalentní hladiny hluku a jejím porovnáním s hygienickým limitem, nikoli pro měření, kterým se tato diplomová práce zabývá. Proto budou data v této práci zpracována i v extrémních podmínkách, které nesplňují všeobecné meteorologické požadavky pro měření.

Všeobecné požadavky jsou určeny pro měření výhradně leteckého hluku, s vyloučením hlukových událostí, které jsou způsobeny jinými zdroji. Do letového provozu se započítává i hluk z pojíždějících letadel vlastní silou, která však v měření a zpracování dat nejsou zastoupena. Hlukové události, jako tranzitní přelety letadel ve vzdušném prostoru, který nesouvisí se zájmovým letištěm, jsou součástí tzv. zbytkového hluku prostředí, respektive hluku pozadí. Technické testy motoru na zkušebním zařízení, chod pomocných energetických jednotek, motorové zkoušky letadel a jiné, se hodnotí jako hluk ze stacionárního zdroje a nehodnotí se jako limit charakteristického letového dne. Měřením se posuzuje pouze hluk, který vystoupí nad ostatní hlukové události a je vyvolaný leteckým provozem [15].

Měřicí přístroje a kalibrátory musí splňovat požadavky stanovené ČSN EN pro zvukoměry (ČSN IEC 651 Zvukoměry, ČSN EN 60804 6A2, Elektroakustika – Integrovaní-průměrující zvukoměry, ČSN EN 61260 Elektroakustika – Oktávové a zlomkooktávové filtry) a kalibrátory (ČSN EN 60942 Elektroakustika – Akustické kalibrátory) a současně musí držet platné meteorologické osvědčení. Preferovaná třída zvukoměru je 1., avšak 2. třída je též akceptovatelná. Poloha mikrofonu, kterým je zaznamenávána hluková událost, by měla být ve výšce 1,2 až 1,5 metru nad zemí v případě měření v chráněném venkovním prostoru. Tedy ve venkovním prostoru, kde se nenachází zastavěné pozemky, které jsou využívány ke sportovní činnosti, rekreaci, výuce, případně léčení. Z těchto prostorů jsou vyňaty lesní a zemědělské pozemky a venkovní pracoviště. V případě, kdy měření probíhá v chráněném venkovním prostoru staveb, tedy v prostoru do 2 metrů od budov bytových a rodinných domů, staveb pro školní a předškolní výchovu, staveb pro zdravotní a sociální účely a současně všech obdobných budov, umísťuje se měřicí mikrofon do výšky 1,2 až 1,5 metru nad úrovní příslušného podlaží a ideálně 2 metry od fasády, nejméně však na vzdálenost 1 metru. Osa největší citlivosti mikrofonu se staví do polohy, kdy směřuje do prostoru, kterým se předpokládá

průlet monitorovaného leteckého provozu. Pokud trajektorie leteckého provozu není známá, staví se do polohy kolmo vzhůru. Mikrofon ani zvukoměr během měření nesmí být vystaven vlivům, které ovlivňují jeho měřicí schopnost, např.: chlad, vlhkost, vibrace. Z tohoto důvodu musí být mikrofony chráněny krytem, který především eliminuje vliv větru na měření [15].

3.7.1 Atmosférické podmínky pro měření leteckého hluku

Tak jak se tato práce zabývá vlivem meteorologických podmínek na šíření hluku z letecké dopravy, musí být stanoveny určité extrémní meteorologické podmínky, při kterých již měření hygienických limitů není objektivní vlivem velkého útlumu nebo naopak vlivem velkého zesílení hluku. V této práci však nejde o měření hlukového limitu, ale naopak právě o zjištění, jakým způsobem se i tyto extrémní podmínky podílejí na přenosu hluku z letecké dopravy. Každá měřicí stanice je vybavena vlastní automatickou meteorologickou stanicí, která sleduje níže zmíněné venkovní podmínky a následně je páruje s jednotlivými hlukovými událostmi. Podmínky, které musí být splněny, aby vyhovovaly pro měření leteckého hluku, jsou [15]:

- rychlost větru musí být nižší než 5 m/s
- okolní teplota nižší než +30°C
- součin teploty vzduchu (°C) a relativní vlhkosti (%) vyšší než 500
- žádné srážky

Dále musí být brán zřetel i na povrch v okolí měřicí stanice. Tento povrch nesmí vykazovat zvýšené tlumící popřípadě odrazivé vlastnosti. Takovým povrchem je například sněhová pokrývka, popřípadě zmrzlý povrch, povrch pokrytý ledem nebo nasáklý velkým množstvím vody. Dále měření nesmí být prováděno při výskytu teplotní inverze (např. v ranních hodinách) [15].

3.7.2 Místa měření

Lokace provádění měření v chráněném venkovním prostoru staveb a v chráněném venkovním prostoru musí být vybrána s ohledem na požadavky standartu ČSN ISO 1996 – Popis a měření hluku prostředí; část 1: základní veličiny a postupy, ČSN ISO 1996 – 2 Popis a měření hluku prostředí; Část 2: Získání údajů souvisejících s využitím území a ČSN ISO 1996 – 3 Popis a měření hluku prostředí; Část 3 – Použití při stanovení nejvyšších přípustných hodnot hluku a metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí vydaného Ministerstvem zdravotnictví [15].

Výše uvedené normy stanovují požadavek na okolí měřicí stanice, kdy v okolí 5 metrů musí povrch země vykazovat střední pohltivé účinky (např. tráva). Nedoporučují se tvrdé povrchy jako beton nebo asfalt. V okolí nejméně 3,5 metru od mikrofonu snímače nesmí být žádné velké pohltivé nebo odrazivé překážky, s výjimkou zemského povrchu. Tento stejný požadavek platí i pro kužel s vrcholovým úhlem nejméně 160° a jeho osou směřující kolmo vzhůru [15].

Za vhodný výběr místa pro měření leteckého hluku se pokládá poloha vůči letišti a jeho vzletovým a přistávacím drahám, kde je možné jednoznačně určit, zda hluková událost představuje vzlet nebo přistání leteckého provozu. Data naměřená v místech, která jsou ovlivněna provozem více drah, se následně musí složitěji zpracovávat. Současně je nutno vedle standartních informací zaznamenávat i jiná data pro možnost rozlišení jednotlivých událostí [15].

Odečet hodnot každé hlukové události obvykle začíná v momentě, kdy hluk letadla začne převyšovat okolní hluk a končí, když opět klesne pod úroveň hluku pozadí. Může ovšem být požadován i jiný limit počátku měření, jako například moment, kdy letecký hluk překoná hladinu např. 40 dB. Čas zahájení a ukončení záznamu hluku nemá na výsledek měření hladin expozice zvuku téměř žádný vliv, pokud zrovna nedochází k měření letecké hlukové události, zvukoměry měří hluk pozadí. Místo, kde se měření hluku provádí, musí být situováno tak, aby byl hluk pozadí alespoň o 20dB nižší, než maximální hodnoty jednotlivých hlukových událostí. Hluk pozadí se zde hodnotí stejnými deskriptory, jaké jsou používány pro hodnocení leteckého hluku. Používá se však i hodnocení pomocí hladiny L_{90} [1].

4 Popis systému měření hluku v okolí LKPR

Kapitola číslo 4 se zabývá konkrétním systémem, kterým byla data, jež jsou vyhodnocována v této diplomové práci, naměřena. Letiště Praha se po vzoru velkých letišť, jako na příklad Londýn Heathrow, San Francisco, Amsterdam, Sydney, Hong Kong Miami, Washington DC a zhruba 130 dalších, rozhodlo k vybudování celku sledující jednotlivé trasy přilétávajících a odlétávajících letadel (NTMS - Noise and Track Monitoring System), a měření a zpracování naměřených dat pomocí systému ANOMS 9 (Advanced Noise and Operations Monitoring System). Tato soustava měřících stanic a softwarů, provozovaná akreditovanou zkušební laboratoří MaREXCOM, je v okolí pražského letiště budována od roku 2008. Firma MaREXCOM takto naměřená data zpracovává a poskytuje pracovníkům v odboru životního prostředí Letiště Praha v uživatelském rozhraní.

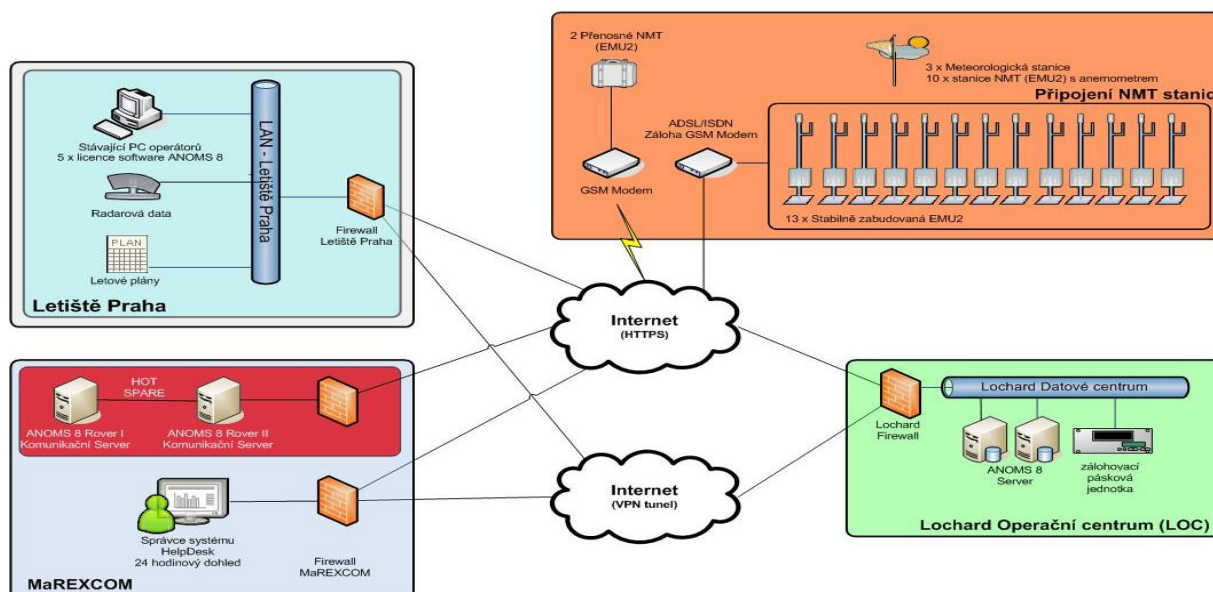
Pomocí tohoto systému je kontrolováno dodržování hygienické normy České republiky a zároveň je s jeho pomocí vytvářena hluková mapa s jednotlivými izofónami, tedy čarami o stejné hodnotě akustického tlaku, znázorňující hlukové zatížení okolí letiště [18][19].

4.1 Noise and Track Monitoring System (NTMS)

Jedná se o velice sofistikovaný a navzájem propojený celek jednotlivých hlukových měřících stanic. Systém páruje radarová data společně s přístupem do databáze letových plánů podaných na lety na LKPR, poskytnutá od ŘLP, s jednotlivými hlukovými událostmi. Dále z důvodu nutnosti znát aktuální meteorologické podmínky v době měření, je tento systém propojen s meteorologickými stanicemi, které jsou přidruženy k měřícím stanicím. Celkově se tak měřící systém v okolí pražského letiště sestává z následujících částí [16]:

- 13 stacionárních měřících stanic EMU2 (Environment Monitoring Unit)
- Těmto stanicím přidružené automatické meteorologické stanice
- 2 mobilní měřící stanice
- Pracovní terminály operátora Letiště Praha, a. s.
- Operační středisko společnosti MaREXCOM a firmy BRÜEL & KJÆR (výrobce systému)
- Hardware a software pro zpracování a přenos naměřených dat (ANOMS 9)

Celé schéma měřicího systému, dodávaného firmou BRÜEL & KJÆR je na obrázku číslo 12.



Obr. 12 – Schéma Měřicího a detekčního systému [20]

4.2 Detekce leteckého hluku

Z důvodu, že měřicí stanice monitorují hluk kontinuálně, a tím pádem zaznamenávají i hluk pocházející z jiných zdrojů než leteckých, je potřeba letecký hluk vyselektovat. Tato selekce probíhá jednak na základě radarových dat, tak na základě tzv. detekčního algoritmu.

Nejprve selekce hlukové události probíhá na úrovni detekčního algoritmu. Poté, co software vyhodnotí, že algoritmus je shodný s algoritmem hluku z letecké dopravy, dochází k dalšímu ověřování a párování dat.

Detekční algoritmus je znázorněn na obrázku číslo 14. Systém měřící letecký hluk, nazývaný EMU2 (Environment Measuring Unit 2) monitoruje okolní hluk konstantně. Tento systém je schopen rozlišit jakého původu je hluk na základě interně uloženého algoritmu. Příklady algoritmů různých druhů dopravy je zobrazen na obrázku číslo 13.

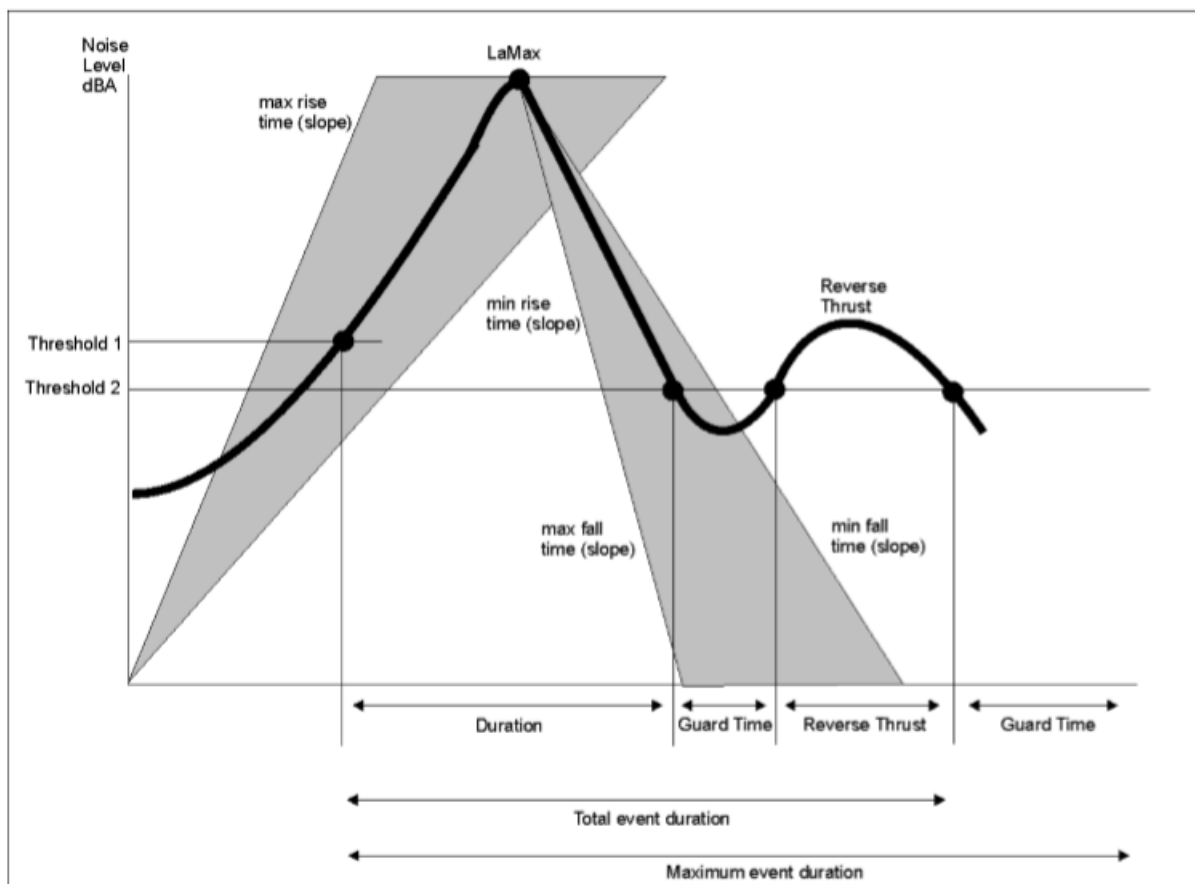


Obr. 13 – Hlukové charakteristiky různých druhů dopravy [20]

Samotná detekce probíhá následovně. Všechny hluky, který nepřekročí hranici Treshold 1 je zcela ignorován, a dále se s ním již nepracuje. Všechny hluky, překračující úroveň hladiny Treshold 1 je považován za potencionální hluk z leteckého provozu a zaznamenává se. V momentě překročení hladiny Treshold 1 je zaznamenán čas, který je začátkem hlukové události. Dále se zaznamená čas, kdy je hladina akustického tlaku na svém maximu. Následně akustický tlak klesá, dokud se neocitne pod úrovní Treshold 2. V tomto momentu se začíná odpočítávat takzvaný Guard Time, jehož délka je nastavitelná. Pokud během tohoto času akustický tlak nepřekročí úroveň Treshold 2, například jako důsledek použití zpětného tahu motorů, zapíše se jako čas hlukové události okamžik klesnutí akustického tlaku pod Treshold 2. V případě vystoupení akustického tlaku nad Treshold 2 během času Guard Time, prodlouží se doba trvání hlukové události o čas, který je akustický tlak nad hladinou Treshold 2. Čas Guard Time zajišťuje, že v důsledku nenadálého poklesu akustického tlaku pod Treshold 2 nebude měření ukončeno. Proces detekčního algoritmu také sleduje strmost stoupání akustického tlaku v čase, která musí odpovídat limitní obálce v obrázku znázorněné šedou barvou [20].

Úrovně hodnot Treshold 1 a 2 se nastavují v závislosti na intenzitě hluku pozadí, společně s rozměry limitní obálky. Délka času Guard Time je závislá na používání zpětného tahu motorů. Tyto úrovně mohou být nastaveny různě pro různé denní doby, což je systém schopen provádět automaticky [20].

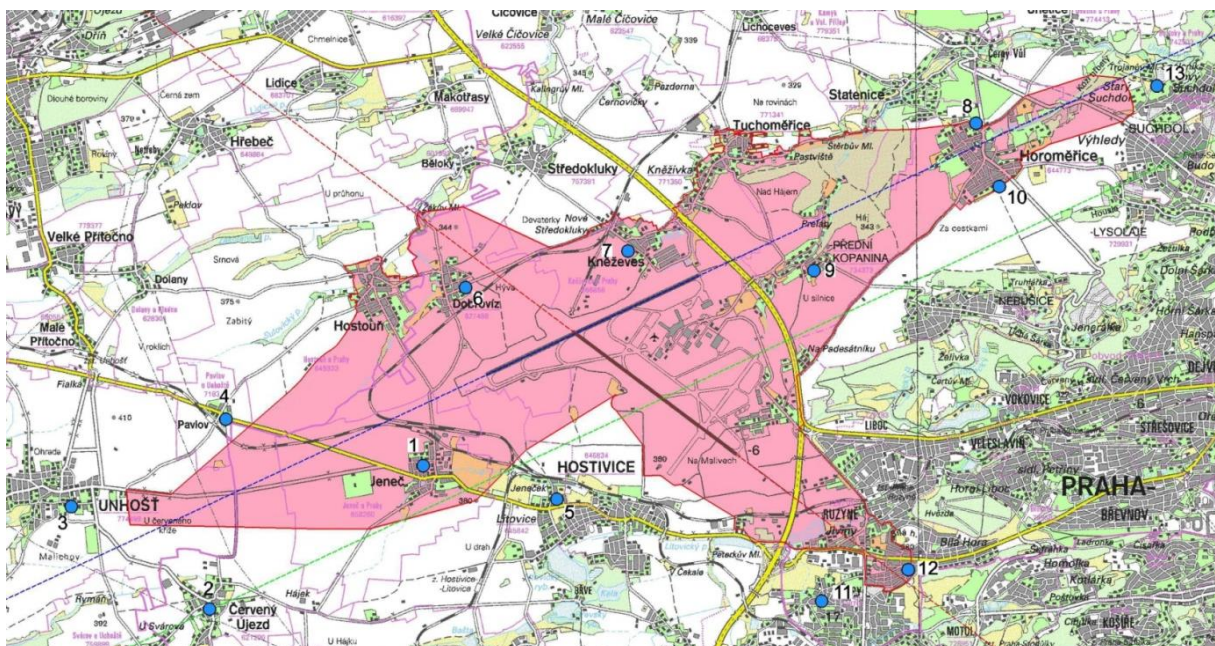
V případě, že vlastnosti hlukové události vyhovují algoritmu, dochází k radarovému párování s daným letadlem. V této fázi je k detekované hlukové události hledán příslušný radarový záznam. Zde se hlídá několik podmínek (přesný algoritmus je chráněn), ale velmi zjednodušeně řečeno se hledá letadlo, které je v době L_{max} události nejbližší k monitorovací stanici. Jiné hlukové události pak spadnou do kategorie neleteckých událostí.



Obr. 14 – Detekce leteckého hluku [20]

4.2.1 Měřicí stanice

Měřící celek sestává z celkem 13 stacionárních stanic rozmístěných v okolí prodloužených os jednotlivých vzletových a přistávacích drah pražského letiště. Jejich primární účel je monitorovat dodržování hygienických limitů. Hygienický limit pro denní dobu je $L_{AeqD} = 60\text{dB}$ a pro noční dobu $L_{AeqD} = 50\text{ dB}$. Tyto limity musí být dodržovány mimo ochranné hlukové pásmo, které je společně s rozmístěním jednotlivých stanic znázorněno na obrázku číslo 15 [21].



Obr. 15 – Ochranné hlukové pásmo + rozmístění měřících stanic [16]

Jednotlivé stanice dle čísel na obrázku 15 jsou následující [16]:

1. Jeneč
2. Červený Újezd
3. Unhošť
4. Pavlov
5. Hostivice
6. Dobrovíz
7. Kněževs
8. Horoměřice – střed obce
9. Přední Kopanina
10. Horoměřice – JV okraj
11. Řepy
12. Bílá Hora
13. Suchdol

Dále je hluk měřen pomocí dvou mobilních měřících stanic. Data z těchto stanic v této diplomové práci nejsou zpracovávána, a proto se práce popisem těchto stanic nezabývá.

Každá měřící stanice se skládá z aparátu pro měření hluku (EMU), a svoji automatickou meteorologickou stanicí [20].

4.2.2 Enviroment Monitoring Unit

Enviroment Monitoring Unit, nazýváno také jako EMU 2, vyráběné firmou BRÜEL & KJÆR, je měřící zařízení zaznamenávající a zpracovávající hluk v systému měření hluku na LKPR. Zařízení využívá digitálního mikrofónu, který vlastním zařízením provádí až 4krát denně kontrolu kalibrace tak, aby bylo dosaženo vyrovnaných výsledků [20]. Technické parametry EMU 2 vyjadřuje tabulka číslo 3[20]:

Norma	IEC 61672-1-1 Class 1 ICAO Annex 16, IEC 3891
Provozní teploty	-40°C...50°C

41 DM-2 Mikrofón

Norma	IEC 61672-1-1, Class 1 ANSI S1.4-1983, Typ 1 IEC 60651 IEC 60804
vzorkovací frekvence	48 kHz
Data word	23 bit
Maximální SPL	140 dB
Teplotní rozsah	-40°C...50°C

Zvukový analyzátor

Certifikace	IEC 61672-1-1, Class 1 IEC 60651 IEC 60804 IEC 61260 ANSI S1.4-1983, Typ 1
Měření	
Rozlišení	0,1 dB
Rozsah měření	25 až 14 dB SPL bez změny rozsahu
Měřicí interval	0,5-1,0 s
Vážení frekvencí	A, C a Z současně
Časové vážení	S, F, I a vrcholové současně
Širokopásmové metriky	Lx,y , LAI , Lcpk , LZI, LxEQ 31 frekvenčních pásem: 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800 (Hz) 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4.0, 5.0, 6.3, 8.0, 10.0, 12.5, 16.0 (kHz)
Třetinové oktávy	

Tabulka č. 2 - Technické parametry EMU 2 [20]

4.2.3 Meteorologické stanice

Každá měřicí stanice je vybavena vlastní meteorologickou stanicí pro měření aktuálních meteorologických podmínek. Ve většině případů se již využívají novější Vaisala WXT-520, která nahradili starší model Vaisala WXT-510. Vaisala WXT-520 je znázorněna na obrázku číslo 16 [20].



Obr. 16 – Vaisala WXT-510 [20]

Technické parametry meteorologické stanice [20]:

Tabulka č. 3 - Vaisala WXT-510 [20]

Vítr

Rychlost větru

Rozsah	0...60m/s
Minimální čas rozpoznání	0,25s
Přesnost	větší z $\pm 0,3\text{m/s}$ nebo $\pm 2\%$
Výstupní rozlišení	0,1 m/s (km/h, mph, uzly)
Dostupné jednotky	m/s, km/h, mph, uzly

Směr větru

Azimut	0...360°
Minimální čas rozpoznání	250 ms
Přesnost	$\pm 2^\circ$
Výstupní rozlišení	1°

Úhrn srážek

Dešťové srážky

Sběrná plocha	60 cm ²
Výstupní rozlišení	0,01mm (0,0001 in)
Přesnost	5%
Dostupé jednotky	mm, in

Délka trvání srážek

Výstupní rozlišení	10 s
--------------------	------

Intenzita srážek

Rozsah	0...200 mm/h
Výstupní rozlišení	0,1mm/h (0,01 in/h)
Dostupné jednotky	mm/h, in/h

Kroupové srážky

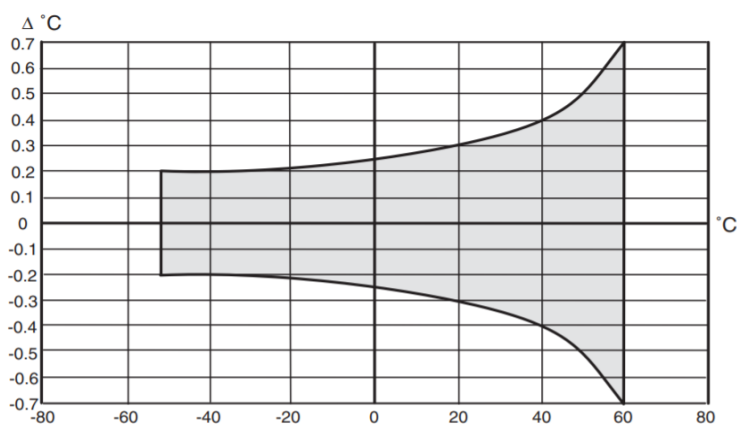
Výstupní rozlišení	0,1 nárazu/cm ² (náraz/in)
Dostupné jednotky	náraz/cm ² , náraz/in ²

Barometrický tlak

Rozsah	600...1100hPa
Přesnost	±0,5hPa při 0...+30°C 1hPa při -52...60°C
Výstupní rozlišení	0,1hPa, 10Pa, 0,0001bar
Dostupné jednotky	hPa, Pa, bar, mmHg, inHg

Teplota

Rozsah	-52...+60°C (-60...+140°F)
Přesnost v celém rozsahu	



Výstupní rozlišení	0,1°C (0,1°F)
Dostupné jednotky	°C, °F

Relativní vlhkost

Rozsah	0...100%RV
Přesnost	±3%RV v rozsahu 0...90%RV ±5%RV v rozsahu 90...100%RV
Výstupní rozlišení	0,10% RV - Relativní Vlhkost

Interval aktualizace PTU

Interval aktualizace	3...3600s (=60min)
----------------------	--------------------

5 Metody zpracování dat

5.1 Regresní analýza

Účelem regresní analýzy je snaha o zjištění vztahů mezi několika nezávislými nebo predikovanými proměnnými hodnotami. Při provádění této analýzy je snaha proložit množinou bodů, reprezentující jednotlivé proměnné hodnoty, přímkou, která vyjadřuje závislost obou proměnných. Přímka je do množiny bodů vkládána tak, aby součet jednotlivých hodnot odchylek bodů od této přímky na druhou byl co nejmenší. Takto vložená přímková závislost následně může být popsána pomocí rovnice, kdy její tvar je následující:

$$y = a + bX$$

kde y je hledaná proměnná, a je koeficient označující konstantní posunutí křivky, b je koeficient udávající strmost proložené přímky, neboli regresní koeficient, a X je samotná proměnná. Pokud je hledaná veličina závislá na více proměnných, nemůže být celá závislost zobrazena v 2D prostorovém grafu, ale celá regrese se provádí na stejném principu a jejím výsledkem je rovnice s více proměnnými.

$$y = a + b_1X_1 + b_2X_2$$

V této rovnici reprezentují regresní koeficienty nezávislé příspěvky každé nezávislé proměnné na predikci závislé proměnné, tedy y . Dalším způsobem jak vyjádřit tuto skutečnost, je zapotřebí si určit, že například proměnná X_1 koreluje s proměnnou Y po kontrole všech ostatních nezávislých proměnných. Tento typ korelace je také označován jako částečná korelace. Nalezení matematické závislosti mezi různými proměnnými však neznamena dokonalou schopnost předpovídat závislé hodnoty y . Důvodem jsou rezidua hodnot, které zapříčiňují odchylky od tohoto matematického modelu.

Vhodnost a přesnost nalezeného matematického modelu určuje koeficient korelace r . Hodnoty tohoto koeficientu se pohybují mezi 0 a 1. Tento koeficient se vyjadřuje jako:

$$r = 1 - \text{rezidua}$$

Pokud jsou rezidua vysoká, způsobují nízké hodnoty koeficientu r . Tedy nejlepší model, který reprezentuje závislost veličin naprosto přesně, bude mít hodnotu $r = 1$. Model, ve kterém se nachází příliš mnoho nepřesností a závislosti mezi veličinami neodpovídá, bude mít hodnotu $r = 0$. Reálné hodnoty koeficientu r se pohybují mezi těmito dvěma extrémy. [22]

5.1.1 Korelační matice

Korelační matice slouží k posouzení vzájemné závislosti několika proměnných v jednom kroku a je zobrazená ve formě matice. Závislé proměnné jsou v matici čitelné tak, že vykreslenou množinou bodů lze proložit přímkou. Závislost těchto proměnných je popsána korelačním indexem, jehož hodnoty nabývají hodnot od -1 do +1, kdy -1 vyjadřuje nepřímo úměrnou závislost a +1 znamená přímou úměru dvou proměnných. [23]

5.2 Regresní stromy (classregtree)

Metoda stromů je využívána pro predikci jedné závislé proměnné buď lineárně, nebo kategoricky na více nezávisle proměnných.

Regresní strom je vytvářen tak, že jeho hlavní kmen je tvořen závislou proměnnou, kterou se snažíme predikovat, a která závisí na několika nezávisle proměnných. Tyto proměnné nesmí být kolineární, což by později způsobovalo velké problémy při interpretaci této analýzy. Proměnné musí být nejméně 2 a každá z nich by měla vytvářet jednu větev dělení stromu. Každá větev stromu reprezentuje určitou proměnnou a její charakteristiku. Charakteristika každé větve může být buď spojitě se měnící proměnná (v případě této diplomové práce například vlhkost vzduchu), nebo kategorická (například typ letadla vytvářející hluk). Cílem tohoto modelu je vytvořit soubor logických podmínek if-then, které umožní přesné předpovědi nebo klasifikaci cílové proměnné.

Jako výstup lze pak použít graf, znázorňující, která proměnná byla kolikrát použita ke kategorizaci stromu, tedy, jak moc byla důležitá při modelování sledované závislé hodnoty. [24] Tohoto je v programu R Matlab 2013a docíleno funkcí nazvanou varimportance.

5.2.1 Korelační diagram (Scatterplot)

Korelační diagram je využíván k ověření vytvořeného modelu. Do tohoto diagramu jsou na jednu osu vyneseny hodnoty predikované modelem a na druhé ose jsou hodnoty popisující reálnou situaci. Pokud model popisuje reálnou situaci správně, nastane vykreslení lineární závislosti ve tvaru $Y_{\text{reálné}} = Y_{\text{predikované}}$, tedy přímkou procházející. V případě nesprávnosti modelu se nebudou hodnoty reálné rovnat predikovaným a přímková závislost nebude z diagramu patrná. [25]

5.3 ROC (Receiver Operating Characteristic) křivka

Receiver Operating Characteristic je křivka, sloužící k vyjádření poměru mezi specificitou a senzitivitou modelu nebo testu, který hodnotí a pomáhá ho upravovat.

Senzitivita je poměr správně pozitivních pozorování ku všem pozitivním případům (jaký podíl skutečných případů test zachytí).

Specificita je poměr správně negativních pozorování ku všem negativním případům (jaký podíl negativních případů test správně vyloučí).

Celý problém modelování spočívá v tom, jakým způsobem jsou vyhodnocována data v posuzovaném modelu a zda model odhalil hledané podmínky, kdy měl (True Positive), kdy způsobil planý poplach (True Negative), kdy hledané podmínky neodhalil (False Negative), a kdy správně situaci označil jako bez hledaných podmínek (True Positive). Celá situace je zobrazena na obrázku číslo 17.

	Hledané podmínky jsou nepřítomné	Hledané podmínky jsou přítomné
Negativní výsledek	True Negative	False Negative
Pozitivní výsledek	False Positive	True Positive

Obr. 17 – Klasifikace vyhodnocených informací [26]

Dá se říci, že vytvořený model je užitečnější při vyšší senzitivě a specificitě. Nastavováním limitních hodnot dochází k hledání kompromisu na ROC křivce mezi množstvím falešně pozitivních a falešně negativních signálů modelu, neboli ke kompromisu mezi senzitivou a specificitou. Na svislé ose souřadnicového systému se při vytváření ROC křivky vynášejí hodnoty True Positive, zatímco na vodorovnou osu se vynášejí hodnoty False Positive.

Ideální ROC křivka nejprve strmě stoupá, tedy množství správně klasifikovaných podmínek je rovno 100% zatímco míra chyb je 0%, a teprve pak roste míra falešně detekovaných pozitivních událostí. V případě, kdy se ROC křivka podobá úhlopříčce, dochází s přírůstkem správně identifikovaných

událostí i k zvyšování nesprávně identifikovaných událostí. Tedy každé zlepšení senzitivity způsobuje zhoršení specificity a model není správně navržen. Jinak řečeno kvalita modelu je vyjadřována pomocí plochy pod ROC křivkou, kdy čím vyšší hodnota, tím vyšší senzitivita a lepší selektivita. [27]

6 Výsledky zpracování dat

Data pro zpracování byla poskytnuta Letištěm Praha, a.s., a obsahují následující informace:

- vzletovou a přistávací dráhu, na kterou zachycené letadlo provádělo přiblížení
- druh zachyceného letounu
- poloha stanice, na které bylo letadlo detekováno + datum a čas hlukové události
- ekvivalentní hladinu zvuku L_{Aeq} , maximální hodnotu hluku dané události a hodnoty hladinové expozice hluku L_{AX}
- Dobu trvání hlukové události
- horizontální a šikmou vzdálenost prolétávajícího letadla od měřicí stanice, a jeho výšku v době, kdy byla dosažena hodnota maximálního akustického tlaku
- relativní vlhkost vzduchu
- teplotu
- tlak
- směr a sílu větru

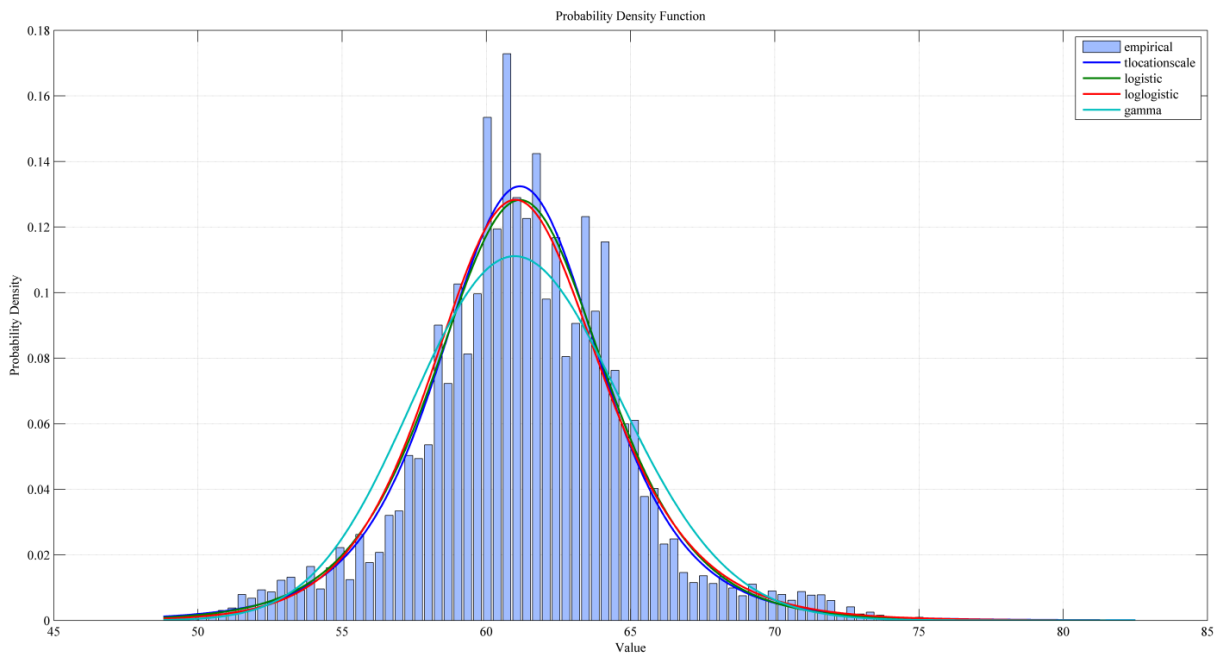
Vzorek těchto dat je pro představu zobrazen na obrázku číslo 18. Tato data Odbor životního prostředí na letišti v Praze dále zpracovává a přepočítává na výslednou ekvivalentní hladinu zvuku způsobem, který je vysvětlen v kapitole číslo 3. Následně takto zpracovaná data mohou být porovnávána s hygienickým limitem určeným pro Českou republiku, nikoli data zde zobrazená.

Date Time	Runway	Aircraft Type	Operation Number	Correlation Index	Location	Start Date Time	Max Date Time	Leg	Max Lev	SEL	Slo	Wind Spet	Wind Dire
01.01.2017 1:06 A	24	A319	3114988	5845884	Suchdol	01.01.2017 1:02	01.01.2017 1:02	61,6	67,7	77,9	77,9	1,7	338
01.01.2017 9:47 A	24	B739	3115043	5845906	Suchdol	01.01.2017 9:44	01.01.2017 9:44	66,7	72,4	82,5	82,5	1,1	248
01.01.2017 10:42 A	24	B738	3115052	5845988	Suchdol	01.01.2017 10:39	01.01.2017 10:39	65,4	71	80,9	80,9	2,6	90
01.01.2017 11:21 A	24	A319	3115075	5845994	Suchdol	01.01.2017 11:18	01.01.2017 11:18	65	70,2	79,6	79,6	1,1	135
01.01.2017 15:20 A	24	A319	3115229	5846004	Suchdol	01.01.2017 15:16	01.01.2017 15:17	65,1	71,9	80	80	2	0
01.01.2017 15:54 A	24	A319	3115251	5846017	Suchdol	01.01.2017 15:51	01.01.2017 15:51	64,6	69,5	79,4	79,4	2	338
01.01.2017 16:19 A	24	AT45	3115272	5846020	Suchdol	01.01.2017 16:16	01.01.2017 16:16	60,6	63,9	74,4	74,4	1,5	315
01.01.2017 16:22 A	24	A319	3115271	5846022	Suchdol	01.01.2017 16:19	01.01.2017 16:19	64,8	69,9	79,8	79,8	1,3	338
01.01.2017 16:37 A	24	AT75	3115269	5846026	Suchdol	01.01.2017 16:35	01.01.2017 16:35	62,4	65,8	75,6	75,6	1,8	338
01.01.2017 16:40 A	24	AT75	3115267	5846026	Suchdol	01.01.2017 16:37	01.01.2017 16:37	63,4	66,6	76,4	76,4	1,1	338
01.01.2017 16:44 A	24	A319	3115263	5846027	Suchdol	01.01.2017 16:41	01.01.2017 16:41	64,4	69,7	79,2	79,2	1,1	338
01.01.2017 16:59 A	24	A319	3115278	5846033	Suchdol	01.01.2017 16:57	01.01.2017 16:57	64,9	70	79,7	79,7	0,9	338
01.01.2017 17:10 A	24	AT75	3115301	5846040	Suchdol	01.01.2017 17:07	01.01.2017 17:07	61,7	64,7	76	76	1,1	338
01.01.2017 17:15 A	24	B737	3115293	5846043	Suchdol	01.01.2017 17:12	01.01.2017 17:12	65,4	69,8	80,3	80,3	1	90
01.01.2017 17:19 A	24	A333	3115295	5846046	Suchdol	01.01.2017 17:16	01.01.2017 17:16	66	70,4	81,4	81,4	1,2	338
01.01.2017 17:23 A	24	B739	3115300	5846049	Suchdol	01.01.2017 17:20	01.01.2017 17:20	64,6	69,5	79,9	79,9	1,1	338
01.01.2017 17:32 A	24	AT75	3115296	5846054	Suchdol	01.01.2017 17:29	01.01.2017 17:29	61,6	63,9	74,8	74,8	1	90
01.01.2017 17:56 A	24	A319	3115303	5846059	Suchdol	01.01.2017 17:54	01.01.2017 17:54	64,8	69,7	78,4	78,4	0,9	0
01.01.2017 17:56 A	24	A319	3115303	5846059	Suchdol	01.01.2017 17:54	01.01.2017 17:54	64,8	69,7	78,4	78,4	0,9	0
01.01.2017 17:56 A	24	A319	3115303	5846059	Suchdol	01.01.2017 17:54	01.01.2017 17:54	64,8	69,7	78,4	78,4	0,9	0
01.01.2017 18:05 A	24	B738	3115318	5846079	Suchdol	01.01.2017 18:02	01.01.2017 18:03	67,1	71,6	81,4	81,4	1,2	0
01.01.2017 18:29 A	24	B739	3115328	5846088	Suchdol	01.01.2017 18:26	01.01.2017 18:27	65,4	69,5	79,8	79,8	0,9	248
01.01.2017 19:18 A	24	C680	3115344	5846105	Suchdol	01.01.2017 19:15	01.01.2017 19:15	59,7	62,2	72,3	72,3	1,5	45
01.01.2017 21:02 A	24	AT45	3115387	5846115	Suchdol	01.01.2017 20:59	01.01.2017 20:59	60,8	63,7	74,5	74,5	0,5	113
01.01.2017 21:17 A	24	A319	3115395	5846120	Suchdol	01.01.2017 21:14	01.01.2017 21:14	66,2	70,6	81,7	81,7	1	203
01.01.2017 21:24 A	24	A319	3115384	5846122	Suchdol	01.01.2017 21:21	01.01.2017 21:21	64,1	68,9	79,6	79,6	0,8	225
01.01.2017 21:30 A	24	AT75	3115393	5846124	Suchdol	01.01.2017 21:27	01.01.2017 21:27	63,2	67,8	77,5	77,5	1,1	203
01.01.2017 21:35 A	24	AT75	3115401	5846126	Suchdol	01.01.2017 21:33	01.01.2017 21:33	63,8	68,4	77,7	77,7	0,8	338
01.01.2017 21:44 A	24	A319	3115394	5846128	Suchdol	01.01.2017 21:41	01.01.2017 21:41	66,2	71,5	82	82	0,9	113
01.01.2017 22:06 A	24	A319	3115414	5846167	Suchdol	01.01.2017 22:03	01.01.2017 22:03	64,4	70,4	82,1	82,1	1	158
01.01.2017 22:21 A	24	A319	3115405	5846176	Suchdol	01.01.2017 22:18	01.01.2017 22:18	64,5	71,7	81,6	81,6	1,7	315
01.01.2017 22:26 A	24	AT45	3115426	5846179	Suchdol	01.01.2017 22:22	01.01.2017 22:23	60,7	65,3	77,3	77,3	0,8	248
01.01.2017 22:35 A	24	A319	3115411	5846185	Suchdol	01.01.2017 22:32	01.01.2017 22:32	63,7	70,1	80,8	80,8	1	248
01.01.2017 22:38 A	24	B737	3115410	5846186	Suchdol	01.01.2017 22:35	01.01.2017 22:35	64,5	70,3	81	81	0,9	113
01.01.2017 23:08 A	24	A319	3115428	5846153	Suchdol	01.01.2017 23:05	01.01.2017 23:05	64,6	71,5	82	82	0,8	270
01.01.2017 23:40 A	24	B738	3115439	5846160	Suchdol	01.01.2017 23:38	01.01.2017 23:38	64,4	71,3	81,5	81,5	1	90
02.01.2017 0:13 A	24	AT75	3115451	5846161	Suchdol	02.01.2017 0:10	02.01.2017 0:10	60,9	66,8	78,3	78,3	1	158
02.01.2017 0:40 A	24	B738	3115444	5846166	Suchdol	02.01.2017 0:37	02.01.2017 0:38	65,3	71,4	82,2	82,2	1,1	338
02.01.2017 0:44 A	24	B738	3115445	5846168	Suchdol	02.01.2017 0:40	02.01.2017 0:41	64,2	71,1	80,4	80,4	1	248
02.01.2017 1:28 A	24	B738	3115456	5846192	Suchdol	02.01.2017 1:25	02.01.2017 1:25	63,2	70,7	81,2	81,2	1,4	338
02.01.2017 6:02 A	24	AT75	3115477	5846202	Suchdol	02.01.2017 5:59	02.01.2017 5:59	63,3	69,5	80,1	80,1	1,3	225
02.01.2017 6:15 A	24	AT75	3115478	5846254	Suchdol	02.01.2017 6:12	02.01.2017 6:12	64,8	67,9	78,6	78,6	3,4	338
02.01.2017 6:20 A	24	AT45	3115479	5846255	Suchdol	02.01.2017 6:16	02.01.2017 6:16	64,4	69,2	79,6	79,6	2,2	338
02.01.2017 6:23 A	24	AT45	3115480	5846256	Suchdol	02.01.2017 6:20	02.01.2017 6:20	65,5	70,3	79,5	79,5	2	338
02.01.2017 6:32 A	24	A319	3115481	5846257	Suchdol	02.01.2017 6:29	02.01.2017 6:29	65,8	71,3	81,7	81,7	1,8	248
02.01.2017 7:10 A	24	AT75	3115497	5846225	Suchdol	02.01.2017 7:06	02.01.2017 7:07	63,6	66,7	78,2	78,2	3,3	248
02.01.2017 7:12 A	24	A319	3115493	5846227	Suchdol	02.01.2017 7:10	02.01.2017 7:10	66,3	72,9	82	82	3,8	225
02.01.2017 7:17 A	24	A319	3115498	5846233	Suchdol	02.01.2017 7:14	02.01.2017 7:14	65,4	70,8	81,2	81,2	3,2	248
02.01.2017 7:40 A	24	A319	3115488	5846244	Suchdol	02.01.2017 7:36	02.01.2017 7:37	64,4	71,3	83,2	83,2	3,1	248
02.01.2017 7:48 A	24	A319	3115482	5846247	Suchdol	02.01.2017 7:45	02.01.2017 7:45	65,7	72,4	81,5	81,5	3,5	248
02.01.2017 8:26 A	24	A319	3115506	5846210	Suchdol	02.01.2017 8:22	02.01.2017 8:22	66,1	70,3	81,3	81,3	2,8	248

Obr. 18 – Hluková a meteorologická data

Jako cílová sledovaná hodnota byla vybrána hodnota ekvivalentní hladiny hluku dané události L_{Aeq} , pro kterou se zpracování snažilo hledat vhodné regresní koeficienty tak, aby mohla být na jejich základě predikována. Jako vhodné prediktory, které mají vliv na změnu L_{Aeq} , byly vybrány následující proměnné: druh letounu vytvářející hluk (aircr), směr větru (wind), doba trvání události (durat), horizontální vzdálenost letadla od měřicí stanice (horiz), výška letadla (height), šikmá vzdálenost letadla od měřicí stanice (slant), relativní vlhkost vzduchu (humid), atmosférický tlak (press) a teplota (tempp).

Pro volbu statistické metody bylo nutné prověřit, zda jsou data uspořádána dle normálního rozložení a jsou symetrická. Tohoto bylo docíleno pomocí zhodnocení dat, kdy je výsledek zobrazen na obrázku číslo 19.

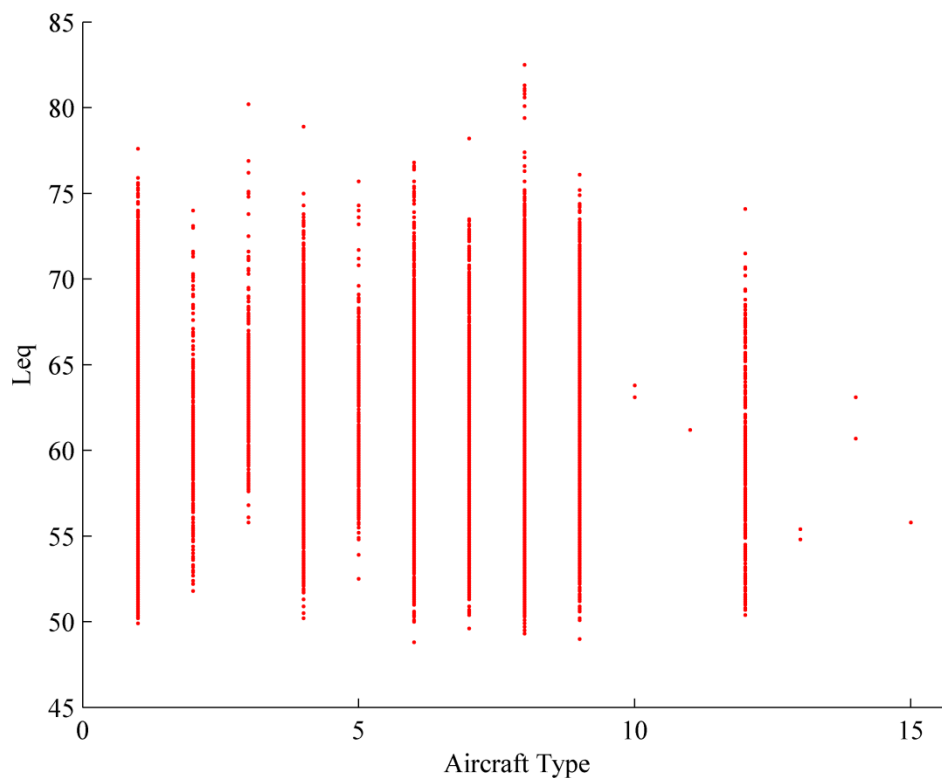


Obr. 19 – Rozložení dat

Data, která mají kategorický charakter, byla rozdělena do kategorií. Ukázka rozdělení druhu letadel je zobrazena v následujícím skriptu.

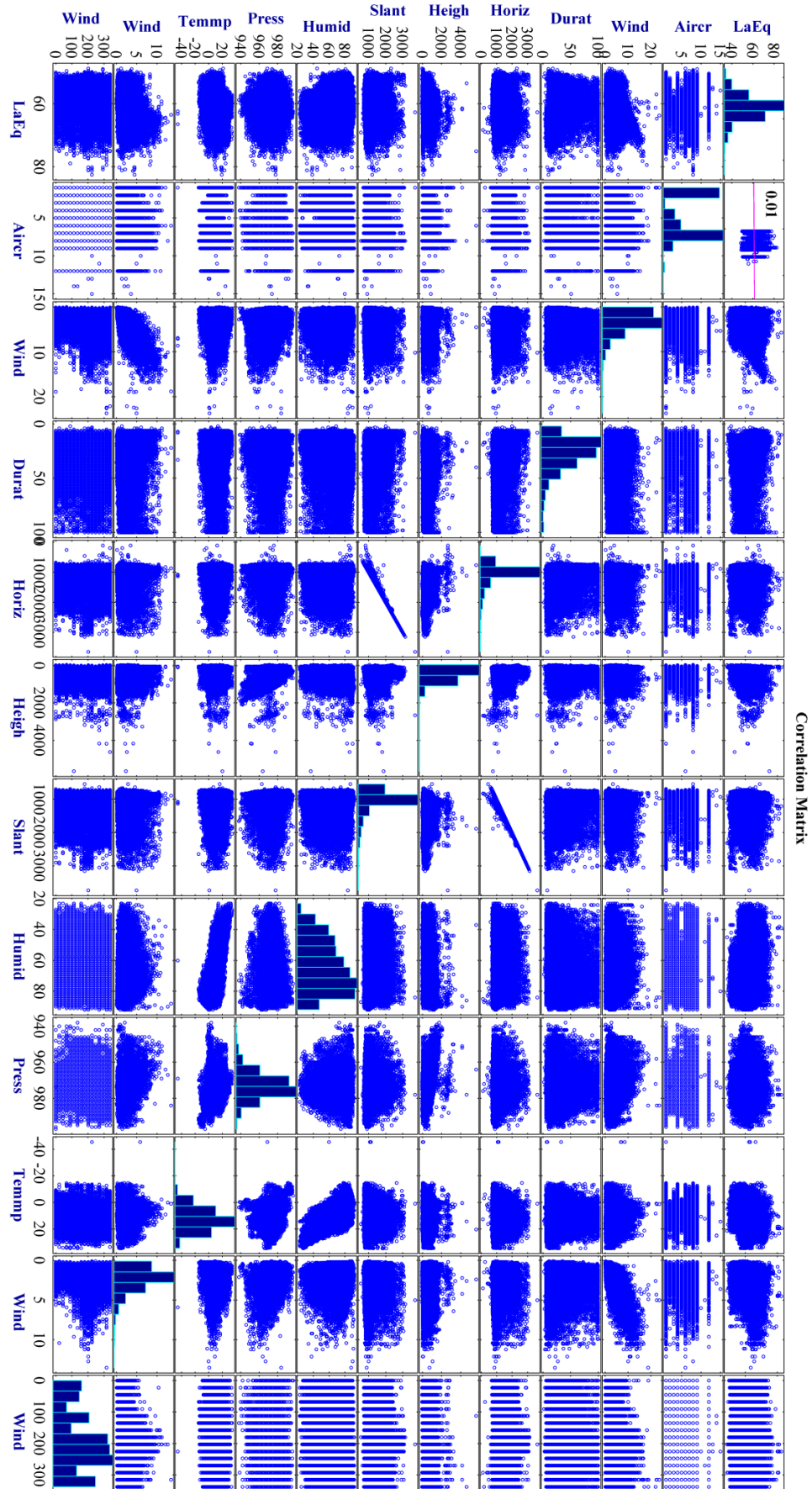
```
for i=1:length(Aircraft)
    if Aircraft{i}=='A319'
        AirCat(i)=1;
    elseif Aircraft{i}=='A320'
        AirCat(i)=2;
    elseif Aircraft{i}=='A333'
        AirCat(i)=3;
    elseif Aircraft{i}=='AT45'
        AirCat(i)=4;
    elseif Aircraft{i}=='AT72'
        AirCat(i)=5;
    elseif Aircraft{i}=='AT75'
        AirCat(i)=6;
    elseif Aircraft{i}=='B737'
        AirCat(i)=7;
    elseif Aircraft{i}=='B738'
        AirCat(i)=8;
    elseif Aircraft{i}=='B739'
        AirCat(i)=9;
    elseif Aircraft{i}=='C510'
        AirCat(i)=10;
    elseif Aircraft{i}=='C56X'
        AirCat(i)=11;
    elseif Aircraft{i}=='C680'
        AirCat(i)=12;
    elseif Aircraft{i}=='CL30'
        AirCat(i)=13;
    elseif Aircraft{i}=='CRJ9'
        AirCat(i)=14;
    elseif Aircraft{i}=='E190'
        AirCat(i)=15;
    else
        AirCat(i)=16;
    end
end
```

Navzdory rozčlenění letadel do jednotlivých kategorií však jednotlivé typy vykazují velikou míru variability. Tato variabilita je patrná z obrázku číslo 20, kde je znázorněn rozsah hodnot L_{Aeq} pro všechny kategorie letadel. Hlukové stopy jednotlivých kategorií jsou zde rozprostřeny v rozmezí 50 až 75 dB. Takové rozložení naznačuje, že hluk vytvářený stejnými typy letadel je signifikantně ovlivněn i jinými proměnnými veličinami, než jsou k dispozici pro tuto diplomovou práci.



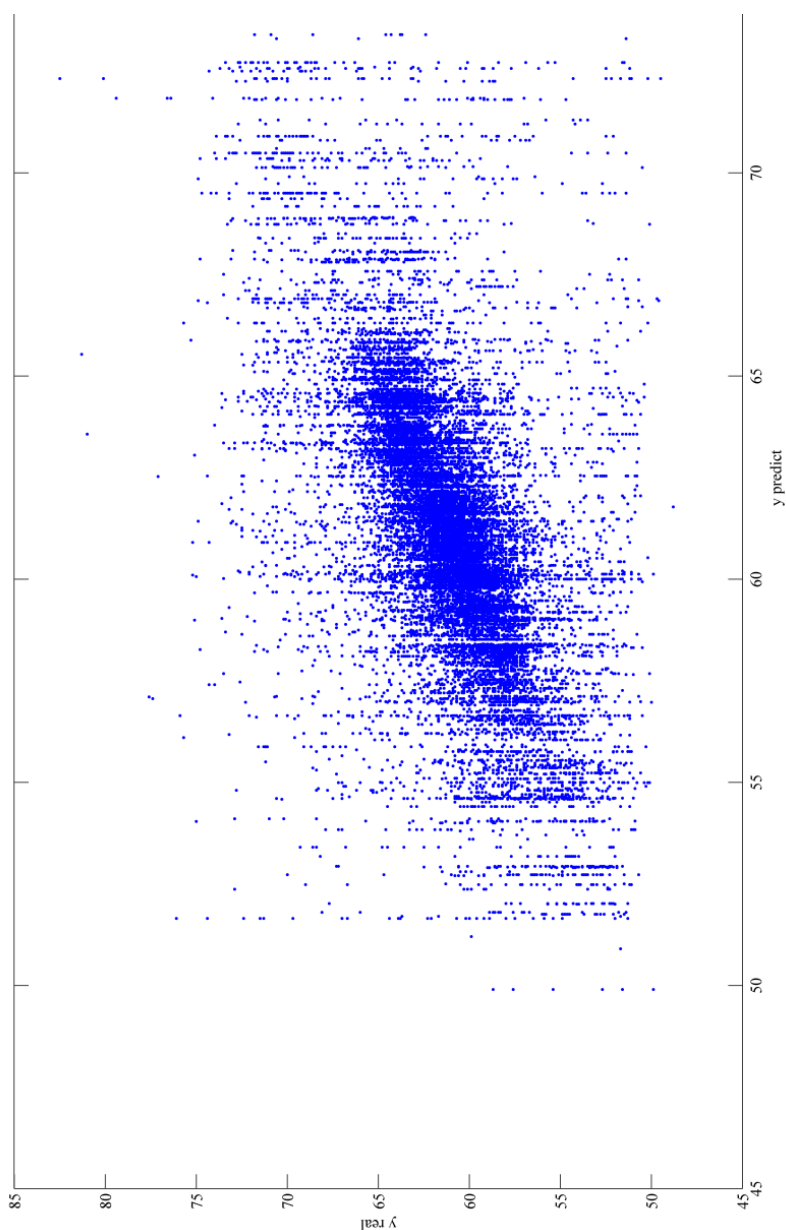
Obr. 20 – L_{Aeq} jednotlivých typů letadel

Nejdříve bylo zapotřebí se na data podívat pohledem deskriptivní statistiky a zhodnotit závislosti prediktorů vůči L_{Aeq} . Proto je vytvořena korelační matice zobrazená na obrázku číslo 21, znázorňující závislosti těchto proměnných vůči L_{Aeq} a vůči sobě navzájem. Uvedené bylo vykonáno se záměrem vytvořit lineární regresní model. Z obrázku korelační matice je však vidět, že základní podmínky pro tvorbu takového modelu nejsou splněny. To znamená, že nebyla nalezena lineární závislost u žádného z partikulárních prediktorů vůči L_{Aeq} . Tento fakt do značné míry limituje realizaci prvotního záměru, a proto byl zvolen alternativní přístup k nalezení vztahu mezi predikovanými veličinami a L_{Aeq} .



Obr. 21 – Korelační matice

Jako alternativa pro regresní analýzu byla určena metoda strojového učení ve formě klasifikačních stromů, ke které bylo využito programu RMatlab 2013a a funkce classregtree. Snahou bylo natrénovat klasifikátor takovým způsobem, aby byl schopný zaklasifikovat cílovou proměnnou, tedy L_{Aeq} , pomocí vybraných prediktorů. Samotný klasifikátor byl navrhnout způsobem, kdy se trénovací množina rovnala 5000 náhodně vybraným hlukovým událostem (z celkového počtu cca 60 000 hlukových událostí). Jako testovací množina vytvořeného klasifikátoru byl použit zbytek hlukových událostí. Vytvořený model byl využit pro specifikaci důležitosti jednotlivých prediktorů pomocí funkce varimportants. Testovací skupina dat byla využita pro ověření přesnosti modelu. Pro tento účel byl vykreslený scatterplot reálných a predikovaných hodnot, který je zobrazený na obrázku číslo 22.

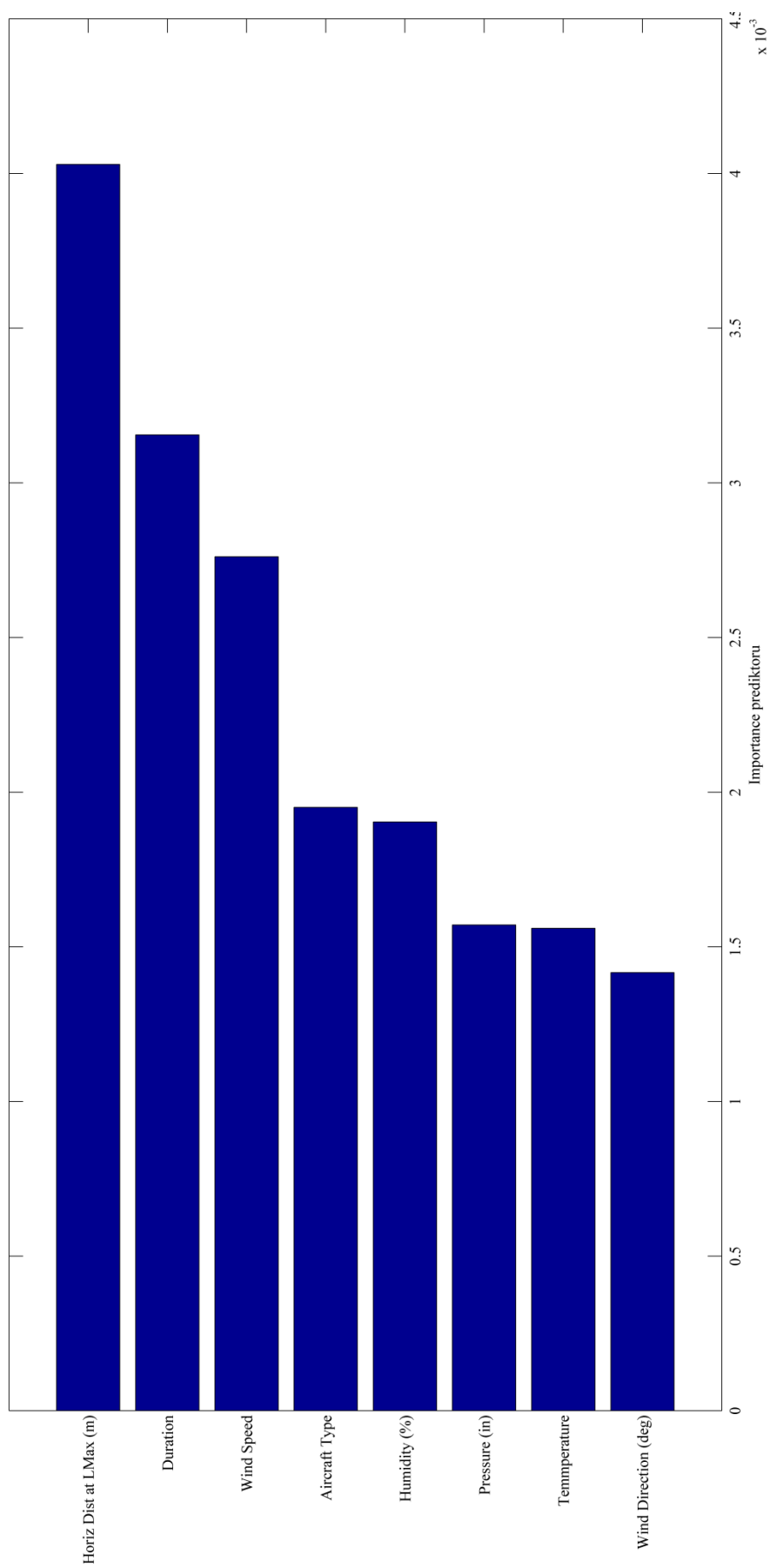


Obr. 22 – reálné versus predikované hodnoty

V ideálním případě by měl tento graf zobrazovat ideální závislost, kdy y predikované = y reálné, tedy přímku. Jak je z grafu patrné, závislost vykazuje variabilitu. Tato variabilita přispívá k nejistotě v klasifikaci, a právě proto při stanovování True Positive (TP) a False Negative (FN) klasifikace byl nastaven práh pro variabilitu. Tato prahová hodnota byla stanovena jako směrodatná odchylka rozdělení reálné cílové proměnné. Hodnota tohoto prahu může být stanovena libovolným způsobem, kdy její hodnota následně ovlivňuje přesnost klasifikace.

Při určeném nastavení bylo správně klasifikováno zhruba 85% (True Positive) hodnot oproti 15% (False Negative) klasifikovaných nesprávně.

Dle vytvořeného modelu byly nalezeny proměnné, které mají nejvýznamnější vliv na cílovou sledovanou hodnotu L_{Aeq} . Na obrázku číslo 23 je znázorněn graf, ve kterém jsou vyobrazeny a popsány důležitosti těchto proměnných podle toho, jakou měrou se podílejí na utváření regresního stromu, tedy na změně sledované hodnoty L_{Aeq} .



Obr. 23 – Významnost jednotlivých proměnných na L_{Aeq}

7 Závěr

Tato diplomová práce se snaží stanovit, dle teoretických poznatků, nejprve jakým způsobem je hluk z letecké dopravy ovlivňován a jaké parametry mohou mít na šíření hluku vliv. V práci není rozebíráno jakým způsobem je hluk vytvářen, tedy to, jakým způsobem velikost vytvořeného hluku ovlivňují parametry letadla. Následně je provedeno zpracování hlukových a meteorologických dat, poskytnutých Letištěm Praha, a.s., pro zjištění reálných závislostí mezi meteorologickými podmínkami a šířením hluku.

Dle úvodních dvou kapitol byly stanoveny důležité meteorologické situace pro šíření hluku. Těmi je teplota, obzvláště její vertikální profil, tlak, který ovlivňuje hustotu prostředí, směr a síla větru a vzdušná vlhkost, kdy její nízké hodnoty šíření hluku tlumí. Navzdory dostupným meteorologickým informacím u každé hlukové události, není však možné zaznamenat meteorologické anomálie nastávající v atmosféře, kterými je například teplotní inverze mající významný vliv na ohyb šířícího se zvuku, nebo vliv množství oblačnosti, od které se může hluk částečně odrážet zpět k zemskému povrchu. Další anomálií mohou být různé druhy turbulencí, zapřičiňující změnu směru síly větru. Tak stejně z naměřených dat není patrná změna větrných parametrů s výškou, což je v mnoha situacích velice signifikantní a do zpracování dat jistě zanáší nejistoty.

Zpracování poskytnutých dat se snažilo najít přesné závislosti mezi změnou meteorologických podmínek a šířením hluku tak, aby vznikla rovnice se všemi proměnnými a ekvivalentní hladinou akustického tlaku L_{Aeq} jakožto závislou na těchto proměnných. Pro vytvoření rovnice bylo zapotřebí zvážit i jiná dostupná data, jako například vzdálenost letadla od měřící stanice nebo jeho typ. Hodnoty vyjadřující typ letadla, bylo nutné vyjádřit jako kategorické proměnné. Tato proměnná data byla rozdělena do 15 kategorií podle toho, které letadlo vytvářelo hlukový záznam. Nejčtenějšími typy letadel ve vzorku dat byly Airbus A319 a Boeing 737-800NG.

K tomuto účelu byla využita metoda lineární regrese. Lineárními metodami se však nepodařilo potvrdit, že prediktory ve formě dostupných meteorologických a jiných parametrů mají vliv na sledovanou L_{Aeq} . Dle úvodní kapitoly závislosti mezi meteorologickými parametry a výsledným hlukem existují. Nicméně vztah mezi těmito proměnnými a výslednou ekvivalentní hladinou zvuku bude pravděpodobně mnohem více specifický, patrně nelineární s případným nelineárním kombinačním vztahem sledovaných prediktorů.

Uvedené je do značné míry potvrzeno i tím, že existuje způsob vytvoření takového modelu, který na základě diskutovaných parametrů dokáže určit L_{Aeq} , avšak nalezení bližších závislostí by mohlo být otázkou dalších studií a práce s daty. Pro True Positive a False Positive by měla být vytvořena ROC křivka pro zobrazení specificity a senzitivity modelu, avšak dat při vytváření modelu bylo tolik, že program RMatlab 2013a nebyl schopen s využitím dostupných výpočetních kapacit jejich množství zpracovat do žádané podoby křivky. Z tohoto důvodu je vytvořena alternativa pomocí metody True Positive a False Negativ, kdy model vygeneroval cca 85% dat jako True Positive.

Jako nejvíce signifikantní proměnná ovlivňující velikost leteckého hluku byla nalezena, dle výsledného grafu, horizontální vzdálenost letadla vytvářející hluk od měřicí stanice (horiz dist at Lmax). Tato proměnná se zdá být téměř dvakrát tak důležitá pro velikost L_{Aeq} než rychlost větru, která je nejdůležitější z meteorologických podmínek. Vítr je však charakterizován svým směrem a svojí rychlostí, takže pro vyjádření důležitosti větru, jakožto meteorologického jevu, je zapotřebí důležitosti směru a rychlosti sečíst. Po sečtení těchto dvou důležitostí se stává vliv větru na šíření hluku nejsignifikantnějším faktorem.

Vliv teploty a tlaku je srovnatelný, což je pravděpodobně způsobeno jejich částečnou závislostí na základě stavové rovnice plynu.

Z výsledků měření však není patrný trend jednotlivých proměnných na šíření zvuku. Tento trend bude odpovídat poznatkům nalezených v úvodních dvou kapitolách práce (vítr hluk unáší, nízká vzdušná vlhkost jeho šíření tlumí, atd.).

Jak již bylo zmíněno, analýza nebrala v úvahu vlastnosti letadla, vytvářející hluk. Společně s případnými meteorologickými anomáliemi je zde prostor pro vysokou míru nejistoty. Letadla sice byla rozřazena do jednotlivých kategorií podle typu, nicméně nebyly brány v úvahu jejich výkonové charakteristiky, které značně ovlivňují výsledný hluk. Toto bylo patrné i při zpracování dat, kdy se ukázalo, že jednotlivé typy letadel se pohybují v poměrně širokém rozmezí hlukových hladin (téměř všechny typy zaujímaly rovnoměrně rozložené v rozmezí L_{Aeq} 50 až 70 dB). Těmito charakteristikami jsou jejich hmotnosti, od toho závislé nastavení výkonu motorů, kde zároveň samotné nastavení výkonu motorů je též závislé od meteorologických podmínek. Dále záleží na konfiguraci letadla (podvozek zasunut nebo vysunut a poloha vztlakových klapek). V neposlední řadě je to i technický stav letadla. Všechna tato data by bylo možné sesbírat, nicméně jejich dostupnost je velice omezena a jejich následné zpracování by bylo náročné.

Nejdůležitějším parametrem, ovlivňující šíření hluku z letecké dopravy, je tedy vítr. V případě uvážení pražských čtvrtí Zličín, Řepy, Jiviny, Bílá hora, Kružíň, Na dědině, Ruzyně, Divoká Šárka a případně

dalších, lze říci, že jsou nejvíce zatíženy hlukem v případech západního až severozápadního větru. K těmto situacím dochází, dle této diplomové práce, po přechodu studené a obou okluzních front. V případě snahy snížit hlukový dopad na tyto části Prahy, může být řešením zavést rozdílné protihlukové opatření v závislosti na směru větru. V případě západních až severozápadních větrů může být hluk omezován zákazem motorových zkoušek, nebo změnou odletového postupu letadel. Odletové postupy jsou, dle Letecké informační příručky vydané pro pražské letiště, stanoveny tak, že letadla snižují svůj vzletový výkon ve výšce 1500 stop nad terénem a ve výšce vyšší než 3000 stop jim povolena akcelerace pro zatahování vztlakové mechanizace. Dle leteckých předpisů k redukci vzletového výkonu však může docházet již ve výšce 800 stop, a tak snížit velikost vytvářeného hluku. Při větrech opačných, tedy východních a jihovýchodních, mohou být postupy upraveny tak, aby letadlům dovolovaly létat neekonomičtěji, např. akcelerovat již ve výšce 800 stop pro zatahování vztlakové mechanizace. Navrhované postupy však neberou v úvahu obce, nacházející se na druhé straně letiště, a návrh takovýchto postupů by je musel zohlednit.

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Akustický tlak [2]

Obrázek 2 – Huygensův princip [4]

Obrázek 3 – Ohyb vlnění [5]

Obrázek 4 – Lom zvukové vlny [5]

Obrázek 5 – Vznik anomálie slyšitelnosti [5]

Obrázek 6 – Deformace zvukového pole vlivem větru [3]

Obrázek 7 – Zpětné záření oblačnosti [11]

Obrázek 8 – Tlakové pole a vznik větru [8]

Obrázek 9 – Průběh zvukové události [1]

Obrázek 10 – Ekvivalentní hladina zvuku [8]

Obrázek 11 – Hladinová expozice zvuk [17]

Obrázek 12 – Schéma Měřicího a detekčního systému [20]

Obrázek 13 – Hlukové charakteristiky různých druhů dopravy [20]

Obrázek 14 – Detekce leteckého hluku [20]

Obrázek 15 – Ochranné hlukové pásmo + rozmístění měřících stanic [16]

Obrázek 16 – Vaisala WXT-510 [20]

Obrázek 17 – Klasifikace vyhodnocených informací [26]

Obrázek 18 – Hluková a meteorologická data

Obrázek 19 – Rozložení dat

Obr. 20 – LAeq jednotlivých typů letadel

Obrázek 21 – Korelační matice

Obrázek 22 – reálné versus predikované hodnoty

Obrázek 23 – Významnost jednotlivých proměnných na L_{Aeq}

Seznam grafů

Graf číslo 1 – Vliv teploty na rychlost zvuku v suchém vzduchu

Graf číslo 2 – Vliv teploty na rychlost zvuku v suchém vzduchu

Graf číslo 3 – vliv měrné vlhkosti na rychlost šíření zvuku

Graf číslo 7 – Útlum zvuku vlivem relativní vlhkosti [3]

Seznam tabulek

Tabulka číslo 1 - Vliv frekvence na útlum zvuku [1]

Tabulka číslo 2: Technické parametry EMU 2 [20]

Tabulka číslo 3 - Vaisala WXT-510 [20]

Použité zdroje

- [1] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5
- [2] In: Funkce buněk a lidského těla: Multimediální skrypta [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://fblt.cz/skripta/xiii-smysly/2-sluchovy-a-rovnovazny-system/>
- [3] ŽIARAN, Stanislav. *Znižovanie kmitania a hluku v priemysle: kmitanie a akustika*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 8022723665.
- [4] Fyzika 007: Huygensův princip [online]. In: . [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vlneni-v-izotropnim-prostredi-huygensuav-princip>
- [5] BEDNÁŘ, Jan. *Pozoruhodné jevy v atmosféře: atmosférická optika, akustika a elektřina*. Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2.
- [6] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu rychlých letounů*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1968
- [7] DANĚK, Vladimír a Karol FILÁKOVSKÝ. *Základy letu (081 00): [učební texty dle předpisu JAR-FCL 1]*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 8072044494
- [8] KRÁČMAR, Jan. *Meteorologie (050 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 8072044478.
- [9] HLAVIČKA, Alois, Aleš TERŠ a Antonín ŠPELDA. *Pohyb kmitavý, vlnění, akustika*. Dotisk. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1965.
- [10] DVORÁK, Petr. *Letecká meteorologie: učebnice meteorologie pro piloty kvalifikace UL, GLD, PPL, CPL, ATPL a všechny ostatní, kteří potřebují odborné znalosti letecké meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2010. ISBN 978-80-86808-85-7.
- [11] JOINT AVIATION AUTHORITIES AIRLINE TRANSPORT PILOT'S LICENCE. *Meteorology: theoretical knowledge manual 9*. 2nd ed., 1st impr. Oxford: Jeppesen, 2002. ISBN 0884872866.

- [12] ŠAFAŘÍK, Pavel a Magda VESTFÁLOVÁ. Termodynamika vlhkého vzduchu. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.
- [13] KUČÍREK, Jiří. Hluk z leteckého provozu: Proč a jakým způsobem je měřen i omezován. Letectví + kosmonautika. Bratislava: MAGNET PRESS, SLOVAKIA, 2018, 94(2/2018), 34-37. ISSN 0024-1156.
- [14] In: : Ekvivalentní hladina akustického tlaku [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: http://www.khshk.cz/e-learning/kurs2a/kapitola_17__ekvivalentn_hladina_akustickho_tlaku.html
- [15] Č.J. OVZ-32.0-19.02.2007/6306. *METODICKÝ NÁVOD pro měření a hodnocení hluku z leteckého provozu*. Praha: MINISTERSTVO ZDRAVOTNICTVÍ, 2007.
- [16] *Letiště Václava Havla Praha* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/hluk>
- [17] In: *Hladina expozice zvuku* [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: http://www.khshk.cz/e-learning/kurs2a/kapitola_18__hladina_expozice_zvuku.html
- [18] *Dopravní noviny: Systém ANOMS 8 měří hladinu hluku kolem letiště* [online]. 2008 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.dnoviny.cz/letecka-doprava/system-anoms-8-meri-hladinu-hluku-kolem-letiste-3526>
- [19] Metro: Snažíme se vyvracet mýty, říkají hlukaři z Letiště Praha [online]. 2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.metro.cz/snazime-se-vyvracet-myty-rikaji-hlukari-z-letiste-praha-p2o-/praha.aspx?c=A171109_144900_metro-praha_lam
- [20] Interní archiv společnosti MaREXCOM
- [21] Aeroweb: Nový monitorovací systém hlídá nejen hluk, ale i trasy letadel [online]. 2008 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/1065-novy-monitorovaci-system-hlida-nejen-hluk-ale-i-trasy-letadel>
- [22] How To Find Relationship Between Variables, Multiple Regression. Statsoft [online]. 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.statsoft.com/Textbook/Multiple-Regression>
- [23] Correlation matrix : A quick start guide to analyze, format and visualize a correlation matrix using R software. STHDA [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z:

<http://www.sthda.com/english/wiki/correlation-matrix-a-quick-start-guide-to-analyze-format-and-visualize-a-correlation-matrix-using-r-software>

- [24] UTTS, Jessica M. Seeing through statistics. 3rd ed. Belmont, CA: Thomson, Brooks/Cole, c2005. ISBN 0-534-39402-7.
- [25] JARRELL, Stephen B. Basic statistics. Dubuque, Iowa: Wm. C. Brown Pub., c1994. ISBN 0-697-21595-4.
- [26] Stack Overflow: True Positive True Negative False Positive False Negative sometimes confusing [closed] [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/47206373/true-positive-true-negative-false-positive-false-negative-sometimes-confusing>
- [27] GÖNEN, Mithat. Analyzing receiver operating characteristic curves with SAS. Cary, NC: SAS Pub., c2007. ISBN 978-1-59994-298-8.