



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

MĚŘENÍ PARAMETRŮ VĚTRU NA PALUBĚ MALÉHO LETADLA

MEASURING OF WIND PARAMETERS ON BOARD A SMALL AIRPLANE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Helia

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Petr Helia**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Letecký provoz
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření parametrů větru na palubě malého letadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Znalost směru a síly větru pilotem během letu je zásadní z hlediska plánování a navigace letu. V dnešní době již pilot není odkázán na svůj odhad, ale existují různé metody, kterými lze pomocí různých palubních přístrojů stanovit sílu a směr větru. Toto měření palubními prostředky je však zatíženo řadou chyb, které mohou negativně ovlivnit výsledek. Cílem práce je především zmapovat tyto chyby v jednotlivých metodách a navrhnout takový způsob měření, který bude mít tyto chyby nejmenší.

Cíle diplomové práce:

- 1) Definování co je vítr a jak ovlivňuje let a proč je důležité, aby pilot měl povědomí o směru a síle větru.
- 2) Příklady nehod, zaviněné nesprávným odhadem větru.
- 3) Používané metody stanovení větru za letu (výpočet z rozdílu kurzu a headingu, výpočet pomocí GPS, stanovení pomocí snosoměru. Metody budou doplněny o způsob výpočtu.
- 4) Definování chyb a jejich projev na výpočtu, včetně modelování chyb.
- 5) Návrh optimální metody pro měření větru na palubě nevyžadující nákladné senzory.

Seznam literatury:

CHIONCEL, C. P., CHIONCEL, P., GILLICH, N. Overview of Classic and Modern Wind Measurement Techniques, Basis of Wind Project Development. Analele Universității Eftimie Murgu Reșița. Fascicula de Inginerie [online]. 2011, XVIII(3), 73-80 [cit. 2016-11-03]. ISSN 1453-7397.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 15.11.2016

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá větrem a jeho působením na bezpečnost civilního letectví. Autor zde píše o způsobech měření parametrů větru na palubě malého letadla a definuje chyby jednotlivých postupů.

ABSTRACT

This diploma thesis examines the influence of wind on civil aviation safety. Author investigates the methods of wind measuring on board of small airplane and identifies the most common individual errors.

Klíčová slova

vítr, letecké nehody, měření větru, navigační trojúhelník,

Keywords

wind, aviation accidents, wind measuring, navigation triangle

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího diplomové práce a s použitím literatury a internetových zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 26.5.2015

.....

Bc. Petr Helia

Bibliografická citace

HELIA, P. *Měření parametrů větru na palubě malého letadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D..

Poděkování

Tato práce by nemohla vzniknout bez lidí v mém okolí, kteří mě nejen po dobu tvorby velmi podporovali. Tímto bych rád poděkoval zejména:

- panu Ing. Miroslavu Šplíchalovi, Ph.D. za jeho pevné nervy a konstruktivní kritiku
- panu JUDr. Jaromíru Hammerovi za provedení testovacího letu

Na závěr bych chtěl poděkovat také své rodině za podporu, kterou mi poskytuje po celou dobu mého studia.

Obsah

1. Úvod	6
2. Co je to vítr	7
2.1. Periodický chod tlaku vzduchu	7
2.2. Denní chod rychlosti větru	8
2.3. Měření větru	9
2.4. Síla větru	9
2.5. METAR a SPECI	10
2.6. Větrný rukáv	11
2.7. Nebezpečné meteorologické jevy pro letectví	12
2.7.1. Rotor	12
2.7.2. Střih větru	13
2.7.3. Microburst a macroburst	13
3. Nehody ovlivněné větrem	14
3.1. Nehody a incidenty letounů	14
3.2. Nehoda ovlivněná neznalostí větru	16
3.3. Nehoda s úmyslným přistáním se zádivým větrem	18
4. Měření větru na palubě malého letadla	19
4.1. Navigační trojúhelník	19
4.1.1. Početní řešení navigačního trojúhelníku	21
4.1.2. Grafické řešení navigačního trojúhelníku	21
4.1.3. Řešení pomocí navigačního pravítka	22
4.2. Malé letadlo a jeho vybavení	23
4.3. Rychloměr	23
4.3.1. Rychlosti využívané v letectví	25
4.3.2. Chyby leteckých rychloměrů	25
4.4. Ukazatel magnetického směru	25

4.4.1.	Magnetický kompas s přímou indikací.....	25
4.4.2.	Indukční magnetický kompas.....	26
4.4.3.	Digitální magnetický kompas.....	26
4.4.4.	Magnetická deklinace.....	26
4.4.5.	Magnetická inklinace.....	27
4.4.6.	Deviace magnetického kompasu.....	28
4.4.7.	Celková chyba ukazatele magnetického směru.....	28
4.5.	Určení snosu s pomocí pozemních radiomajáků.....	28
4.5.1.	NDB.....	29
4.5.2.	VOR-DME.....	30
4.6.	Globální navigační satelitní systém.....	33
4.6.1.	GPS.....	33
4.6.2.	GLONASS.....	35
4.6.3.	Galileo.....	35
4.6.4.	Měření parametrů větru pomocí GNSS.....	36
4.7.	Optická metoda.....	38
5.	Testovací let.....	40
5.1.	Přístrojové vybavení testovacího letu.....	40
5.2.	Meteorologická situace.....	43
5.3.	Výpočet rychlosti větru.....	43
5.4.	Výpočet směru větru.....	45
5.5	Chyby měření a jejich projev na výpočtu.....	47
5.5.1.	Chyba určení směru.....	47
5.5.2.	Chyba určení rychlosti.....	49
6.	Návrh metody pro výpočet parametrů větru.....	51
7.	Závěr.....	52
8.	Zdroje.....	53
	Seznam použité literatury.....	53

Seznam internetových zdrojů	53
Zdroje obrázků.....	54
Zdroje tabulek.....	56
9. Přílohy	57

1. Úvod

Letectví je od svých prvopočátků ovlivňováno počasím. Jeden z kritických meteorologických faktorů je vítr. Během vzletu vítr ovlivňuje délku rozjezdu a rozletu. V průběhu letu je znalost větru klíčová pro přesnou navigaci. Při přistání pak může vítr v zádech podstatně zvýšit přistávací rychlost, a tím prodloužit délku přistání. Tato práce si klade za cíl definovat pojem vítr a objasnit jeho indikaci a působení na bezpečnost civilního letectví.

Kvůli nesprávnému odhadu větru se v minulosti stalo již nespočet nehod. Jedním z cílů této práce je vypracovat statistiku leteckých nehod a incidentů v České republice za posledních 10 let a zjistit, kolik z nich bylo ovlivněno větrem.

Každý letoun má v provozní příručce informaci o maximální přípustné hodnotě bočního větru a větru do zad. V případě jeho překročení se pak musí kapitán letadla rozhodnout, zda vyčká nad letištěm na lepší podmínky, nebo přistane na záložním letišti. Zejména pro malá letadla je i mírný vítr do zad významnou komplikací bezpečného přistání a významně prodlužuje délku vzletu. Na většině malých letišť navíc není pravidelná letecká služba, která by piloty informovala o aktuálních meteorologických podmínkách. Pilotům pak zbývá orientace podle větrného rukávu nebo podle přístrojů na palubě. Cílem této práce je vysvětlit základní principy fungování těchto přístrojů a definovat jejich chyby. Dále pak určit, jak tyto nepřesnosti ovlivní konečnou indikaci parametrů větru. Součástí práce je také testovací let za účelem ověření těchto chyb a určení, jakou roli má směr vanutí vůči směru letu.

Posledním cílem této práce je využít výše popsané informace a navrhnout optimální metodu pro měření parametrů větru na palubě malého letadla, nevyžadující nákladné senzory.

2. Co je to vítr

Vítr je jeden ze základních meteorologických prvků, který popisuje pohyb zvolené částice vzduchu v určitém místě atmosféry v daném časovém okamžiku. Pro jeho vyjádření užíváme vektor rychlosti větru, v meteorologické praxi zkráceně vektor větru. Horizontální složka vektoru větru vzniká především působením horizontální složky síly tlakového gradientu a Coriolisovy síly¹. V meteorologické praxi se sleduje odděleně směr a velikost vektoru větru jako směr větru a rychlost větru.

Proudění vzduchu je důsledkem nerovnoměrného rozložení atmosférického tlaku, které je vyjádřeno prostorovým tlakovým gradientem. Největší rozdíly tlaku vzduchu se vyskytují v nejnižší vrstvě atmosféry, která se nazývá troposféra. Mají periodický a neperiodický charakter, přičemž neperiodické změny ve středních zeměpisných šířkách zcela překrývají změny periodické. V důsledku toho jsou tlakové změny obtížně předpověditelné. Hlavními příčinami nerovnoměrného rozložení tlaku na zemském povrchu i ve vyšších hladinách je nestejné prohřívání zemského povrchu, nahromadění vzduchu v některých oblastech Země a výměna vzduchu ve frontách. Pravidelná kolísání tlaku vzduchu vykazují denní i roční chod [1,14].

2.1. Periodický chod tlaku vzduchu

Denní chod závisí na zeměpisné šířce. Vyznačuje se minimy ve 4 hodiny a v 16 hodin a maximy v 10 hodin a 22 hodin místního času, čili má dvojitý charakter. V našich zeměpisných šířkách se denní amplituda tlaku obvykle pohybuje od 0,5 do 1 hPa, v tropických oblastech dosahuje až 4 hPa, zatímco v oblastech polárních se blíží k nule.

Roční chod tlaku vzduchu závisí především na míře kontinentality nebo oceanity daného místa. Na pevnině je roční maximum atmosférického tlaku převážně v zimě a minimum v létě, avšak ve vysokých nadmořských výškách je tomu naopak. Naproti tomu se v oceánech se vyskytují dvě maxima (letní a zimní) a dvě minima tlaku vzduchu (jarní a podzimní). [1]

¹ setrvačná síla působící na tělesa pohybující se v rotující neinerciální vztažné soustavě. V meteorologii též nazývá uchylující silou zemské rotace.

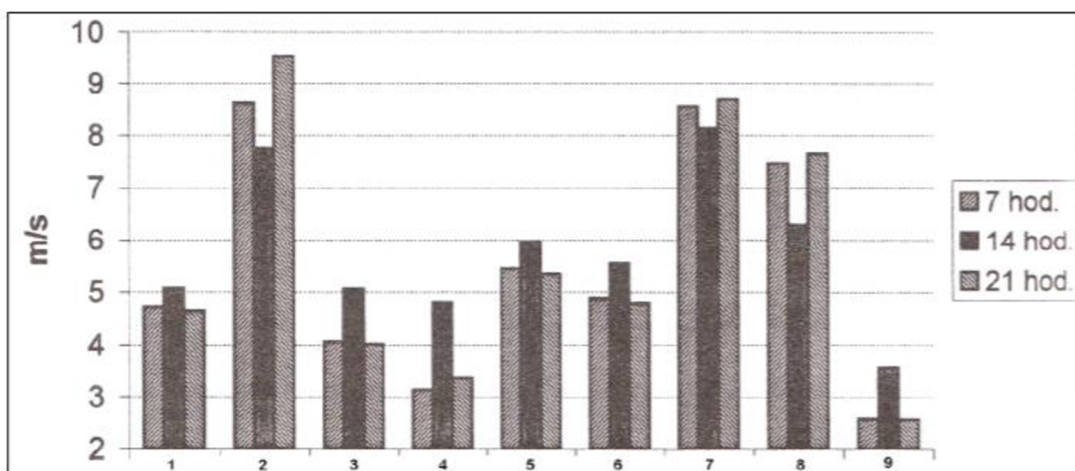
2.2. Denní chod rychlosti větru

Denní chod rychlosti větru je vyvoláván různou intenzitou promíchávání vzduchu během 24 hodin. Rozlišujeme dva základní typy denního chodu rychlosti větru, a to přízemní a výškový.

Přízemní vítr je měřený na meteorologické stanici v dohodnuté výšce nad zemským povrchem, obvykle ve výšce 10 m, v níž je rušivý vliv místních překážek a terénu na proudění již výrazně menší, než v těsné blízkosti povrchu². Měření přízemního větru by mělo být prováděno na otevřeném prostranství v místě bez vlivu okolních překážek. Za minimální vzdálenost od překážek se považuje desetinásobek jejich výšky, doporučuje se však větší vzdálenost, zejména od překážek z převládajících směrů větru.

Pojem „výškový vítr“ se obecně považuje za komplementární ve vztahu k přízemnímu větru, a potom se za výškový vítr zpravidla považují údaje o rychlosti větru už z hladin okolo 20 m nad zemským povrchem. Pro použití v synoptické a letecké meteorologii se výškový vítr šifruje ve zprávě z pozemní (mořské) stanice o tlaku, teplotě, vlhkosti a větru ve vyšších hladinách a ve zprávě z pozemní (mořské) stanice o výškovém větru.

Na pevnině intenzivní promíchávání vzduchu ve dne vede k přenosu hybnosti u zemského povrchu, čímž se zvyšuje rychlost přízemního větru, a naopak snižuje rychlost větru výškového. V noci je tomu naopak.



Poznámky: 1 – Přímda (742 m n.m.), 2 – Milešovka (837 m n.m.), 3 – Praha, Ruzyně (364 m n.m.), 4 – Kostelní Myslová (569 m n.m.), 5 – Svratouch (737 m n.m.), 6 – Nedvězí (722 m n.m.), 7 – Praděd (1490 m n.m.), 8 – Lysá hora (1324 m n.m.), 9 – průměr ČR.

Obr. 1 Průměrné termínové rychlosti větru na vybraných meteorologických stanicích a průměrná rychlost větru v ČR

² v letectví v souladu s předpisem L3–Meteorologie standardně ve výšce 10±1 m

Přízemní typ větru má maximum v poledne a minimum kolem půlnoci. Oproti tomu výškový typ má maximum před půlnoci a minimum v dopoledních hodinách. Druhý jmenovaný typ se na území České republiky vyskytuje pouze na vrcholech izolovaných kopců významně převyšujících okolní terén, jako je například Milešovka, Praděd nebo Lysá hora (*Obr. 1*). [1,14,15]

2.3. Měření větru

Pro stanovení vektoru větru, popř. jeho časových fluktuací se zpravidla měří jen horizontální složka tohoto vektoru. tj. její směr čili směr větru a její velikost čili rychlost větru. Vertikální složka vektoru větru se zjišťuje pouze pro speciální účely. Rychlost větru se měří v $m \cdot s^{-1}$ nebo v uzlech (kt^3), popř. v $km \cdot h^{-1}$.

$$1 kt = 0,514 m \cdot s^{-1} \quad (1)$$

$$1 m \cdot s^{-1} = 1,994 kt \quad (2)$$

[1]

Směr větru udává, odkud vane vítr. V meteorologické praxi je to směr opačný ke směru horizontální složky vektoru větru. Na meteorologických stanicích se určuje jako průměrný směr větru za posledních 10 minut před termínem pozorování; nastane-li během tohoto intervalu náhlá změna směru větru, směr větru se určuje jako průměrný směr větru za zkrácené období od této změny do termínu pozorování. Při bezvětří se směr větru uvádí jako 0 stupňů. Směr větru se může také udávat pomocí anglických zkratek. Východní vítr je vyjádřen ve stupních 90 (E), jižní vítr 180 (S), západní vítr 270 (W) a severní vítr 360 (N). Směr větru měřený na stanicích do 1° od Severního pólu nebo do 1° od Jižního pólu se udává takovým způsobem, že azimutální kruh je nastaven tak, aby se jeho nula shodovala s nultým poledníkem, tj. směr větru 360° je rovnoběžný s nultým poledníkem.[14]

2.4. Síla větru

je setrvačná síla projevující se dynamickými účinky proudícího vzduchu na překážky. Tyto účinky tvoří základ Beaufortovy stupnice větru. Mezinárodně přijatá Beaufortova stupnice, která na pevnině charakterizuje účinky přízemního větru o různé rychlosti na předměty na zemském povrchu, je 13dílná (stupeň 0 až 12) a jejím jednotlivým stupňům

³ Z anglického knot, v množném čísle je možné použít i zkratku kts (knots)

odpovídají určité intervaly průměrné rychlosti větru v 10 metrech nad zemí. Pro jednotlivé stupně této stupnice se používají slovní označení (viz Tab. 1). [14]

Stupeň	Označení	Rozpoznávací znaky na pevnině	Průměrná rychlost	
			$m \cdot s^{-1}$	$km \cdot h^{-1}$
0	bezvětří	Kouř stoupá kolmo vzhůru.	0,0 – 0,2	méně než 1
1	vánek	Směr větru je poznatelný podle pohybu kouře, vítr však neúčinkuje na větrnou korouhev.	0,3 – 1,5	1 – 5
2	slabý vítr	Vítr je cítit ve tváři, listy stromů šelestí, větrná korouhev se pohybuje.	1,6 – 3,3	6 – 11
3	mírný vítr	Listy stromů a větvičky v trvalém pohybu, vítr napíná praporky.	3,4 – 5,4	12 – 19
4	dosti čerstvý vítr	Vítr zdvíhá prach a kousky papíru, pohybuje slabšími větvemi.	5,5 – 7,9	20 – 28
5	čerstvý vítr	Listnaté keře se začínají hýbat, na stojatých vodách se tvoří menší vlny se zpěnými hřebeny.	8,0 – 10,7	29 – 38
6	silný vítr	Vítr pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, používání deštníku se stává nesnadným.	10,8 – 13,8	39 – 49
7	prudký vítr	Vítr pohybuje celými stromy, chůze proti větru je obtížná.	13,9 – 17,1	50 – 61
8	bouřlivý vítr	Vítr ulamuje větve, chůze proti větru je normálně nemožná.	17,2 – 20,7	62 – 74
9	vichřice	Vítr způsobuje menší škody na stavbách (strhává komíny, tašky a břidlice se střech).	20,8 – 24,4	75 – 88
10	silná vichřice	Vyskytuje se na pevnině zřídka, vyvrací stromy, působí škody obydlím.	24,5 – 28,4	89 – 102
11	mohutná vichřice	Vyskytuje se velmi zřídka, působí rozsáhlá zpusťování.	28,5 – 32,6	103 – 117
12	orkán	Ničivé účinky.	32,7 a více	118 a více

Tab. 1 Beaufortova stupnice

2.5. METAR a SPECI

jsou meteorologické zprávy, na které se mohou piloti spolehnout na řízených letištích. Základní meteorologická zpráva METAR⁴ je pro letecké účely vysílána v pravidelných, zpravidla hodinových nebo půlhodinových časových intervalech. Zpráva se sestavuje na základě pozorování pozemní meteorologické stanice na letišti a obsahuje kromě označení letiště a času pozorování údaje o větru, dohlednosti a dráhové dohlednosti, o stavu počasí, o provozně význačné oblačnosti, o teplotě vzduchu, teplotě rosného bodu a QNH⁵.

⁴ Z anglického METeorological Aviation Report

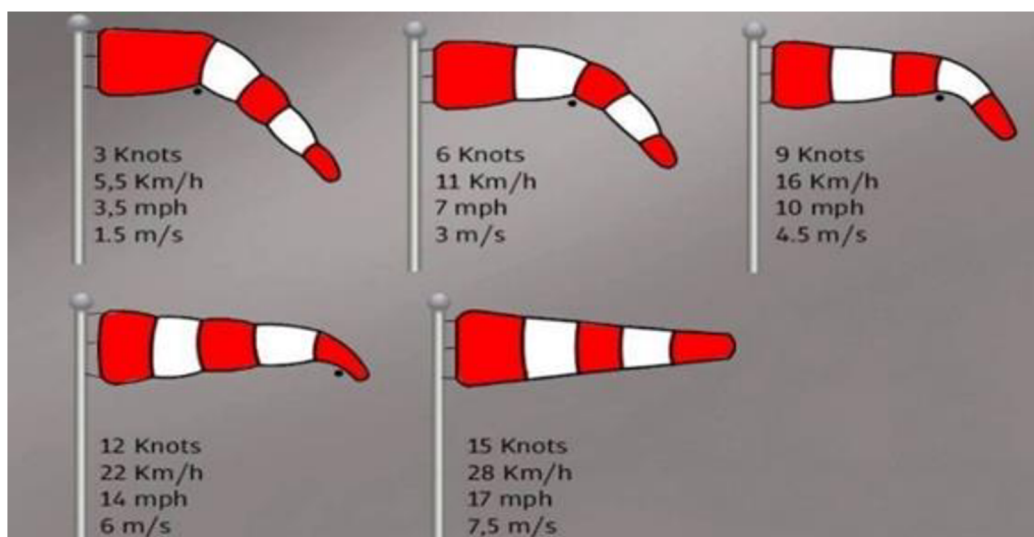
⁵ tlak vzduchu redukováný na hladinu moře podle mezinárodní standardní atmosféry

SPECI⁶ je meteorologická zpráva pro letecké účely vysílaná mimo pravidelné zpravodajské termíny s cílem zvýšit operativnost řízení letové činnosti. Vysílá se při stanovené míře zhoršení i zlepšení povětrnostních podmínek. Pro vysílání zprávy SPECI jsou přesně definována kritéria, zahrnující změny směru, rychlosti a nárazů větru, dále změny dohlednosti a dráhové dohlednosti, význačné oblačnosti a výskyt význačných jevů počasí. [1, 14]

2.6. Větrný rukáv

Je povinná součást každého letiště. Často bývá nesprávně označován jako „větrný pytel“⁷. Je to zařízení pro orientační určení směru a částečně i rychlosti větru. Skládá se z otevřeného kužele zhotoveného z tkaniny a upevněného na širším konci ke kovovému kruhu volně otočnému kolem svislé osy tak, aby se působením větru mohl spolu s ním otáčet.

Směr větru lze určit jednoduše podle natočení větrného rukávu. Pro určení rychlosti větru má rukáv kontrastní, zpravidla červenobílé značení (viz Obr. 2). [14, 17]



Obr. 2 Měření rychlosti větru pomocí větrného rukávu

⁶ Z anglického Special weather report

⁷ Rukáv na rozdíl od pytle nemá dno

2.7. Nebezpečné meteorologické jevy pro letectví

při dostatečné intenzitě nebo nepříznivé kombinaci mohou ohrozit bezpečnost letu. Letecká meteorologická služba ČHMÚ vydává pro vnitrostátní potřebu výstrahy:

- na pokles tlaku vzduchu redukovaného na hladinu moře podle standardní atmosféry (QNH) pod hodnotou 993 hPa
- na rychlost větru 50 kt a více v hladině 850 a 700 hPa⁸, 80 kt a více v hladinách nad 500 hPa
- na výskyt vlnovém proudění za horskými překážkami
- na výrazné fronty.

Výstrahy tohoto druhu se vydávají v otevřené řeči a doba jejich platnosti je max. 9 hodin. Z hlediska větru největší nebezpečí představují zejména rotor, stříh větru, misroburst a macroburst. [1,14]

2.7.1. Rotor

je relativně stabilní atmosférický vír s horizontální nebo kvazi-horizontální osou. Rotory se vyskytují například při vlnovém proudění nebo při rotorovém proudění, za vhodných podmínek, jako je dostatečná vlhkost vzduchu, vytvářejí rotorové oblaky. S rotory se lze často setkat i pod předním okrajem rychle postupujících oblaků druhu cumulonimbus⁹, kdy se projevují vznikem oblaků typu arcus¹⁰ (viz Obr. 3)



Obr. 3 Cumulonimbus arcus

Rotory bývají doprovázeny silnou až extrémní turbulencí, s prudkými změnami směru a rychlosti přízemního větru s nárazy často přesahujícími $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a místními

⁸ hladina 850hPa odpovídá při standardní atmosféře nadmořské výšce 1500m. 700hPa odpovídá výšce 3000 m.n.m.

⁹ Bouřkový oblak

¹⁰ může mít vzhled horizontálního oblačného válce zcela odděleného či víceméně spojeného s ostatní oblačností bouře na niž vzniká

variacemi atmosférického tlaku, které v extrémních případech mohou u zemského povrchu dosahovat hodnot až několika hPa. Z těchto důvodů jsou rotory nebezpečné pro leteckou činnost, dopravu a energetiku. [14]

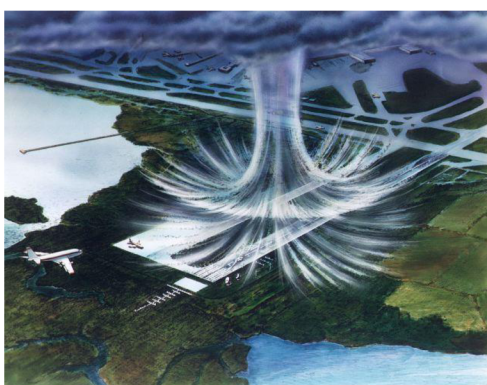
2.7.2. Střih větru

je meteorologický jev, při kterém jsou blízko sebe dvě vrstvy vzduchu s význačným rozdílem směru, případně rychlosti vanutí větru. Nejčastěji se uvažuje vertikální střih větru, který definujeme jako parciální derivaci vektoru rychlosti proudění podle vertikální souřadnice. Pod pojmem horizontální střih větru rozumíme změnu vektoru rychlosti proudění v určitém směru horizontální roviny připadající na jednotku vzdálenosti, čili analogicky parciální derivaci vektoru rychlosti proudění v daném horizontálním směru. [14]

2.7.3. Microburst a macroburst

jsou extrémně silné sestupné proudy u konvektivní bouře¹¹, které jsou příčinou vzniku ničivých divergujících větrů u zemského povrchu.

Microburst dosahuje malého měřítka s horizontálním průměrem nepřesahujícím cca 4 km. Ničivé větry trvají zpravidla (2÷5) minut a změna rychlosti větru u středu roztékání přesahuje $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Detekce tohoto jevu je velmi obtížná, často dokonce nemožná, pro jeho krátké trvání a malé rozměry. Microburst se projevuje silným střihem větru, který způsobil řadu vážných nehod v leteckém provozu, zejména při vzletání nebo přistávání letadel v okolí konvektivní bouře¹². [1, 14]



Obr. 4 Znárodnění microburstu

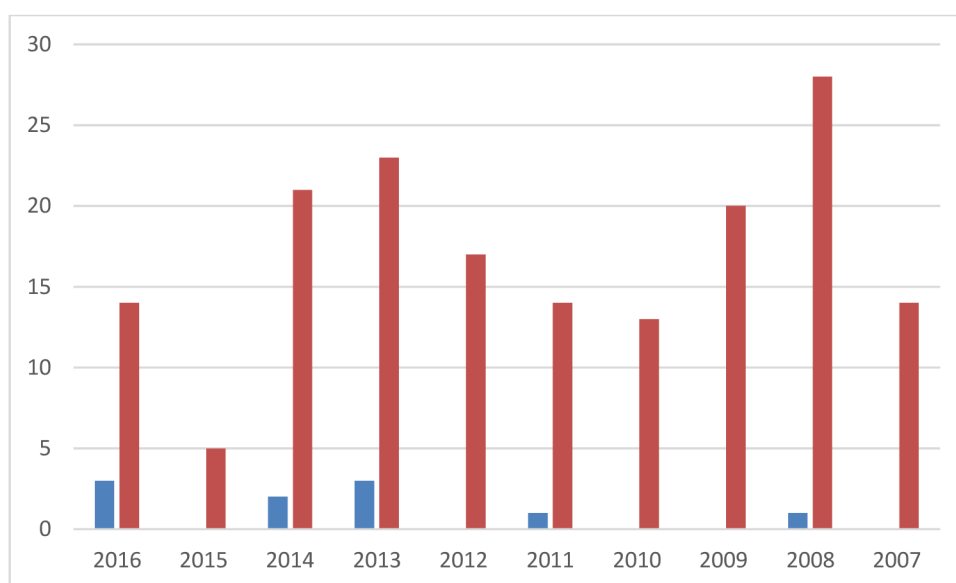
¹¹ Souhrnné obecné označení pro meteorologické jevy, které se vyskytují při vývoji oblaků druhu cumulonimbus nebo jejich soustav. Zahrnuje například výskyt bouřky, tornáda, krup, prudkého nárazovitého větru nebo přívalového deště.

3. Nehody ovlivněné větrem

Letouny dnes létají podstatně vyššími rychlostmi, než ve svých počátcích. Zejména větší letadla běžně provádí vzlet a přistání se složkou zádového větru. Pro malá letadla je však vítr stále důležitým faktorem pro bezpečný let. Neznalost směru a rychlosti větru měla podíl na nezanedbatelném počtu leteckých nehod.

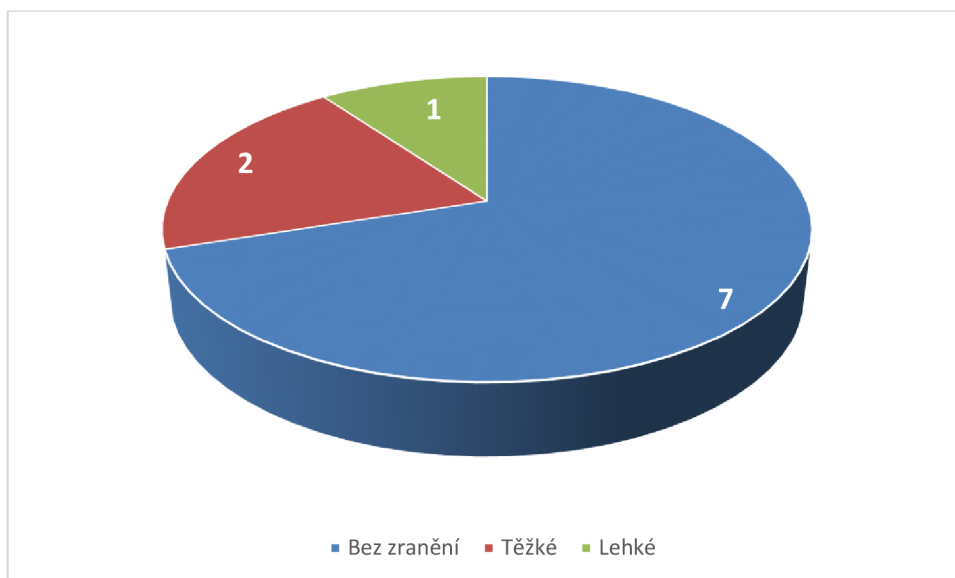
3.1. Nehody a incidenty letounů

Ústav pro vyšetřování leteckých nehod za posledních 10 let (2007 ÷ 2016) vyšetřoval celkem 169 incidentů a nehod letounů. V 10 případech se jednalo o nehody ovlivněné větrem (viz Obr. 5). [18]



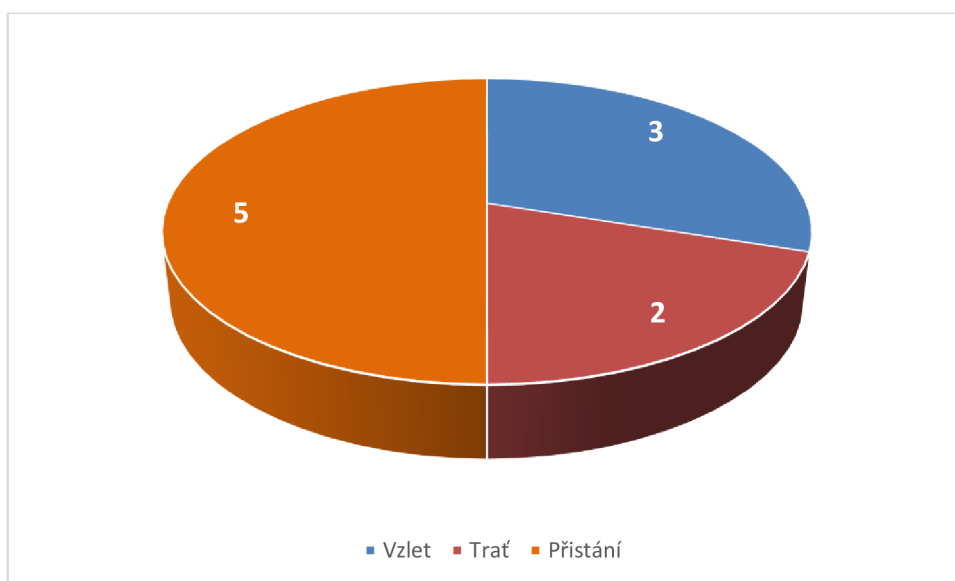
Obr. 5 Vývoj leteckých nehod ovlivněných větrem v ČR v období 2007 - 2016 vyšetřovaných UZPLN. Červené sloupce znázorňují jejich celkový počet v daném roce a modré sloupce počet nehod ovlivněných nesprávným odhadem větru.

Při nehodách ovlivněných větrem naštěstí nedošlo k žádnému smrtelnému zranění, avšak při třech nehodách byly zraněny 4 osoby. Dvě nehody si vyžádaly těžké zranění (viz Obr. 6). Shodou okolností se obě staly na stejném typu letounu ZLIN Z-37A . Jedná se o práškovací letoun, který je z hlediska nesprávného odhadu parametrů větru velmi zranitelný, neboť jeho operační činnost probíhá v malých výškách a rychlostech. Obě nehody Zlínů se také udály za velmi podobných podmínek, kdy pilota v zatáčce na malé rychlosti překvapil silný poryv větru.



Obr. 6 Zranění při nehodách ovlivněných větrem v leteckých nehodách ovlivněných větrem v ČR v období 2007 - 2016 vyšetřovaných UZPLN

Nejvíce větrem ovlivněných nehod se událo v rámci přistávacího manévru (viz Obr. 7). Během přistání je letadlo nejnáchylnější na poryvy větru, neboť letí nízko, rychlostí blízkou pádové rychlosti a s malým výkonem motoru. [18]



Obr. 7 Fáze letu, při nichž došlo k leteckým nehodám ovlivněných větrem v ČR v období 2007 - 2016 vyšetřovaných UZPLN

3.2. Nehoda ovlivněná neznalostí větru

Nehodu s lehkým zraněním dvou osob, která se udála dne 4. 8. 2013, považuji za typickou ukázkou letecké nehody ovlivněné nesprávným odhadem větru. Po nahlášeném střetu s ptákem se pilot rozhodl provést nouzové přistání do terénu. To však pravděpodobně provedl ve stresové situaci se silným zadním větrem, což ve výsledku vedlo k převrácení letadla a zranění obou osob na palubě.



Obr. 8 Virus SW 100 za letu



Obr. 9 Virus SW 100 po nehodě 4.8.2013

Pilot letounu Virus SW 100 registrovaném v Německu přelétal přes území České republiky z Mnichova do Berlína. Přestože měl pilot informace o síle a směru zjištěné během předletové přípravy, povětrnostní situace se během letu změnila kvůli postupující studené frontě. Zatímco v oblasti před studenou frontou byl proměnlivý přízemní vítr o rychlosti 2kt, za frontou, tj. v době nehody vanul západní vítr o síle 20 – 25kt s nárazy až 40kt. Po oblétnutí bouřkové oblačnosti letěl pilot v silně turbulentním prostředí. Za těchto podmínek pilot uslyšel silnou ránu, kterou vyhodnotil jako srážku s ptákem, a rozhodl se nouzově přistát do terénu. To učinil východním směrem, a tak pravděpodobně přistával se zádovým větrem (viz *Obr. 10*).

Po dosednutí na hlavní podvozek pilot vypnul motor. Dle svých slov nechtěl brzdit z obavy před smykem na nerovném povrchu. Po ujetí (400 ÷ 500)m se pravé kolo hlavního podvozku zabořilo, následkem čehož letadlo dopadlo na předové kolo. To náraz nevydrželo, ulomilo se a letoun se pomalu převrátil přes levou stranu.



Obr. 10 Přehled geografické situace místa nehody

Jako příčinu nehody UZPLN určil nesprávné rozhodnutí pilota při oblévání význačné oblačnosti v daných meteorologických podmínkách a nevhodný výběr plochy na přistání. Poznámkou s výběrem plochy zřejmě naráželi vyšetřovatelé na fakt, že necelé 2 kilometry od louky, na kterou se pilot rozhodl přistát, se nacházelo letiště Staňkov.

V závěru komise mimo jiné uvádí, že s velkou pravděpodobností pilot přistával s nezanedbatelnou zadní složkou větru, která ovlivnila i chování letounu ve výběhu. Z porovnání výpovědi pilota a závěru komise tedy vyplývá, že pilot předpokládal přistání za mírného protivětru, avšak ve skutečnosti tomu bylo právě naopak.

Dle mého názoru je možné, že pilot před letem zkontroloval METAR v Berlíně, kam směřoval. Jelikož Berlín nebyl v čase odletu ovlivněn postupující studenou frontou, hlásil v METARU slabý vítr (3÷9)kt v proměnlivém směru od 360° do 60° (v některých hlášeních se však vyskytuje i hodnota 100°). Při oblévání oblačnosti a následné zátěži pilotáže v turbulentním prostředí si tedy pilot nemusel všimnout, že se za studenou frontou otočil směr vanutí větru. Když do toho připočteme stres z předpokládané srážky s ptákem, ztráty řízení a přerušovaným chodem motoru, dostaneme typický obrázek krizové situace, kdy pilot nemá čas ani mentální kapacitu určovat směr větru. Je nutné podotknout, že si ve stresu nevšiml ani blízkosti letiště.

Pokud by měl pilot v dané situaci na palubě dostatečně přehledný zdroj informací o směru větru, nemusely by, dle mého názoru, události dojít až k převrácení letadla. [15, 19]

3.3. Nehoda s úmyslným přistáním se zádočným větrem

Ze zahraničních incidentů jsem vybral nehodu Cirrusu SR22. Ta je specifická v tom, že pilot věděl, že přistává se zádočným větrem. Přestože letiště v americké Kalifornii mělo více než dvojnásobnou délku oproti minimální délce přistání Cirrusu při plném zatížení, letoun přešel přistávací dráhu, za kterou následoval cca 45° sráz (viz Obr. 11).



Obr. 11 Cirrus SR22 po vyjetí z dráhy

Pilot obdržel informaci o zádočném větrem pro dráhu 22, vanoucí rychlostí 5kt. V daný čas však letiště využívala také další letadla, která využívala právě dráhu 22. Pilot si nevyžádal změnu dráhy a rozhodl se přistát na dané dráze i se zádočným větrem. V důsledku vyšší rychlosti vůči zemi přistál až „pár set stop za dotykovou zónou“ a zbylá dojezdová plocha již k zastavení letadla nestačila. [16]

V provozní příručce je definovaná maximální přípustná hodnota zádočného větru 10kt, avšak zároveň uvádí, že pokud je to možné, měl by pilot přistávat s čelním větrem. Význačnou roli při této nehodě pravděpodobně sehrála psychika pilota, který si navzdory pokynů letové příručky nevyžádal změnu dráhy.

4. Měření větru na palubě malého letadla

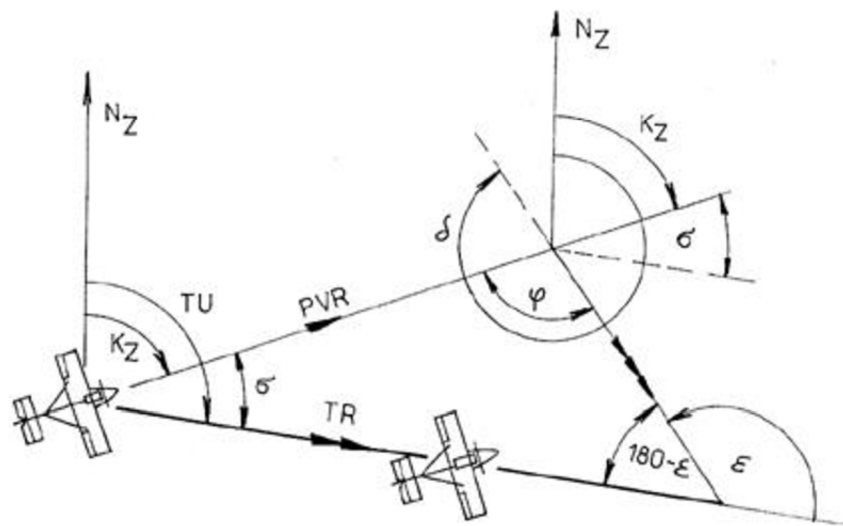
V samých počátcích letectví měli piloti díky absenci krytých kokpitů k povětrnostním podmínkám blíže než jejich současní následovníci. Avšak i tito průkopníci letectví potřebovali správně určit směr a rychlost větru pro navigaci a bezpečné přistání. Rádiové spojení bylo tehdy hudbou budoucnosti, a tak používali základní vizuální pomůcky v okolí letišť – kouř z komínů, větve stromů, a pokud byly k dispozici, větrné rukávy.

Při letu po trati počítali směr a rychlost větru podle jeho snosu. Pilot měl v mapě zaznamenanou trať a traťový kurz, podle kterého by se měl za bezvětrí dostat do dalšího traťového bodu. Pokud byla zjištěna nesrovnalost oproti plánované trati, učinil pilot korekční zatáčku proti směru snosu. Zpočátku byly tyto opravy dělány buďto intuitivně, nebo se pilot přímo vrátil na trať, a až poté pokračoval v letu s vyloučením snosu větru. [1, 14]

4.1. Navigační trojúhelník

K navigačním výpočtům dnes piloti využívají počítače, které dokážou tyto úkony provádět přesněji a v reálném čase. Základní princip se však nezměnil. Je jím navigační trojúhelník, jehož ramena se skládají z vektorů pravé vzdušné rychlosti, traťové rychlosti a vektoru větru. Pilot či počítač do trojúhelníku zanesou známé veličiny a zbylé zjistí početním nebo grafickým řešením. Alternativním způsobem je též zanesení základních údajů do leteckého kalkulátoru.

Při předletové přípravě zná pilot plánovanou trať, plánovanou cestovní rychlost, předpokládaný směr a rychlost větru. Pomocí navigačního trojúhelníku může dopočítat předpokládaný úhel snosu a předpokládanou traťovou rychlost. Tyto informace pak může pilot použít při tvorbě plánu letu pro zajištění přesné navigace.



Obr. 12 Navigační trojúhelník

Základní směry (vektory)

- Zeměpisný kurz letu (směr podélné osy letadla, označen jednou šipkou)
- Traťový zeměpisný kurz (směr pohybu letadla vůči zemi, označen dvěma šipkami)
- Směr vanutí větru (směr odkud vane vítr, označen třemi šipkami)
- Zeměpisný sever (označen indikací N_Z)

Základní skaláry (rychlosti)

- Pravá vzdušná rychlost (TAS viz 4.3.1)
- Traťová rychlost (GS^{13})
- Rychlost vanutí větru (WV^{14})

Základní úhly

- K_Z (úhlový rozdíl mezi zeměpisným kurzem letu a zeměpisným severem)
- TU (úhlový rozdíl mezi zeměpisným traťovým směrem a zeměpisným severem)
- δ (úhlový rozdíl mezi směrem větru a zeměpisným severem)
- σ (úhel snosu je úhel mezi traťovým kurzem a kurzem letu)
- φ (úhel mezi zeměpisným kurzem letu a směrem větru)
- ϵ (úhlový rozdíl mezi směrem větru a zeměpisným traťovým

¹³ Z anglického Ground Speed, jedná se o rychlost letadla vůči zemi

¹⁴ Z anglického Wind Velocity

Základní body

- Výchozí bod tratě (místo vzletu, otočný bod nebo jiný navigační bod, od kterého se počítají parametry letu)
- Koncový bod tratě (bod v terénu, nad kterým je let ukončen)

[20]

4.1.1. Početní řešení navigačního trojúhelníku

se využívá zejména při automatickém zpracování počítačem. Početní řešení probíhá na základě trigonometrických rovnic. Základními vzorci jsou zde sinová a kosinová věta.

Věta sinová

Pro každý trojúhelník ABC, jehož strany mají délky a , b , c a vnitřní úhly α , β , γ platí

$$\frac{a}{b} = \frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma} \quad (3)$$

Věta kosinová

Pro každý trojúhelník ABC, jehož strany mají délky a , b , c a vnitřní úhly α , β , γ platí

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos\alpha \quad (4)$$

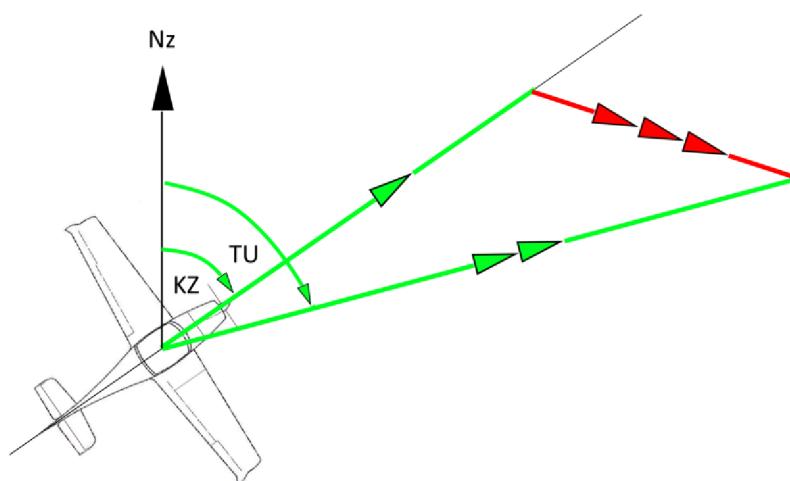
$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos\beta \quad (5)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos\gamma \quad (6)$$

[6]

4.1.2. Grafické řešení navigačního trojúhelníku

je vhodné v případech, kdy pilot malého letadla nepotřebuje znát naprosto přesný směr a rychlost větru a nemá ani čas pro tyto přesné výpočty. V takové situaci je vhodná rychlá a přehledná metoda, která poskytne pilotovi povědomí o aktuálním letu. Může tak například za letu při znalosti traťového kurzu, kurzu letu, pravé vzdušné rychlosti a rychlosti vůči zemi vytvořit rychlý náčrtek, na kterém jednoznačně vidí přibližný směr vanutí větru (viz *Obr. 13*).



Obr. 13 Grafické řešení navigačního trojúhelníku

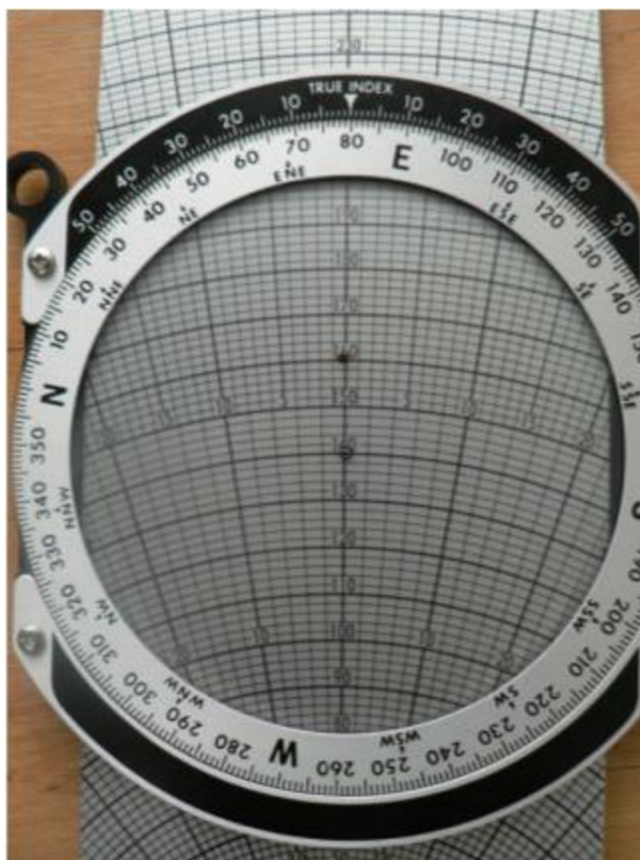
4.1.3. Řešení pomocí navigačního pravítka

Piloti si prakticky od počátků letectví vytvářeli počítadla pro usnadnění výpočtů, které jim umožňovaly přesnější navigaci a tím i zkrácení doby letu. Z těchto podomácky vyrobených počítadel se postupně vyvinuly sofistikované kalkulátory. Na jejich pomoc se mohou piloti spolehnout i v dnešní době v případech selhání elektroniky.

Například kovové pravítko Jeppesen je však primárně určeno k výpočtu traťového kurzu a traťové rychlosti při znalosti směru a rychlosti větru (viz Obr. 14).

Známy směr větru se natočí pod trojúhelník „true index“ na vnější stupnici. Jako další krok je třeba vybrat jakoukoliv tučnou čáru směřující na kovovém pásu zleva doprava. Její střed se umístí do středu plastového okénka. Nad vybranou hodnotou se odpočítá podle množství čar hodnotu rychlosti větru a vyznačí ji tužkou na plastovém okénku. Poté je možné otočit vnitřní stupnici tak, aby pod „true index“ byla nastavena hodnota kurzu letu. Středový pás se posune tak, aby se vyznačená tečka dostala na čáru charakterizující pravou vzdušnou rychlost letadla.

Počet čar doleva či doprava od středu charakterizuje počet stupňů, o které třeba opravit kurz, aby letadlo nebylo větrem vychylováno od zamýšlené trati. Je důležité si uvědomit, že pokud se tečka nachází vpravo od středu, stupně se ke kurzu přičítají, pokud se nachází vlevo, odečítají se. Středem plastového okénka prochází horizontální čára, která má hodnotu traťové rychlosti. [4]



Obr. 14 Navigační pravítko Jeppesen

4.2. Malé letadlo a jeho vybavení

Malá letadla spadají do certifikační kategorie CS 23. Podle tohoto předpisu musí být povinně vybavena rychloměrem, výškoměrem, ukazatelem magnetického směru, ukazatelem teploty vnějšího vzduchu a výstražným zařízením rychlosti. [21]

4.3. Rychloměr

je letecký přístroj sloužící k měření rychlosti letu. Rychlost letu může být měřena vzhledem k okolnímu prostředí letadla, tedy k okolnímu vzduchu, či vzhledem k povrchu Země. Rychlost měřená vůči okolnímu prostředí je nazývána relativní rychlostí, zatímco rychlost měřenou vzhledem k terénu označujeme termínem absolutní rychlost.

Nejdůležitější faktory, způsobující rozdíl mezi absolutní a relativní rychlostí, jsou vítr, vertikální rychlost, členitost terénu a chyby rychloměru. Pro účely měření parametrů větru na palubě letadla je nutné znát obě tyto rychlosti.

Absolutní rychlost je u malých letadel měřena pomocí globálních družicových navigačních systémů či radiolokačních měřičů rychlosti.

Relativní rychlost se nejčastěji měří pomocí membránových rychloměrů. Ty pracují na základě celkového a statického tlaku. V současnosti je obvyklejší převod tlaku na digitální signál a teprve potom jeho další zpracování.

Jednoduché rychloměry měří indikovanou vzdušnou rychlost IAS¹⁵.

$$IAS = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_H)}{\rho_0}} \quad (7)$$

Indikace jednoduchých rychloměrů je způsobena tlakem p_d jenž je pro rychlosti menší než $0,4M$ ¹⁶ označován jako kinetický tlak. Jedná se o rozdíl mezi celkovým tlakem p_c přivedeným ze snímače celkového tlaku a statickým tlakem p_H ze snímače statického tlaku. Tyto údaje jsou přímo, nebo převedené na digitální signál, přeneseny do rychloměru, který indikuje pilotovi informaci o rychlosti letadla. Ve vzorci se vyskytuje také standardní tlak $\rho_0 = 1,225 kg \cdot m^{-3}$.

Indikovaná vzdušná rychlost je důležitá zejména z hlediska aerodynamiky letu, avšak pro navigační účely a určení parametrů větru je použitelný pouze pro menší výšky a rychlosti. Pro ty je potřeba použít pravou vzdušnou rychlost TAS¹⁷.

$$TAS = IAS \sqrt{\frac{p_0 \cdot T_H}{p_H \cdot T_0}} \quad (8)$$

Jednoduchý rychloměr pracuje pouze s údaji celkového a statického tlaku. Ze vzorce pro TAS však vyplývá, že pro její určení je potřeba informace o hustotě vzduchu ρ_H a teplotu T_H ve výšce letu H.

Pro měření pravé vzdušné rychlosti pomocí membránového rychloměru se využívá rychloměr s částečnou, či úplnou hustotní korekcí. Rychloměr s částečnou hustotní korekcí je v podstatě jednoduchý rychloměr doplněný o hustotní korekční zařízení, avšak pro konstrukční obtížnost se teplota pouze dopočítává na základě změřeného statického tlaku.

¹⁵ Z anglického Indicated Air Speed

¹⁶ Machovo číslo je dáno poměrem pravé vzdušné rychlosti letadla vůči lokální rychlosti zvuku

¹⁷ Z anglického True Air Speed

Převod informací o tlaku do digitální podoby má tak mimo jiné výhodu eliminace konstrukčně náročného zavádění informace o teplotě do rychloměru. Je také nezbytný pro další automatické výpočty parametrů letu, například výpočet rychlosti a směru větru. [7]

4.3.1. Rychlosti využívané v letectví

- IAS je údaj rychloměru úměrný rozdílu statického a dynamického tlaku
- CAS je kalibrovaná rychlost (Calibrated Air Speed) jedná se o IAS opravenou o přístrojovou a polohovou chybu ¹⁸
- EAS je ekvivalentní rychlost (Equivalent Air Speed) jedná se o CAS opravenou o vliv stlačitelnosti vzduchu
- TAS je pravá vzdušná rychlost, rychlost letadla vůči nerozrušenému vzdušnému prostředí. Jedná se o EAS opravenou o vliv výšky letu ¹⁹ [7]

4.3.2. Chyby leteckých rychloměrů

Dle normy CS-23 nesmí chyba indikace vzdušné rychlosti překročit 3% kalibrované rychlosti letu nebo 5kt, podle toho, která z chyb je větší v následujících rozsazích rychlostí:

- a) 1,3 V_{S1} až V_{MO}/M_{MO} nebo V_{NE} , podle toho, který rychlost odpovídá rychlosti se zasunutými vztlakovými klapkami.
- b) 1,3 V_{S1} až V_{FE} s vysunutými vztlakovými klapkami [21]

4.4. Ukazatel magnetického směru

je další z povinných přístrojů na palubě malého letadla. Samotná magnetická navigace, využívající přirozený magnetismus Země, je po astronavigaci druhou nejstarší navigační metodou. Nejstarší dochované písemné záznamy o konstrukci a výrobě magnetických kompasů pocházejí ze 13. století z italského Janova. Ze stejného období pochází také označení severního a jižního pólu magnetu. [7]

4.4.1. Magnetický kompas s přímou indikací

je nejjednodušším přístrojem pro měření magnetického kurzu. Základem je deska, na které je vyobrazena směrová růžice. V jejím středu je trn sloužící jako ložisko pro otočnou magnetickou střílku. Pro dosažení minimálního tření je trn vyroben zpravidla z tvrdého kovu. Střílka je v těžišti opatřena ložiskem, které je buďto také z tvrdého kovu, nebo z ložiskového kamene tak, aby bod závěsu střílky byl mírně pod jejím těžištěm.

¹⁸ polohová chyba je chyba způsobená umístěním snímače tlaku do oblasti ovlivněné letadlem

¹⁹ s rostoucí výškou letu klesá hustota vzduchu

Magnetické kompasy s přímou indikací se vyskytují prakticky v každém letadle, avšak většinou slouží pouze jako záložní přístroj. [7]

4.4.2. Indukční magnetický kompas

se skládá z budících cívek a ze tří magnetometrických sond umístěných na společné kruhové základně. Citlivé osy jsou uspořádány do trojúhelníku, či do hvězdy. Signální sondy jsou umístěny na tenkých plíšcích z magneticky měkkého materiálu²⁰. Budící vinutí je napájeno malým napětím o frekvenci 400 Hz a periodicky mění permeabilitu jader. V signálním vinutí se indikuje napětí o frekvenci 800 Hz a jeho amplituda závisí na poloze sondy k magnetickému poli Země. Výstupní signál tvoří třífázové napětí, které je jednoznačnou informací o magnetickém kurzu.

Indukční magnetický kompas byl vyvinut v polovině minulého století za účelem eliminace chyb zanesených kompasem s přímou indikací. [2, 3, 7]

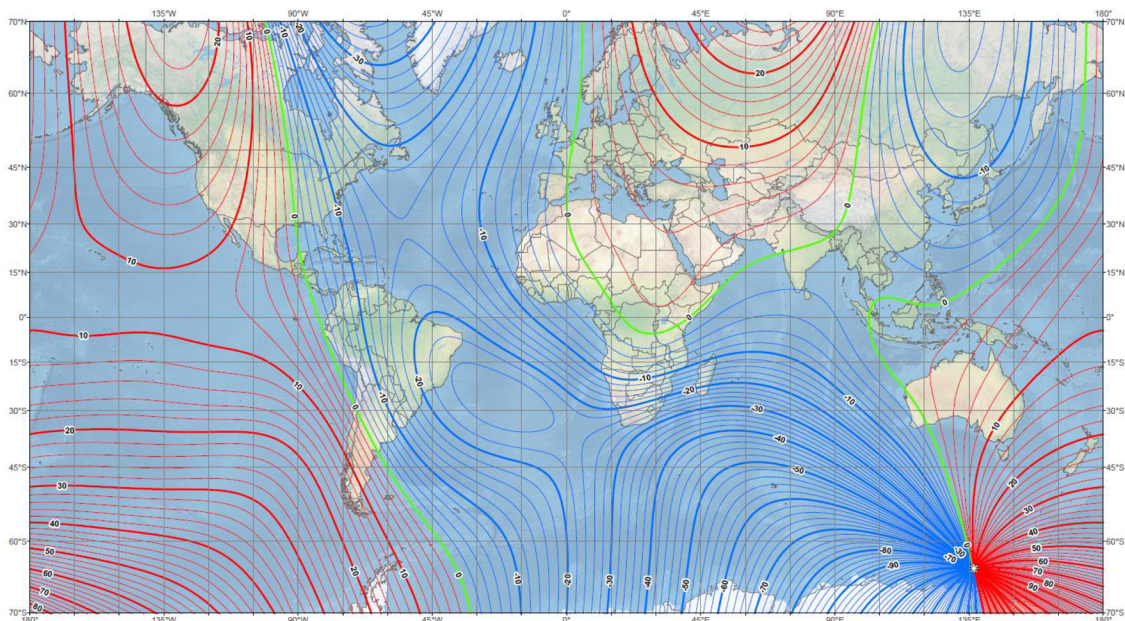
4.4.3. Digitální magnetický kompas

obsahuje dvě sondy pro měření kurzu. Jejich citlivé osy leží v horizontální rovině a jsou navzájem kolmé, přičemž je vhodné je ztotožnit s podélnou a příčnou osou letadla. Sondy měří kosinovou a sinovou složku vektoru intenzity geomagnetického pole, jejichž hodnoty jsou závislé na kurzovém úhlu. Současné mikroprocesorové systémy pak umožňují opravy deviace, deklinace, kompenzaci kompasu a předávat informaci z kompasu do dalších leteckých přístrojů. Digitální magnetický kompas je také nezbytný pro automatický výpočet rychlosti a směru větru. [7]

4.4.4. Magnetická deklinace

Magnetické pole obklopující Zemi se nazývá magnetosféra a jeho siločáry mají přibližně jiho-severní směr. Spojnice jižního a severního pólu vedoucí po povrchu Země se nazývá poledník. Zemské magnetické póly nejsou totožné se zeměpisnými póly, ani nemají na rozdíl od zeměpisných pólů pevnou polohu. Úhel mezi magnetickým a zeměpisným poledníkem se nazývá deklinace. Východní deklinace se označuje jako kladná, zatímco západní jako záporná. V České republice dosahovala deklinace v roce 2015 hodnot cca -4° (viz Obr. 15).

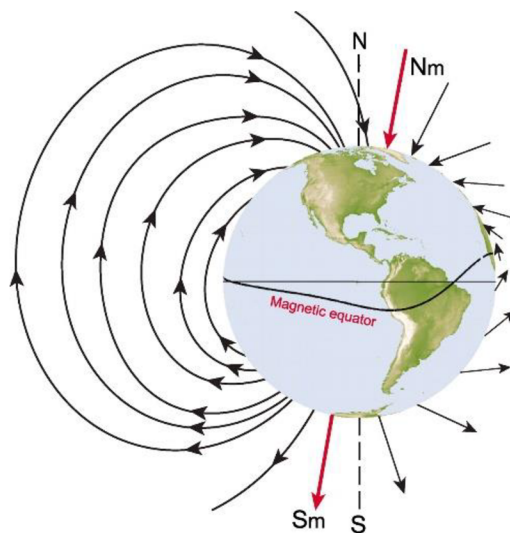
²⁰ snadno zmagnetizovatelný materiál



Obr. 15 Magnetická deklinace země v roce 2015 (modré čáry znázorňují zápornou hodnotu, červené kladnou a zelené nulovou)

4.4.5. Magnetická inklinace

je úhel, který svírá místní vektor intenzity zemského magnetického pole s místní vodorovnou rovinou. V navigaci využíváme magnetický kompas pro indikaci horizontální složky intenzity magnetického pole. Ta je nejvýraznější v oblastech malých zeměpisných šířek. Naopak v oblastech magnetických pólů je téměř zcela nahrazena vertikální složkou magnetického pole, což činí magnetický kompas pro navigaci v těchto oblastech prakticky nepoužitelný. V České republice je stálá složka inklinace o hodnotě cca 66° .



Obr. 16 Schéma siločar magnetického pole Země

Pro kompasu používané na severní polokouli se na jižní konec magnetů umísťují malá závaží, která slouží jako korekce magnetické inklinace, která by mohla způsobovat nadměrné tření v ložisku kompasu. U kompasů používaných na jižní polokouli se toto závaží přidává na severní konec magnetu. [1,2,7]

4.4.6. Deviace magnetického kompasu

Údaje magnetického kompasu jsou ovlivňovány nejen magnetickým polem Země, ale také místními rušivými vlivy na palubě letadla. Ty jsou způsobeny magneticky tvrdými a magneticky měkkými materiály, magnetickými poli elektrických vodičů, popřípadě dalšími zdroji. Tyto rušivé vlivy způsobují deviaci magnetického kompasu. Tu je možné do určité míry kompenzovat, například pomocí deviačních strojků, které jsou součástí magnetických kompasů s přímým čtením. Dále je možné deviaci částečně předcházet pomocí vhodného umístění kompasu, či jeho senzorů do míst s minimem rušivých vlivů. U magnetického kompasu s přímým čtením je to rám předního štítu přístrojové desky pilotní kabiny. U kompasů s externími sondami pro měření magnetického se tyto měřiče umísťují na okraje křídel, či ocasní plochy, kde se vyskytuje minimum rušivých vlivů. [7]

4.4.7. Celková chyba ukazatele magnetického směru

Dle CS23 nesmí z důvodu deviace v jakémkoliv směru přesáhnout 10° . Chyby deklinace mohou být daleko větší²¹, ale také snadněji kompenzovatelné pomocí mapových podkladů. Chyba inklinace je při stálém horizontálním letu v oblastech České republiky zanedbatelná. [7,21]

4.5. Určení snosu s pomocí pozemních radiomajáků

Systém spolupráce s pozemními majáky byl vypracován s cílem zpřesnění letecké navigace na dlouhé vzdálenosti. Jeho prioritou je určit polohu letadla vzhledem ke statickému radiomajáku. Údaje o poloze letadla lze porovnat s aktuálním kurzem a tím určit snos větru. Tento způsob určování parametrů větru lze použít i za letu bez vizuálního kontaktu se zemí. Nevýhodou však je omezený dosah radiomajáků a zhoršující se přesnost s rostoucí vzdáleností od nich.

Ze základního požadavku práce s pozemními radiomajáky – nutnosti přímé viditelnosti, se dá spočítat jejich maximální teoretický dosah (viz vzorec (9)).

²¹ až 180° v prostoru mezi zeměpisným a magnetickým pólem

$$R_{max} = 1,25 \cdot \sqrt{h_1 + h_2} \quad (9)$$

Kde: R_{max} je odhadovaný dosah signálu v námořních mílích

h_1 je nadmořská výška letadla ve stopách

h_2 je nadmořská výška radiomajáku ve stopách

Ze vzorce vyplývá, že dosah radiomajáku závisí na výšce letu. Pomocí této metody lze tedy poměrně přesně určit snos větru během letu v cestovní hladině. Při přistávacím manévru, který probíhá v malých výškách, však tato metoda není příliš vhodná. [2]

4.5.1. NDB

je jeden z nejstarších navigačních radiomajáků. I přes svou morální a technickou zastaralost stále přítomný v kokpitech moderních letadel a například ve Velké Británii je stále hustá síť NDB. Důvody jsou malá poruchovost a nízké provozní náklady. Zkratka z anglického „Non Direcional Beacon“ se do češtiny překládá jako nesměrový radiomaják. Vysílá signál na středních vlnových délkách pomocí všesměrové antény. Nejčastější kmitočet je v rozmezí (200-500) kHz. Chyba systému je dána třídou přesnosti (viz Tab. 2) avšak nejčastěji se pohybuje v rozmezí (5 ÷ 7)°.

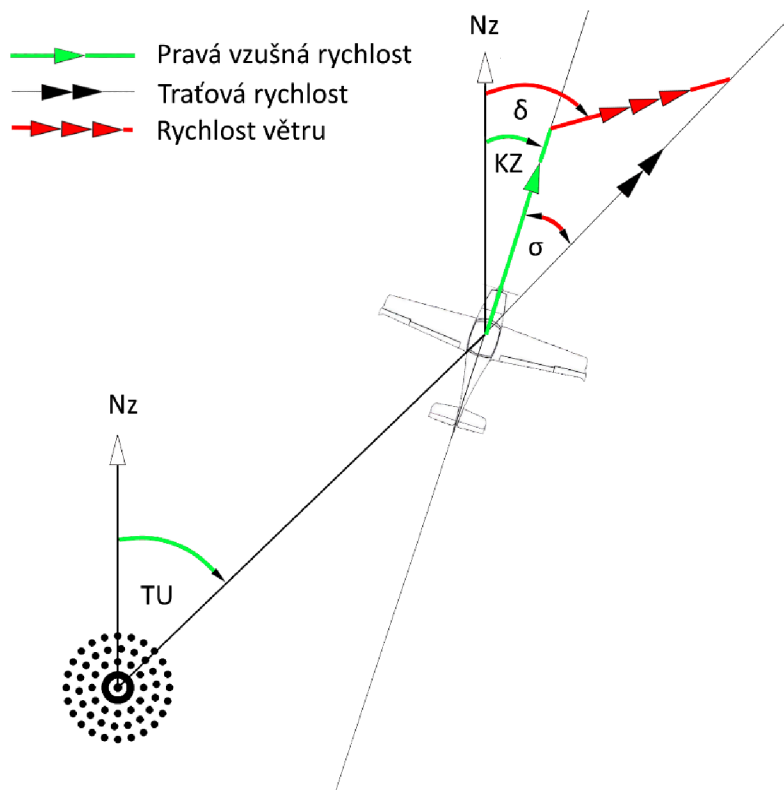
Třída	A	B	C	D
Chyba měření	±2°	±5°	±10°	Větší než ±10°

Tab. 2 Přesnost systému NDB v úhlových stupních

Signál z NDB je na palubě letadla měřený pomocí automatického rádiového kompasu ADF²². Ten určí směr příchodu rádiové vlny vůči podélné ose letadla. Výsledná informace pak putuje buďto do palubního počítače, nebo přímo k pilotovi pomocí palubního indikátoru radiokompasu. Pro účely měření parametrů větru je nejvhodnější indikátor RMI²³, neboť je kurz k NDB indikován spojitě, a tak je možné určit snos větru. [2,11]

²² Z anglického Automatic Direction Finder

²³ Z anglického Radio Magnetic Indicator



Obr. 17 Znamé a neznámé informace při navigaci pomocí NDB

Navigace pomocí NDB (viz Obr. 17), kdy letadlo udržuje traťový kurz pro stabilní zaměření QTE. Zeleně jsou na obrázku znázorněny informace, které má pilot k dispozici – v tomto případě je to pravá vzdušná rychlost určená z rychloměru, zeměpisný kurz letadla určená z kompasu a traťový zeměpisný kurz určený pomocí RMI. Červeně jsou označené informace, které pilot potřebuje dopočítat – rychlost větru, směr větru a úhel snosu σ .

$$\sigma = TU - K_Z \quad (10)$$

Ze známých informací však dokážeme dopočítat pouze úhel snosu, díky kterému lze provést let na daném radiálu s vyloučením snosu větru. Bez znalosti traťové rychlosti není možné spočítat rychlost větru, avšak lze získat alespoň přibližný přehled o směru větru.

Přesnost výpočtu je nejvíce ovlivněná chybou NDB, vedle níž jsou ostatní chyby jako chyba při určování magnetické deklinace a kompasové deviace zanedbatelné. [2]

4.5.2. VOR-DME

je dvojice sružených radionavigačních zařízení se stejným identifikačním kódem. Všesměrový maják VOR slouží k určování magnetického radiálu letadla, zatímco DME měří šikmou vzdálenost mezi letadlem a pozemním zařízením.

Všesměrový maják VOR²⁴ působí v pásmu velmi krátkých vln. Mezi kmitočty (108 ÷ 117,85) MHz se nachází 160 kanálů pro vysílání signálu. Oproti systému NDB se VOR vyznačuje vyšší přesností (2 ÷ 6)°.

Základem funkce systémů VOR je porovnávání fází. To znamená měření rozdílu fáze proměnného signálu od fáze referenčního signálu. Díky tomu je možné na palubě letadla přesně určit, na kterém se letoun nachází. Také signál VOR lze indikovat pomocí RMI a získat tak informace o snosu větru (viz *Obr. 18*). [2,11]



Obr. 18 Indikátor RMI

Funkce palubního dálkoměru DME²⁵ je založena principu měření času, který potřebuje radiový signál k překonání vzdálenosti od letadla k pozemnímu radiomajáku a zpět k letadlu. Na palubě je umístěn dotazovač vysílající signály, které pozemní stanice přijme a s přesně definovaným zpožděním²⁶ vyšle zpět na jiné frekvenci. DME pracuje v kmitočtovém pásmu (962 ÷ 1213)MHz a umožňuje měřit vzdálenost do 200NM²⁷. Mimo měření vzdálenosti dokáže DME také díky spojitému příjmu signálu dopočítat aktuální traťovou rychlost k pozemnímu majáku nebo od něj. To je z hlediska problematiky této práce velmi důležité, neboť to umožňuje výpočet parametrů větru.

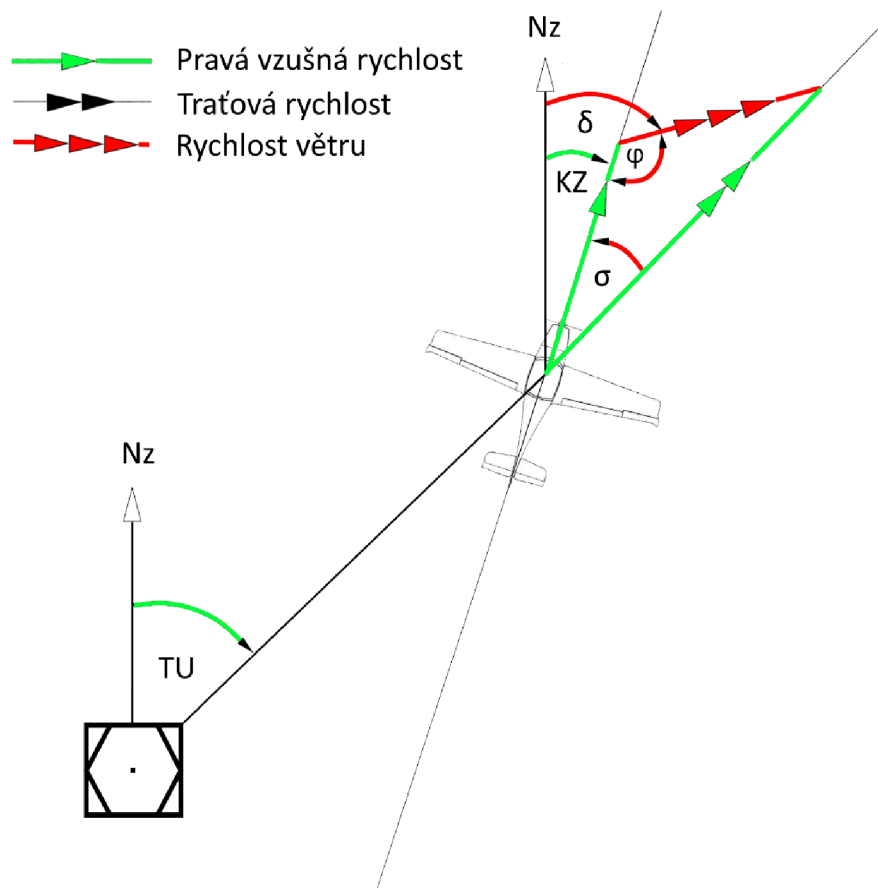
Přesnost DME je ovlivněna chybami obvodů palubního a pozemního zařízení, vlivem poruch v přenosovém kanálu a vlivem interference signálů v prostoru. Celková chyba by neměla překročit hodnotu 0,2NM.

²⁴ Z anglického VHF Omni-directional Range

²⁵ Z anglického Distance-Measuring Equipment

²⁶ 50 μ s

²⁷ Námořní míle (anglicky Nautical Mile) 1NM=1,852km



Obr. 19 Znamé a neznámé informace při navigaci pomocí VOR/DME

Při letu po zvoleném radiálu VOR je možné využitím systému VOR-DME spočítat rychlost a směr větru (viz Obr. 19). Radiál VOR je určován od magnetického severu. Je tedy nutné jej přepočítat na zeměpisný radiál pro určení traťového zeměpisného úhlu. Dále známe vzdušnou rychlost indikovanou rychloměrem a kompasový kurz letadla. Z těchto údajů opravených o chyby dokážeme určit na obrázku zeleně označený traťový zeměpisný úhel, zeměpisný kurz letadla, pravou vzdušnou rychlost a díky údajům z DME také traťovou rychlost. Díky těmto údajům je možné spočítat rovnice (11)÷(14). [2]

$$\sigma = TU - K_Z \quad (11)$$

$$\begin{aligned} WV &= \sqrt{TAS^2 + GS^2 - 2 \cdot TAS \cdot GS \cdot \cos(\sigma)} = \\ &= \sqrt{TAS^2 + GS^2 - 2 \cdot TAS \cdot GS \cdot \cos(TU - K_Z)} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{TAS^2 + WV^2 - GS^2}{2 \cdot TAS \cdot WV}\right) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \delta &= K_Z + |\varphi| \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} = WD = K_Z + \arccos\left(\frac{TAS^2 + WV^2 - GS^2}{2 \cdot TAS \cdot WV}\right) \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} = \\ &= K_Z + \arccos\left(\frac{TAS - GS \cdot \cos(TU - K_Z)}{\sqrt{TAS^2 + GS^2 - 2 \cdot TAS \cdot GS \cdot \cos(TU - K_Z)}}\right) \cdot \frac{TU - K_Z}{|TU - K_Z|} \end{aligned} \quad (14)$$

Ve vzorci (14) se vyskytuje operátor $\frac{\sigma}{|\sigma|}$ zajišťující správné znaménko při přičítání či odečítání úhlového rozdílu mezi zeměpisným kurzem letu a zeměpisným směrem větru.

4.6. Globální navigační satelitní systém

Hlavní problém určování polohy letadla pomocí pozemních radiomajáků je dosah omezený okolním terénem. Jejich vývoj začal před druhou světovou válkou, kdy lidstvo teprve nesměle snilo o letech do vesmíru. Rozvoj kosmonautiky však dal leteckým inženýrům možnost opřít se od pozemních majáků a využít družic jako vesmírných majáků. Tato převratná myšlenka znamenala vznik celosvětové navigační sítě pro určení polohy na Zemi GNSS²⁸. O vývoj tohoto systému měly zájem obě dvě supervelmoci tehdejší doby – Spojené Státy Americké a Sovětský svaz. Později na svých vlastních konceptech začali pracovat i Evropská kosmická agentura a další.

Princip měření parametrů větru pomocí satelitní navigace je prakticky identický s výše uvedenými. Díky spojitě indikaci polohy je možné spočítat rychlost letadla vůči zemi. Při známé pravé vzdušné rychlosti TAS je pak možné určit nejen snos větru ale také jeho čelní složku. [3,11]

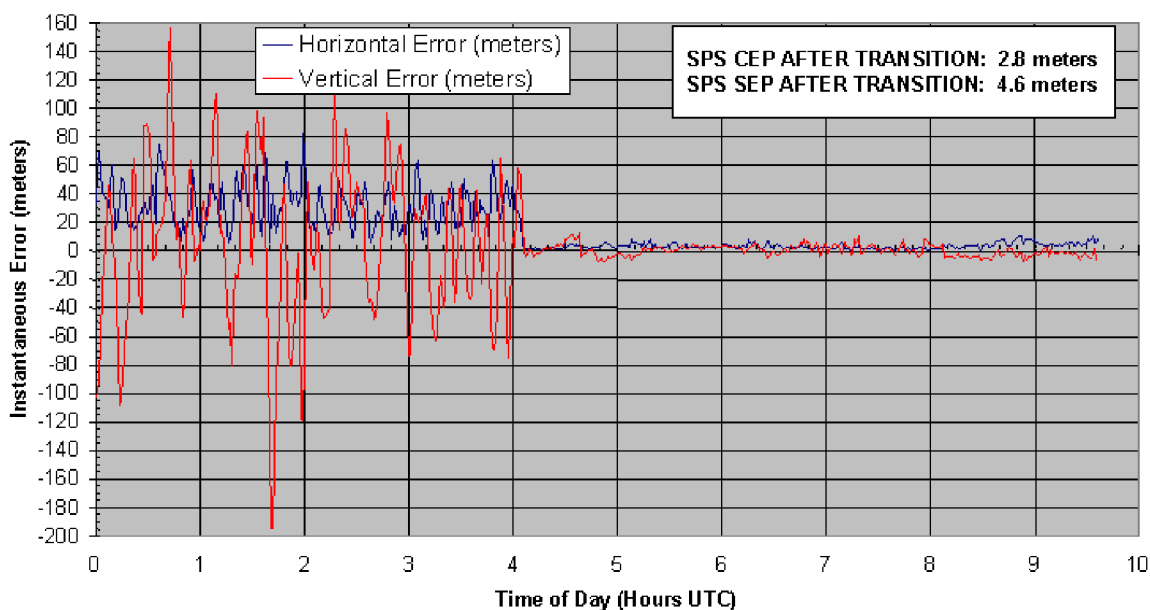
4.6.1. GPS

Nejrozšířenější navigační systém se podařilo vytvořit v USA. Zkratka GPS pochází z anglického „Global Position System“ a jedná se o družicový navigační systém provozovaný ministerstvem obrany USA. V některých zdrojích lze nalézt také název NAVSTAR z anglického „Navigation System using Time And Range“. Jedná se o dva názvy stejného produktu, z nichž GPS je zažitější, avšak oba názvy jsou správně. GPS poskytuje dvě základní služby – standardní a přesnou. Standardní služba SPS (Standard

²⁸ Z anglického Global Navigation Satellite System

Positioning Service) je zdarma, volně dostupná každému, kdo vlastní GPS přijímač. Oproti tomu přesná služba PPS (Precision Positioning Service) je poskytována pouze úzké skupině uživatelů pro vojenské využití, zejména členů NATO, kteří s USA podepsali zvláštní dohodu takzvané Memorandum o porozumění.

Satelity GPS vysílají v současné době 2 signály v UKV frekvenčním pásmu. Zatímco signál L1 s nosným kmitočtem 1575,42 MHz je dostupný pro všechny, signál L2 na nosném kmitočtu 1227,6 MHz je určený pouze pro služby PPS. Celková přesnost závisí zejména na chybách v měření času, určení polohy družic na orbitě, šumů v obvodu nebo vlivu ionosféry. Do května roku 2000 byla také do signálu L1 přidávána chyba SA²⁹, aby bylo znemožněno vojenské využití služeb SPS. Odstraněním této dodatečné chyby se systém pro běžné uživatele velmi zpřesnil (viz Obr. 20). V současné době se pohybuje přesnost systému GPS v řádech jednotek metrů, avšak spíše se dá spoléhat na hodnoty okolo 10m. Přesnost určení traťové rychlosti se při nízkých rychlostech pohybuje s 95% pravděpodobností s maximální chybou 1kt. [2,7, 22]



Obr. 20 Závislost přesnosti služeb SPS GPS na chybě SA

- Svislá osa grafu značí hodnotu chyby přesnosti služby SPS v metrech
- Vodorovná osa značí čas v hodinách
- Modrá křivka značí horizontální složku navigační chyby
- Červená křivka označuje vertikální složku navigační chyby [3,12]

²⁹ Z anglického Selective Availability, jedná se o provozovatelem uměle vyvolanou chybu

4.6.2. GLONASS

vznikl jako konkurence GPS v tehdejší Sovětském Svazu. Zkratka pochází z ruského originálu „Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistéma“ neboli Globální navigační satelitní systém. Současným provozovatelem je Ruská armáda, která poskytuje tento systém s omezenou přesností také civilním uživatelům.

GLONASS vysílají v UKV frekvenčním pásmu podobně jako GPS dva signály. L1OF/L2OF je veřejně přístupný pro širokou veřejnost, zatímco přesnější L1SF/L2SF je určený pouze pro potřeby ruské armády. Oproti GPS vysílá každý satelit systému GLONASS na jiné frekvenci. V současné době dosahují systémy GLONASS a GPS podobných přesností $\pm 10\text{m}$. [2]

4.6.3. Galileo

Evropská kosmická agentura spustila v prosinci roku 2016 testovací provoz jejich vlastního globálního navigačního polohového systému. V současné je na oběžné dráze pouze 18 družic z plánovaných třiceti. Z toho důvodu pro účely testování využívá Galileo satelitů obou konkurentů – tedy GLONASS i GPS. Jakmile bude všech 30 satelitů usazeno na orbitě, měl by být tento systém nejpřesnější satelitní navigací současnosti. Využívá ve svých satelitech přesnější vodíkovo-maserové atomové hodiny, díky kterým by měla přesnost dosahovat řádu centimetrů. Právě atomové hodiny však možná budou důvodem zpoždění plánovaného termínu plného operačního nasazení, které má začít do roku 2020. Kvůli poruchám atomových hodin na již vypuštěných satelitech se nyní uvažuje o odložení vypouštění dalších satelitů.

Galileo bude obsahovat dohromady 5 druhů služeb, přičemž každý bude adresován jiné cílové skupině:

- OS (Open Service) Volná služba
- CS (Comercial Service) Placená služba
- SoL (Safety of Life) – pro použití v případě ohrožení života
- PRS (Public Regulated Service) – šifrovaná služba pro vládní činitele
- SAR (Search and Rescue) – služba pro záchranné složky [2]

4.6.4. Měření parametrů větru pomocí GNSS

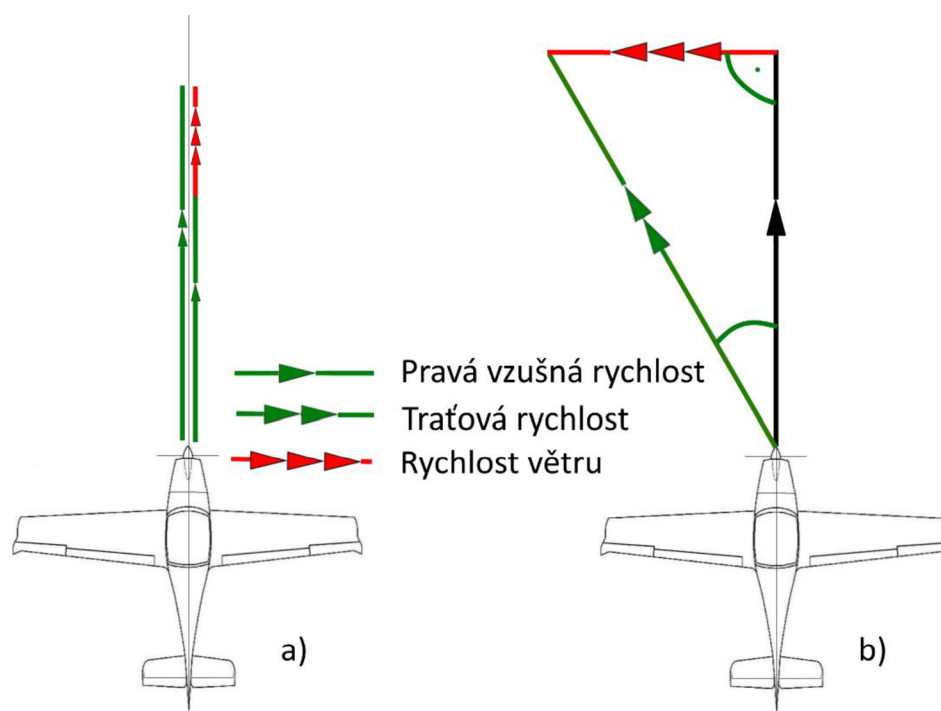
je možné využívat doslova po celém světě, neboť není zapotřebí dosah radiomajáků, ani vizuální kontakt se zemí. Teoreticky můžeme rozdělit vanutí větru na 3 situace:

- let rovnoběžně s prouděním větru
- let kolmo na proudění větru
- let příčně k proudění větru

V případě, že neexistuje žádná kolmá složka větru, využíváme údaje z rychloměru pro určení rychlosti letu a údaje z GNSS o traťové rychlosti (viz Obr. 21a). Rychlost větru lze pak jednoduše určit pomocí vzorce (15).

$$WV_x = GS - TAS \quad (15)$$

Čelní vítr je pak vyjádřen zápornou hodnotou, zatímco zádový vítr kladnou. Směr letu není potřeba počítat, neboť je rovnoběžný se směrem letu.



Obr. 21 Znamé a neznámé informace při navigaci pomocí GNSS a) rovnoběžně s prouděním větru b) kolmo na proudění větru

Při absenci čelní a zádové složky větru jsou potřeba pro výpočet směru a rychlosti větru kurz letu, traťový kurz a traťová rychlost určené pomocí GNSS (viz Obr. 21 Znamé a neznámé informace při navigaci pomocí GNSS a) rovnoběžně s prouděním větru b) kolmo

na proudění větru Obr. 21b). S danými informacemi je možné dopočítat rychlost větru WV (viz vzorce (16), (17)).

$$\sigma = TU - K_Z \quad (16)$$

$$WV_Y = \sin \sigma \cdot GS \quad (17)$$

První dvě situace prakticky nemohou nastat, neboť vždy existuje alespoň malá hodnota vodorovné a kolmé složky větru. V podstatě je to vždy příčný vítr, který se více, či méně přiklání i ideálním situacím podélného nebo příčného větru. Podle toho je možné využít zjednodušených vzorců (15)÷(17). V takovém případě je však nutné počítat s rostoucí chybou přesnosti určení parametrů větru, neboť jsou některé složky zanedbány.

Jednoduchost vzorců (15)÷(17) je však také jejich velkou výhodou, neboť je pilot dokáže, alespoň částečně, propočítávat sám, bez využití počítače. V praxi je pak může, mimo jiné, využít v grafickém řešení navigačního trojúhelníku (viz 4.1.2).

Parametry příčného větru je možné počítat buďto kombinací zjednodušených výpočtů kolmého a vodorovného větru dle vzorce ((18) nebo pomocí komplexní metody při využití vzorců (11)÷(14) z kapitoly 4.5.2.

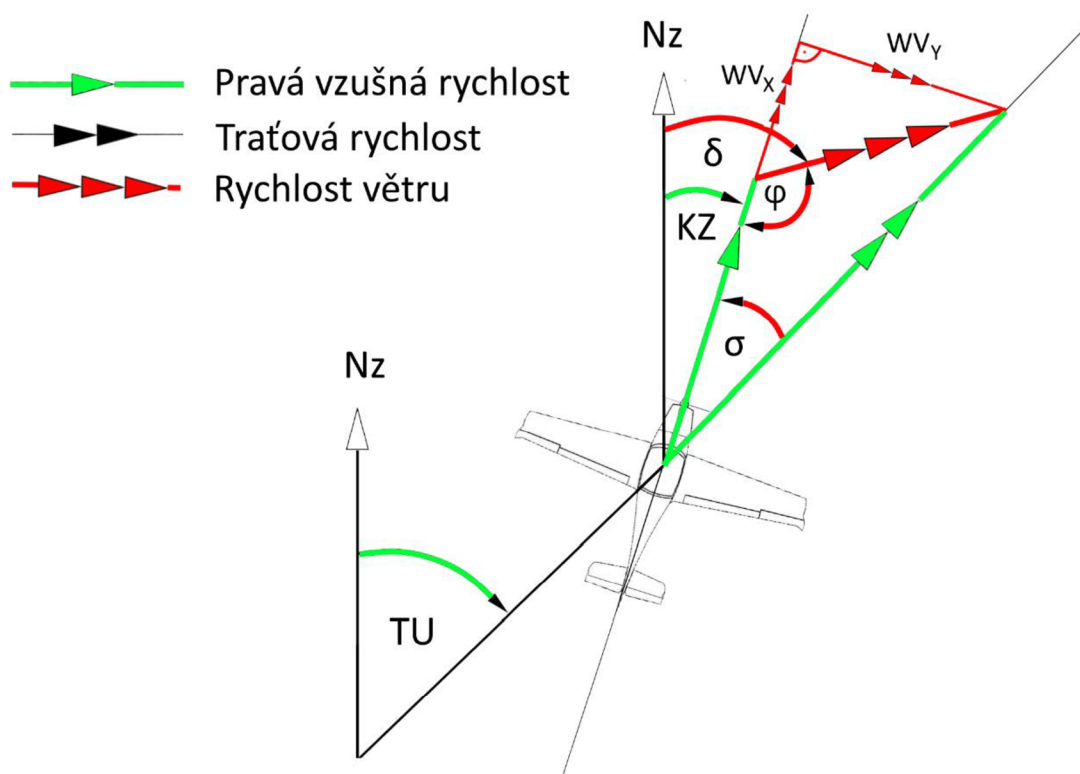
$$WV = \sqrt{WV_X^2 + WV_Y^2} = \sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2} \quad (18)$$

$$\varphi_X = \arccos\left(\frac{WV_X}{WV}\right) = \arccos\left(\frac{GS - TAS}{\sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2}}\right) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \delta &= K_Z + |\varphi_X| \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} = \\ &= K_Z + \left| \arccos\left(\frac{GS - TAS}{\sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2}}\right) \right| \cdot \frac{TU - K_Z}{|TU - K_Z|} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\varphi_Y = \arcsin\left(\frac{WV_Y}{WV}\right) = \arcsin\left(\frac{\sin(TU - K_Z) \cdot GS}{\sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2}}\right) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \delta &= K_Z + |\varphi_Y| \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} = \\ &= K_Z + \left| \arcsin\left(\frac{\sin(TU - K_Z) \cdot GS}{\sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2}}\right) \right| \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} \end{aligned} \quad (22)$$



Obr. 22 Známé a neznámé informace při navigaci pomocí GPS při letu příčně k proudění větru

4.7. Optická metoda

Značného pokroku měření parametrů větru na palubě letadla bylo dosaženo během druhé světové války. Bombardéry obou stran potřebovaly pro přesné taktické shazování bomb přesně určit snos větru pro jeho následné vyloučení. To zpočátku prováděl navigátor a bombometčík v jedné osobě. Přes zaměřovač zjistil rozdíl mezi podélnou osou letadla a ubíhajícím terénem pod letadlem. Ještě ke konci války pak byly do tohoto procesu zakomponovány tehdejší počítače. Tyto počítače, ač se z dnešního pohledu mohou zdát primitivní, významně zpřesnily měření snosu větru.

Od této metody se postupně upustilo z důvodu nutnosti vizuálního kontaktu se zemí, avšak pro účely ultralehkých letadel, které ze zákona nesmí létat nad oblačností a rozsáhlými vodními, či zalesněnými oblastmi může opět najít své uplatnění.

Pomocí kamery umístěné pod letadlem a vycentrované vůči souřadnicovým osám letadla je možné zjistit úhel snosu na základě výše popsanych principů. Zásadním problémem této metody je však nutnost stabilního horizontálního letu pro přesné výpočty.

Aby byla optická metoda pro měření parametrů větru funkční, je potřeba do ní zanést informace o rychlosti. Vzdušnou rychlost je možné získat z rychloměrů na palubě letadla nebo je možné pro úplnou nezávislost tohoto systému instalovat samostatný rychloměr. V případě traťové rychlosti je zde možnost využít informace o traťové rychlosti z ostatních zařízení jako GPS nebo DME. Traťová rychlost se dá zjistit také pomocí vyhodnocení záběrů kamery. K tomu je potřeba znát přesnou výšku nad terénem nebo rozměry pozorovaných objektů. Výšku nad terénem je možné změřit radiovýškoměry, avšak jejich cena i náklady na provoz jsou vysoké. Větší potenciál osobně vidím v digitálním mapovém podkladu, který by bylo možné srovnávat se záběry z kamery. Tato srovnávací metoda je však velmi náročná na výpočetní kapacity, a tak bude ještě nějaký čas trvat, než se její spolehlivost a cena dostanou do oblasti vhodné pro civilní letectví.

5. Testovací let

Testovací let byl proveden na letounu Aerospool WT9 Dynamic. Po vzletu z letiště Křižanov pobíhal let v následujících fázích (viz Obr. 24):

- let s čelní složkou větru
- let s bočním větrem (kolmo k vanutí větru)
- let příčně k vanutí větru
- let se zádovou složkou větru

Vyhodnocovaná část letu proběhla v nadmořské výšce 5000 stop³⁰ a trvala přibližně 20 minut. Celková délka letu byla 34 minut.



Obr. 23 GPS souřadnice přenesené do mapového podkladu Google Maps. Modrá šipka značí směr vanutí větru dle meteorologické předpovědi.

5.1. Přístrojové vybavení testovacího letu

Testovací let byl proveden na letounu Aerospool WT9 Dynamic, ve kterém se nacházela navigace Garmin GX3 a kamera GoPro Hero 1.

³⁰ 5000 stop se přibližně rovná 1500m

Navigace Garmin GX3 shromažďuje, mimo jiné, data o pravé vzdušné rychlosti, traťové rychlosti, magnetickém kurzu letu, deklinaci a traťovém zeměpisném úhlu letu. Z těchto informací navigace samostatně dopočítává směr a rychlost větru, které následně indikuje pilotovi (viz Obr. 24).



Obr. 24 Indikace parametrů větru Garmin GX3 (červeně zvýrazněný rámeček v levém horním rohu). Levý obrázek ukazuje indikaci magnetického směru a rychlosti v mílech za hodinu³¹. Levý obrázek zobrazuje indikaci rychlostí čelního a bočního větru.

Kamera GoPro Hero 1 byla namontována pod horizontálním stabilizátorem, natočená rovnoběžně s podélnou osou letadla tak, aby zachycovala terén ve svislé ose pod letadlem. Jakékoliv poryvy působící na letadlo a náklony letadla se pak přenášely i na samotnou kameru. Tento problém by bylo možné vyřešit například gyroskopickou stabilizací kamery, která se běžně používá u bezpilotních letadel či do jisté míry digitálně stabilizovat obraz. V rámci vyhodnocování záběrů z kamery nebyl obraz dodatečně stabilizován.

Dalším problémem, na který jsem během zpracovávání dat z pokusného letu narazil, bylo soudkovité zkreslení záběrů pořízených na kameru GoPro. Na první pohled logický výběr outdoorové kamery, která bez úhony během letu snese podmínky vně letadla, se ukázala problematickou s ohledem na vyhodnocení zkresleného obrazu. Ten bylo nutné před samotným měřením úhlů softwarově korigovat. Za tímto účelem jsem využil záběru na rovnou čáru uvnitř hangáru, která byla na videu kvůli soudkovitému zkreslení zobrazena jako křivá (viz Obr. 25).

³¹ Z anglického Miles per Hour, 1MPH=1,61km·h⁻¹



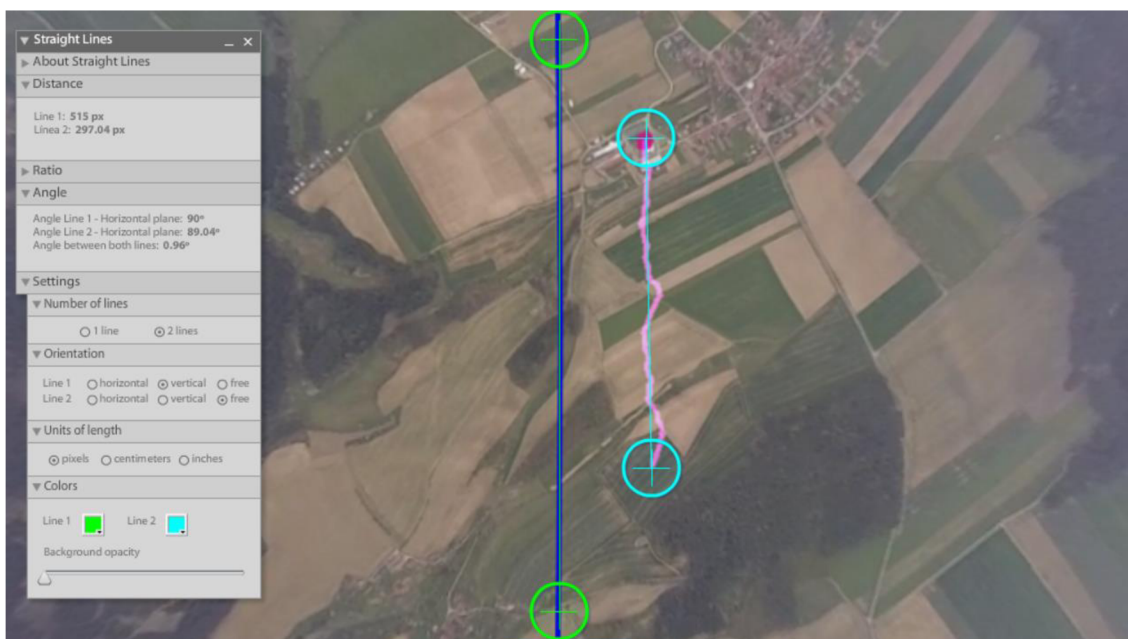
Obr. 25 Korekce soudkovitého zkreslení obrazu. Vlevo originální záběr, vpravo digitálně opravený.

Pomocí této úpravy jsem zjistil ohniskovou vzdálenost objektivu a následně provedl korekci i u zbylých záběrů (viz Obr. 26).



Obr. 26 Korekce soudkovité zobrazení obrazu. Vlevo originální záběr vpravo digitálně upravený. Modrá čára je rovnoběžná s podélnou osou letadla. Růžová čára značí pohyb referenčního bodu vůči letadlu.

Na opravených záběrech pak bylo možné změřit úhel snosu (viz Obr. 27). Z výše popsaných důvodů není čára pohybu referenčního bodu přímkou. To zavádí do této metody chyby, které jsem určil na $\pm 1^\circ$.



Obr. 27 Měření úhlu snosu pomocí optické metody

Dále byl letoun vybaven rychloměrem (viz 4.3) a digitálním magnetickým kompasem (viz 4.4).

5.2. Meteorologická situace

Testovací let proběhl 3.5.2017. Vyhodnocovaná byla data od času 14:52:10 do 15:11:49 UTC³². Vítr se postupně měnil jihovýchodního na jihozápadní (viz Obr. 28). [15]

Čas UTC	Čas LT ³³	Směr LKNA	Rychlost LKNA	Směr předpověď	Rychlost předpověď
14:00	16:00	140°	9kt	100°	11kt
15:00	17:00	180°	6kt	110°	9kt
16:00	18:00	210°	9kt	120°	9kt

Obr. 28 Meteorologická situace v období testovacího letu. Informace LKNA pocházejí z letiště Náměštl nad Oslavou a platí pro výšku 10 metrů nad zemí. Předpověď je vztahena pro oblast letiště Křižanov pro výšku 3000 stop.

5.3. Výpočet rychlosti větru

Pro výpočet rychlosti větru jsem využil rovnice (12) a (18), které jsem následně porovnával s předpovědí rychlosti větru a hodnotami udávanými navigací.

³² Z anglického Universal Time Coordinated. Od 16:52:10 do 17:11:49 místního času.

³³ Z anglického Local Time – místní čas

$$WV = \sqrt{TAS^2 + GS^2 - 2 \cdot TAS \cdot GS \cdot \cos(TU - K_Z)} \quad (12)$$

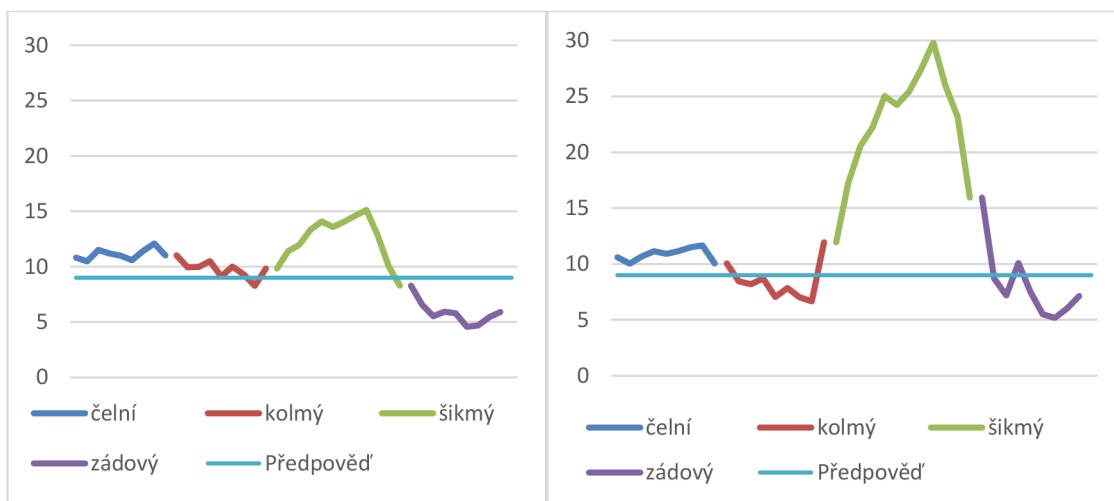
$$WV = \sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2} \quad (18)$$

Rovnice (18) pro výpočet rychlosti větru byla odvozena ze zjednodušeného vzorce kombinující výpočty pro let rovnoběžně a kolmo s větrem. Dalo se tedy předpokládat, že bude výpočet méně přesný než pro komplexní rovnici (12).

Ze zpracovaných dat vyplývá, že nejbližší k rychlosti větru dané předpovědí byl výpočet pomocí komplexní rovnice (12) (viz Příloha 1). Největší shody s průměrnou odchylkou 0,8kt dosahoval při letu kolmo k větru. Naopak největší rozdíl nastal během příčného letu, přičemž průměrná odchylka od předpovědi byla 4kt (viz Obr. 29).

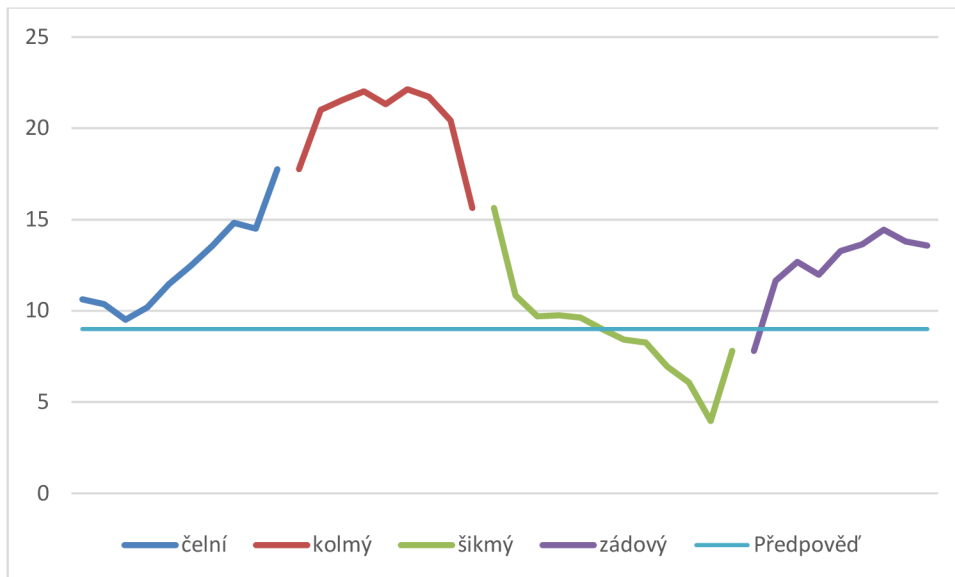
Výpočet zjednodušenou metodou (18) do jisté míry kopíroval průběh té komplexní, avšak s větší odchylkou od rychlosti danou předpovědí (viz Obr. 30)

Výpočet navigace G3X naopak dosahoval největší přesnosti během příčného letu (průměrná odchylka od předpovědi 0,5kt) a nejmenší při kolmém letu s průměrnou odchylkou 12kt (viz Obr. 31).



Obr. 29 Výpočet rychlosti komplexní metodou.

Obr. 30 Výpočet rychlosti zjednodušenou metodou.



Obr. 31 Indikace rychlosti větru pomocí navigace Garmin G3X

5.4. Výpočet směru větru

Pro výpočet směru větru jsem využil vzorců ((14)), (20) a (22).

$$\delta = K_Z + \left| \arccos \left(\frac{TAS - GS \cdot \cos(TU - K_Z)}{\sqrt{TAS^2 + GS^2 - 2 \cdot TAS \cdot GS \cdot \cos(TU - K_Z)}} \right) \right| \cdot \frac{TU - K_Z}{|TU - K_Z|} \quad (14)$$

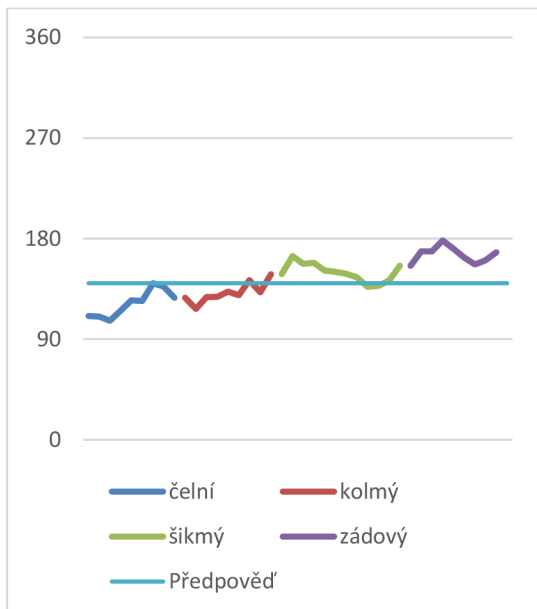
$$\delta = K_Z + \left| \arccos \left(\frac{GS - TAS}{\sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2}} \right) \right| \cdot \frac{TU - K_Z}{|TU - K_Z|} \quad (20)$$

$$\delta = K_Z + \left| \arccos \left(\frac{\sin(TU - K_Z) \cdot GS}{\sqrt{(GS - TAS)^2 + (\sin(TU - K_Z) \cdot GS)^2}} \right) \right| \cdot \frac{TU - K_Z}{|TU - K_Z|} \quad (22)$$

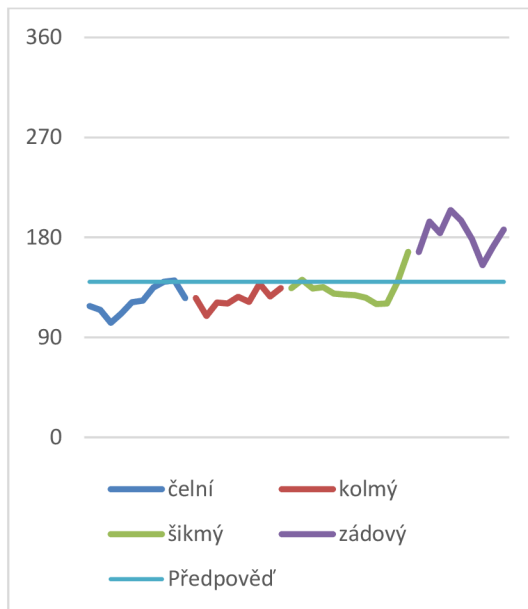
V rámci vyhodnocování dat se ukázalo, že Garmin G3X některé ze základních neznámých neměří, ale pouze dopočítává. Z tohoto důvodu byly výsledné směry větru z rovnic zjednodušených výpočtů (20) a (22) identické.

V porovnání s indikovaným směrem větru pomocí navigace byly výpočty pomocí vzorců velmi přesné (viz příloha 2 a 3). G3X vykazovala průměrnou odchylku od předpokládaného směru větru 46°. Místy dokonce indikovala vítr ze strany, na kterou bylo letadlo větrem snášeno.

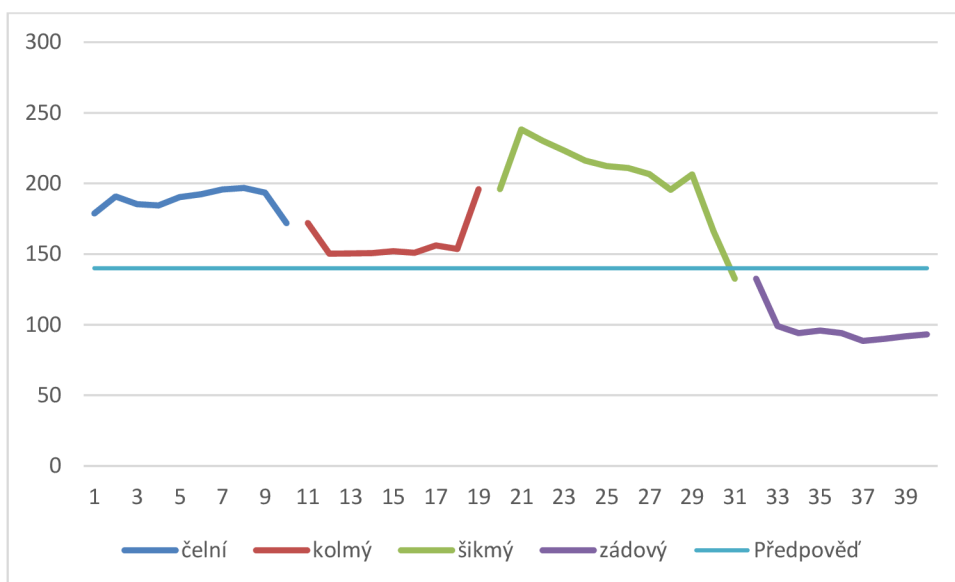
Průměrná odchylka komplexního výpočtu směru větru od předpokládaného byla 16° (Viz Obr. 32). Nejmenších odchylek komplexní i zjednodušený výpočet dosahovaly při letu příčně k vanutí větru, přičemž jejich odchylky byly nižší než 10°. Výsledky obou vzorců také reflektovaly předpokládanou změnu směru větru během letu (viz 5.2).



Obr. 32 Výpočet směru větru komplexní metodou



Obr. 33 Výpočet směru větru pomocí zjednodušené metody



Obr. 34 Indikovaný směr větru navigací Garmin G3X

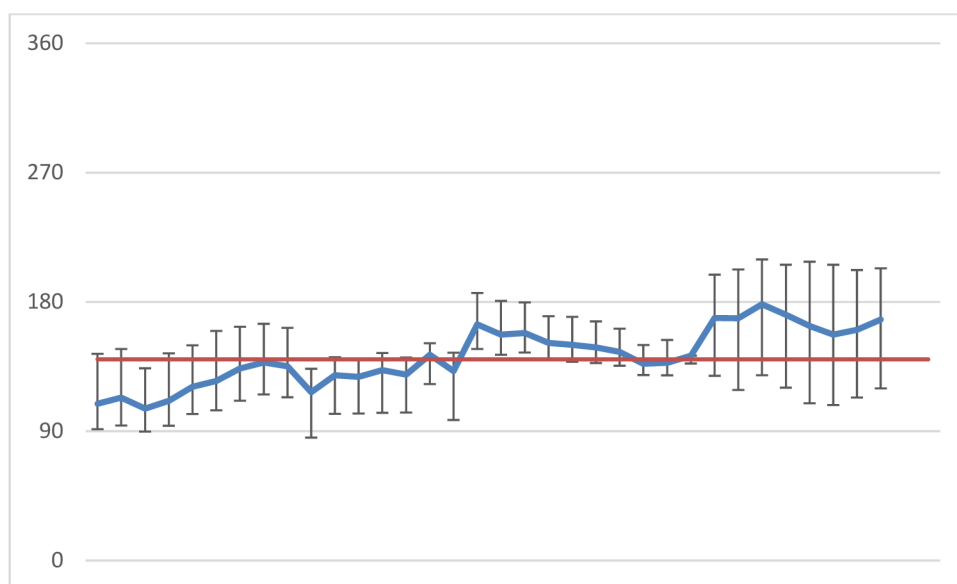
5.5 Chyby měření a jejich projev na výpočtu

Žádný přístroj neměří absolutně přesně. Vždy existuje alespoň malá nepřesnost měření, která do celkového výpočtu zanáší chyby. V (12)(14)(18)(20)(22) použitých pro výpočet rychlosti a směru větru byly 4 vstupní hodnoty. Hodnoty směru T_u a K_Z a hodnoty rychlostí TAS a GS.

5.5.1. Chyba určení směru

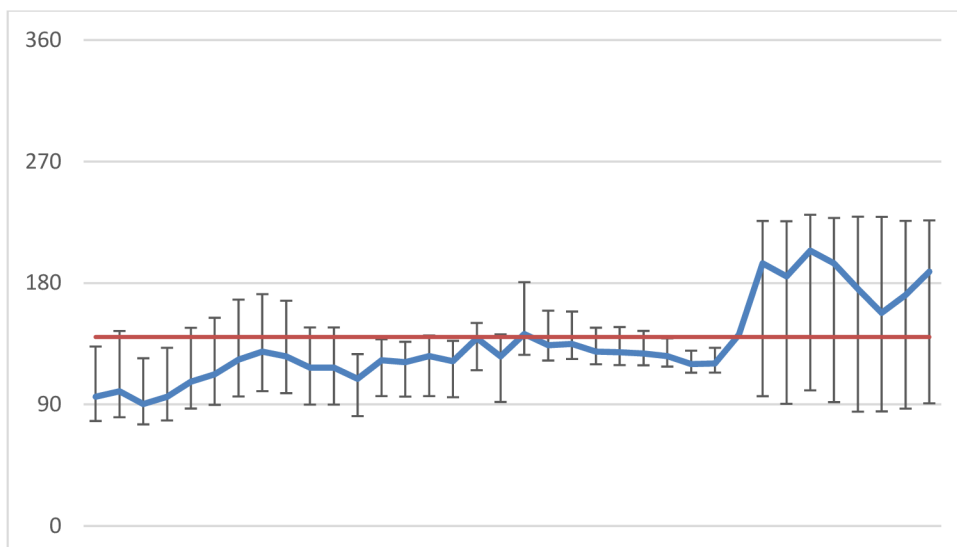
Přesnost určení směru je pro výpočty parametrů větru naprosto zásadní. To platí zejména při určování směru, kdy už chyba 3° způsobí v určitých fázích letu při využití komplexní rovnice rozdíl až 50° . U zjednodušené rovnice dosahuje i mnohem vyšších hodnot.

Úhlová chyba při určování magnetického směru by dle CS-23 neměla přesáhnout $\pm 10^\circ$. Za takových okolností by však bylo měření parametrů větru natolik nepřesné, že by byly tyto výpočty naprosto nepoužitelné. Chyba určení K_Z i T_U však v praxi bývá mnohem menší. Ve výpočtech také nehraje roli, zda je přesnější K_Z nebo T_U neboť se jejich chyby vždy sčítají.



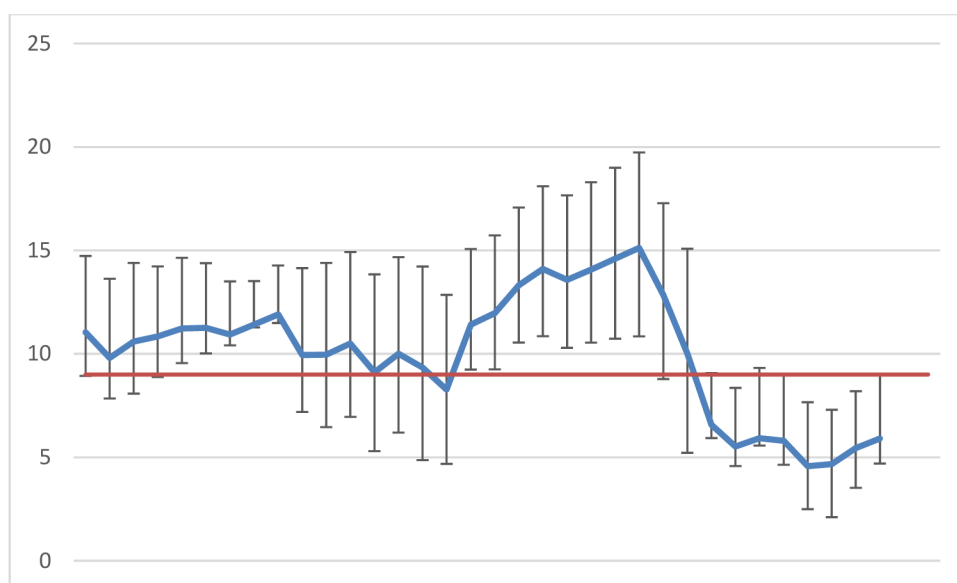
Obr. 35 Směr větru vypočítaný komplexní metodou v úhlových stupních (znázorněn modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení směru $\pm 3^\circ$. Červená čára značí směr větru daný předpovědí.

Také v rámci chyby měření platí teze, že výsledky zjednodušené metody kopírují trend komplexní metody, avšak s větší chybou. Nejvíce se chyby T_U a K_Z promítly při určování směru větru při letu podélně s větrem, zejména se zádovým. Nejméně se pak chyba promítla při příčném větru (viz Obr. 35 a Obr. 36).

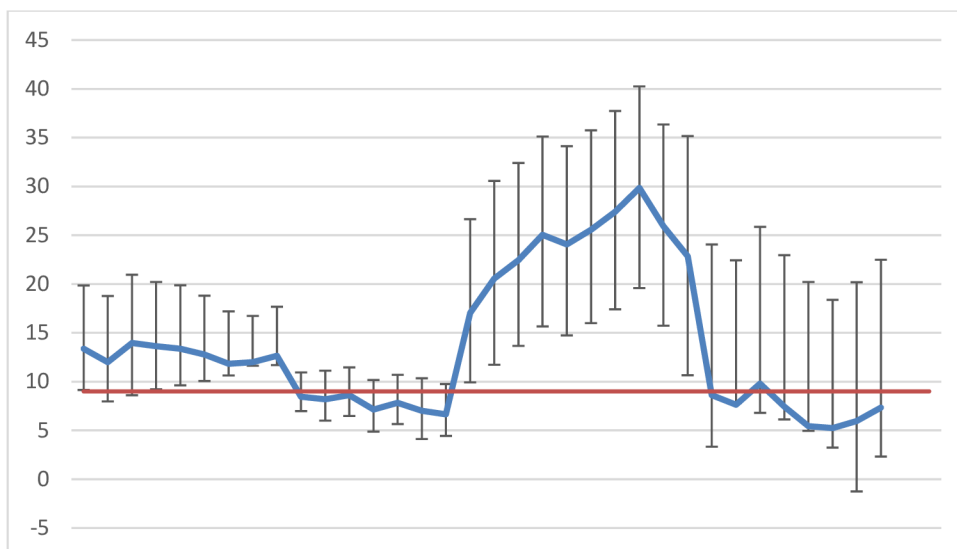


Obr. 36 Směr větru vypočítaný zjednodušenou metodou (znázorněn modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení směru $\pm 3^\circ$. Červená čára značí směr větru daný předpovědí.

Také pro rychlosti je nezbytné přesné změření TU a Kz. Oproti výše zmíněnému mají chyby komplexního a zjednodušeného své maxima v jiných oblastech. Komplexní metoda byla více ovlivněna při kolmém a příčném letu při průměrných odchylkách až ± 5 kt. Oproti tomu zjednodušená metoda dosahovala nejvyšších odchylek až 16kt v rámci letu se zádovným větrem.



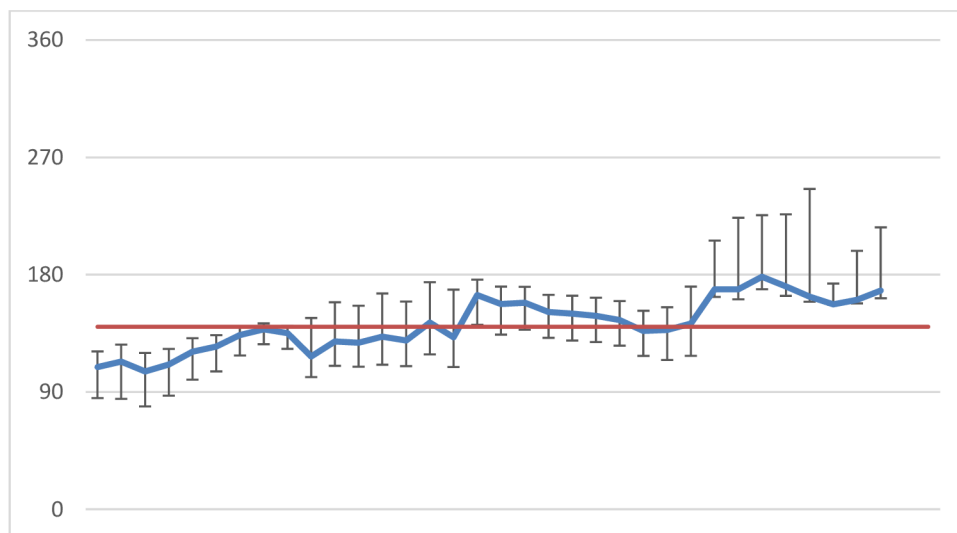
Obr. 37 Rychlost větru vypočítaná komplexní metodou (znázorněna modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení směru $\pm 3^\circ$. Červená čára značí rychlost větru danou předpovědí.



Obr. 38 Rychlost větru vypočítaná zjednodušenou metodou (znázorněna modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení směru $\pm 3^\circ$. Červená čára značí rychlost větru danou předpovědí.

5.5.2. Chyba určení rychlosti

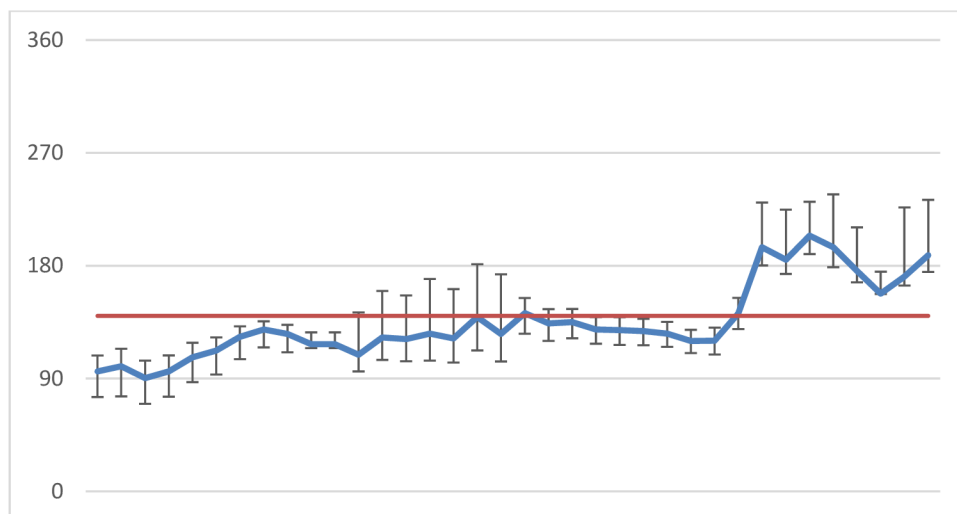
Nepřesnost měření pravé vzdušné rychlosti a traťové rychlosti také zanáší chyby do celkového výpočtu. U komplexního řešení dokonce výrazněji, než chyba určení směru. To je dáno počtem výskytů daných vstupních hodnot v rovnici. Velikost odchylek pro chybu TAS a GS prakticky stejná, avšak u měření vzdušné rychlosti se dá předpokládat větší chyba, mimo jiné i díky benevolentnosti předpisů, které umožňují chybu až $\pm 5kt$.



Obr. 39 Směr větru vypočítaný komplexní metodou. Chybové úsečky jsou pro chybu určení TAS $\pm 5kt$. Červená čára značí směr větru daný předpovědí.

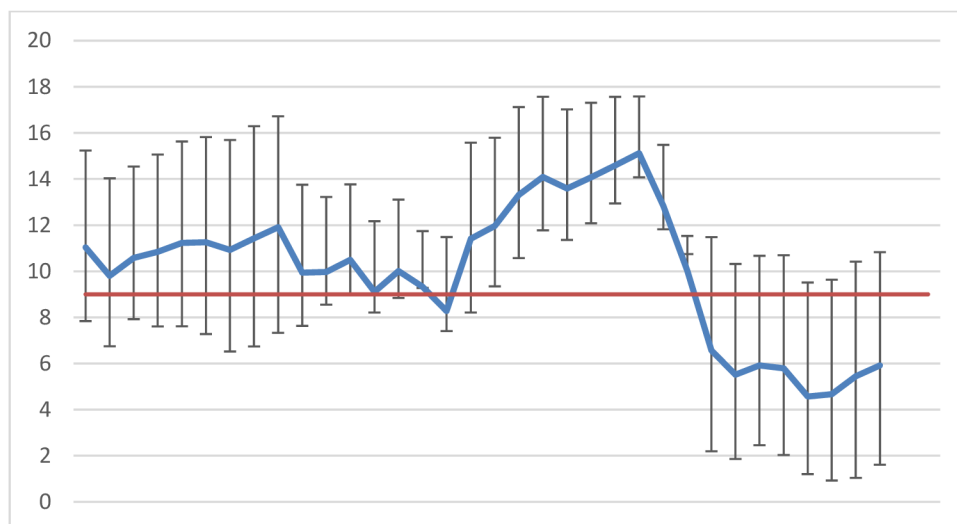
Maxima chybových úseček pro měření směru se opět nachází v oblasti letu se zádovým větrem. U komplexní metody lze zde při chybě 5kt očekávat chybu ve výpočtu větru

až 80°. U zjednodušené metody díky nižšímu výskytu vstupních hodnot rychlostí v rovnici dosahují maximální průměrné chyby maximálně 50°.

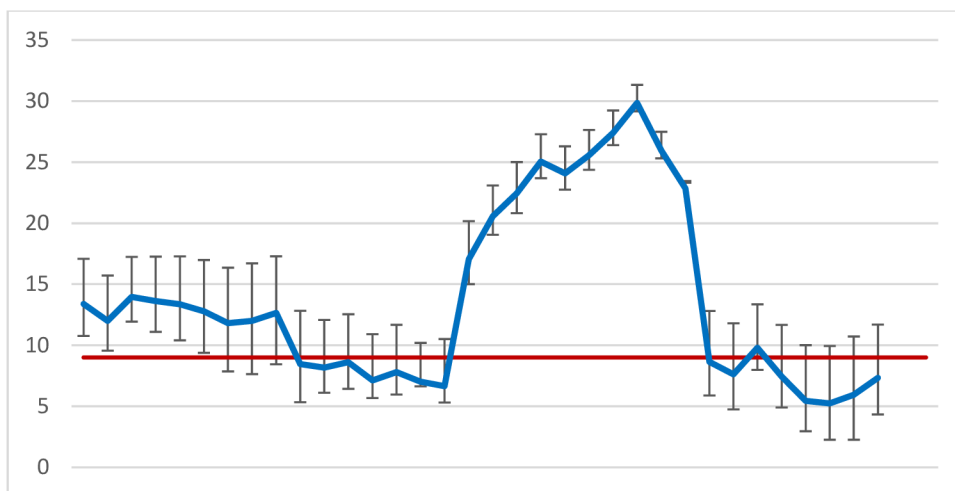


Obr. 40 Směr větru vypočítaný zjednodušenou metodou (znázorněn modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení TAS ± 5 kt. Červená čára značí směr větru daný předpovědí.

Chyba v určení rychlosti letu se logicky musí promítnout i do výpočtu rychlosti větru. Průměrná chyba je u komplexní i zjednodušené metody však ± 4 kt, což je méně než samotná chyba vnesená do výpočtů nepřesností měření (viz Obr. 41 a Obr. 42).



Obr. 41 Rychlost větru vypočítaná komplexní metodou (znázorněna modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení TAS ± 5 kt. Červená čára značí rychlost větru danou předpovědí.



Obr. 42 Rychlost větru vypočítaná zjednodušenou metodou (znázorněna modře). Chybové úsečky jsou pro chybu určení TAS ± 5 kt. Červená čára značí rychlost větru danou předpovědí.

6. Návrh metody pro výpočet parametrů větru

Díky rozvoji elektroniky je dnes možné změřit rychlost a směr větru i bez nákladných senzorů. Je však nutné mít dostatečně přesný vstup hodnot K_Z a TU. Z testovacího letu pro tuto práci je patrné, že přesnost navigace Garmin G3X je pro účely vhodného výběru přistávací dráhy či nouzové plochy pro přistání dostatečná. Použitím komplexní metody při využití stejných vstupních informací však umožňuje přesnost indikace zvýšit, což je důležité zejména pro navigaci po trati.

Dalšího zpřesnění by také bylo možné dosáhnout využitím optické metody. Testovací let pomohl poukázat na nedostatky pevně zabudované kamery se soudkovitým zkreslením, avšak i s touto limitací bylo možné určit snos větru s přesností 1° . Gyroskopické uchycení kamery je dnes možné díky rozvoji dronů pořídit již v řádu tisíců korun. Při použití kvalitnější kamery by pak bylo možné dosáhnout až řádově přesnějších výpočtů.

Nezbytné jsou pro určení parametrů větru rychloměr a ukazatel magnetického směru s digitálním výstupem informací. Ty je možné v reálném čase vyhodnocovat společně s údaji z kamery a GPS.

Pro eliminaci chyb způsobených náhodnými poryvy větru a manévřů letadla je také vhodné indikovat průměrnou hodnotu za předchozích 30 sekund.

7. Závěr

V rámci této diplomové práce jsem definoval pojem vítr a provedl rešerši o jeho vývoji, měření a indikaci pilotovi. Namísto měření síly větru, která pomocí Beaufortovy stupnice specifikuje dynamické projevy přízemního větru na předměty na zemském povrchu, se dnes pro indikaci parametrů větru používají informace o rychlosti a směru větru. Zdokumentoval jsem také nebezpečné meteorologické jevy spjaté s větrem, které mohou ovlivnit bezpečnost letecké dopravy.

Pro bezpečnost letecké dopravy jsem také vypracoval statistiku leteckých nehod a incidentů, vyšetřovaných za posledních 10 let Ústavem pro vyšetřování leteckých nehod. Speciální pozornost jsem věnoval nehodám, které byly ovlivněny větrem. Z těchto statistik bych vyzdvihnul fakt, že polovina nehod ovlivněných větrem se stala během přistávacího manévru. Dvě nehody, které se udály právě během přistávacího manévru jsem, vybral jako význačné a podrobněji jsem je rozpracoval.

Značnou část práce jsem věnoval prostředkům a metodám umožňujícím měření parametrů letu pro výpočet větru na palubě letadla, ať už palubních senzorů, přijímačů signálu z radiomajáků a satelitů nebo kamery měřící optickou. Směrové parametry jsou kurz letu a traťový kurz, respektive jejich úhlové rozdíly od zeměpisného severu. Rychlostní parametry jsou pravá vzdušná rychlost a traťová rychlost. Na základě těchto vstupních hodnot jsem definoval komplexní a zjednodušené rovnice pro výpočet směru a rychlosti větru.

V rámci praktické části práce byl proveden také testovací let malým letadlem. Naměřené hodnoty z paluby letadla jsem analyzoval a vyhodnotil chyby vstupních hodnot a jejich význam v komplexní a zjednodušené rovnici.

Jako majoritní se projevila chyba měření směru, která již od malých hodnot významně ovlivňovala přesnost výpočtů rychlosti a směru větru. Zejména výpočty směru větru komplexní metodou se ukázaly po většinu letu přesnější, než informace indikované navigací instalovanou v letadle. Výpočty rychlosti větru se naopak, zejména v letu se zádovým větrem, ukázaly jako poměrně nepřesné. I přes tyto nedostatky bych však komplexní rovnice doporučil pro návrh optimální metody pro měření větru na palubě letadla nevyžadující nákladné senzory.

8. Zdroje

Seznam použité literatury

[1] KRÁČMAR, Jan. *Meteorologie (050 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8.

[2] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-448-6.

[4] HILLOVÁ, M. *Možnosti využití pravítka pilota v praxi obchodního pilota*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

[5] BATELKA, M. *Cíle, metody a technologie prostorové navigace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, Csc.

[6] POLÁK, Josef. *Přehled středoškolské matematiky*. 9., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2008. ISBN 978-80-7196-356-1.

[7] ČIŽMÁR, Jan a Miroslav TRUBAČ. *Přístrojové vybavení (022)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-445-1.

Seznam internetových zdrojů

[11] ING. R. PEČÍNK. *Letecké radionavigační systémy. Letectví & Kosmonautika* [online]. 1996(16) [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://viditelnykocour.inet-box.cz/viditelny_kocour/fs/school/school/nav/nav.htm

[12] *Global Positioning System (GPS)/Precise Positioning System (PPS) Security Devices Sold FMS for Integration Into Host Application Equipment* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.samm.dsca.mil/loanote/global-positioning-system-gpsprecise-positioning-system-pps-security-devices-sold-fms-for>

[13] *ADF-RMI Indicators* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://sarasotaavionics.com/category/indicators/adf_rmi-indicators

[14] *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)* [online]. 1993 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

[15] STYHRAL, Jan. Dlouhodobé trendy rychlosti větru v Čechách [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/130001575/?lang=cs>.

[16] *NTSB report* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://www.nts.gov/_layouts/ntsb.aviation/brief.aspx?ev_id=20100607X50851&key=1

[17] *Letecký předpis letiště L14* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/print/L-14_cely.pdf

[18] *Zprávy o LN a Incidentech* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.uzpln.cz/zpravy-ln>

[19] *Závěrečná zpráva: O odborném zjišťování příčin letecké nehody letounu Virus SW 100, pozn. značky D-ME* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://www.uzpln.cz/pdf/incident_iFzk5DCz.pdf

[20] *Letecká navigace: neboli nauka o vedení letadel po plánovaných tratích a určování zeměpisných poloh za letu* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://aa.fd.cvut.cz/wp-content/uploads/2013/06/letecka-navigace.pdf>

[21] CS-23 [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[22] KHALID A. AL-GAADI. *Testing the Accuracy of Autonomous GPS in Ground Speed Measurement* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2005.1518.1522>

[23] *METAR history* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.ogimet.com>

Zdroje obrázků

Obr. 1 STYHRAL, Jan. *Dlouhodobé trendy rychlosti větru v Čechách* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/130001575/?lang=cs>.

Obr. 2 *BAA Training* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://www.baatraining.com/did-you-know-that-the-white-and-orange-strips-on-windsocks-are-not-for-decoration/#>

Obr. 3 *Arcus cloud* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: https://readtiger.com/wkp/en/Arcus_cloud

Obr. 4 *Microburst* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microburst#/media/File:Microburstnasa.JPG>

Obr. 8 <http://www.pipistrelsa.co.za/aircrafts/the-virus-sw-80100/>

Obr. 9 a 10 Závěrečná zpráva: O odborném zjišťování příčin letecké nehody letounu Virus SW 100, pozn. značky D-ME [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://www.uzpln.cz/pdf/incident_iFzk5DCz.pdf

Obr 11. *Cirrus accident* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: www.160knots.com

Obr 12 *Navigační trojúhelník* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/cz281908/obsah3/troj.htm>

Obr. 13 HILLOVÁ, M. *Možnosti využití pravítka pilota v praxi obchodního pilota*.

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 41 s.

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

Obr. 15 *US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0 Main Field Declination (D)* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015_D_MERC.pdf

Obr. 16 *Neural Correlates of a Magnetic Sense* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://science.sciencemag.org/content/336/6084/1054/F1>

Obr. 18 *ADF-RMI Indicators* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://sarasotaavionics.com/category/indicators/adf_rmi-indicators

Obr 20 *SA transmission* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data/timeline.gif>

Obr 24 *Garmin G3X Pilot's manual* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/302077/Garmin-G3x.html>

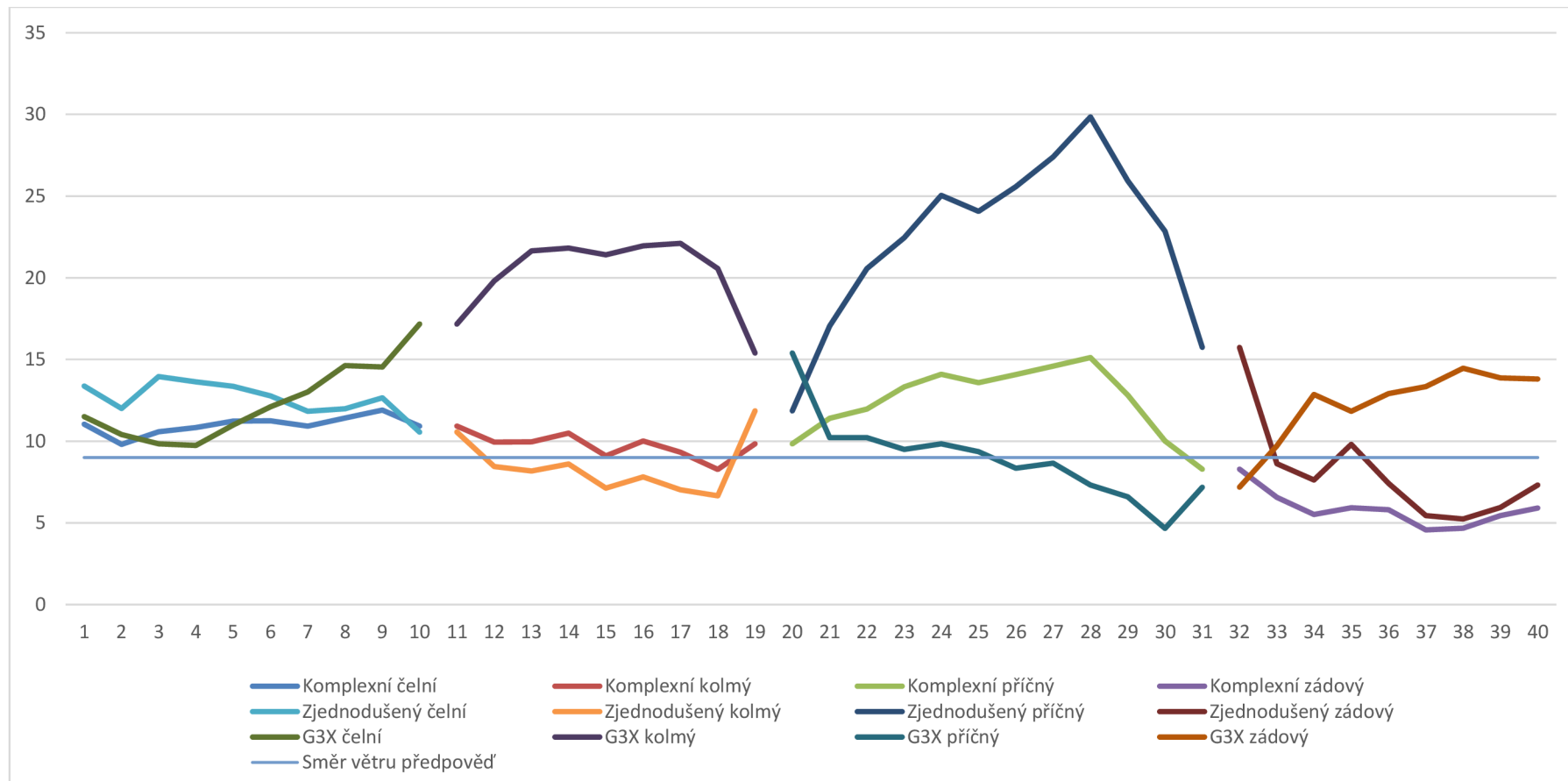
Zdroje tabulek

Tab. 1 *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)* [online]. 1993 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

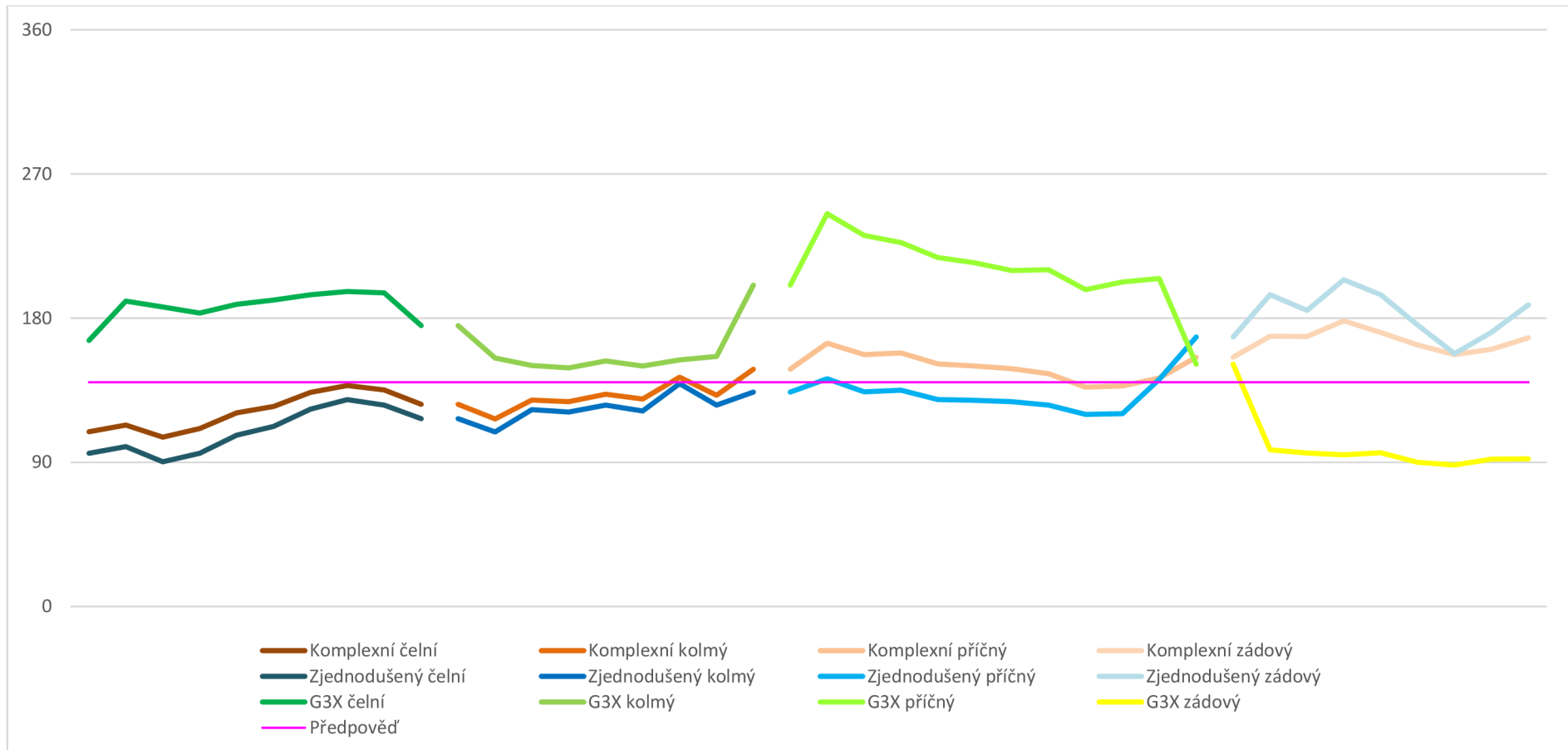
Tab. 2 VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-448-6.

9. Přílohy

Příloha I Měření rychlosti větru



Příloha 2 Měření směru větru



Příloha 3 Procentuální vyhodnocení směru větru pomocí větrné růžice

