



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Marek Hamza

Alternativní metoda ověřování systému PAPI

Bakalářská práce

2020



K621**Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Marek Hamza

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Alternativní metoda ověřování systému PAPI**

Název tématu (anglicky): Alternative Inspection Method of PAPI System

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Popis systému PAPI
- Analýza současné metody ověřování systému
- Alternativní metody ověřování systému
- Zhodnocení rizik a ostatních omezení při používání UAS pro ověřování systému



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Letecký předpis L2 dodatek X
Letecký předpis L14
International Flight Inspection Symposium (IFIS)
Proceedings Books
SOKANSKÝ, Karel. Světelná technika. ČVUT v Praze

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **19. října 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Marek Hamza
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. prosince 2019

Poděkování

Ještě před samotným úvodem bych rád vyjádřil své velké poděkování vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Stanislavu Plenningerovi, Ph.D., a panu Ing. Ladislavu Kellerovi za věcné a cenné připomínky a rady při konzultacích, které mě dovedly k úspěšnému odevzdání mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům Letiště Václava Havla v Praze, paní Ing. Sabině Lajdové a panu Ing. Ivanovi Neumannovi, kteří mi umožnili provést experimentální měření. V neposlední řadě děkuji své rodině a kamarádům, kteří při mně stáli od samého začátku studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou 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 dodržování etických principů při 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 10. srpna 2020



.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

ALTERNATIVNÍ METODA OVĚŘOVÁNÍ SYSTÉMU PAPI

Bakalářská práce
srpen 2020
Marek Hamza

ABSTRAKT

Cílem této práce je zmapovat současné letové ověřování systému PAPI a prozkoumat alternativní přístupy k této problematice. Jelikož v současné době není mnoho publikací zabývajících se využitím bezpilotních prostředků v odvětví letového ověřování, pokusíme se navrhnout koncepci vlastní metody měření úhlového nastavení reflektorů. Abychom zjistili úskalí pozorování barev světel skrze videokameru a vyřešili další otázky, jako je použitelnost volně dostupného modelu multikoptéry, proto experimentálně ověříme naše předpoklady. V závěrečné fázi práce se budeme zajímat o současný způsob schvalování letu a v krátkosti uvedeme bezpečnostní aspekty provozu UAS v rámci řízeného okrsku letiště.

KLÍČOVÁ SLOVA

PAPI, Vizualní sestupová soustava, Letecké pozemní zařízení, Letové ověřování, UAS, Riziko, Hrozba

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

ALTERNATIVE INSPECITON METHOD OF PAPI SYSTEM

Bachelor Thesis
August 2020
Marek Hamza

ABSTRAKT

The aim of this bachelor thesis is to map current flight inspection of the PAPI system and to search for an alternative method. However, currently there are not many publications describing the use of unmanned aerial vehicles in the field of flight inspection, therefore we will try to propose a concept of our own method of measuring the angular setting of reflectors. To determine the issues of observing colours of lights via video camera and solve other problems such as the applicability of a freely available model of a multicopter, hence we verify our assumptions by experiment. In the final part of the thesis, we will describe the current method of flight approval and briefly introduce the safety aspects of the UAS operation within the controlled traffic region of the airport.

KEY WORDS

PAPI, Visual Glide Slope Indication System, Navigation Aid, Flight Inspection, UAS, Risk, Hazard

Obsah

Seznam použitých zkratk	11
Úvod	13
1 Precision Approach Path Indicator	15
1.1 Obecný popis	16
1.2 Rozmístění a orientace	17
1.3 Vnitřní struktura reflektoru	20
1.4 Napájení	21
1.5 Budoucnost PAPI	23
2 Současné metody kalibrace	24
2.1 Požadavky na letoun	25
2.2 Měřicí přístroje	25
2.2.1 UNIFIS 3000	26
2.3 Metody doporučené FAA	27
2.3.1 Lever Run Method	27
2.3.2 On-Path Method	28
2.3.3 Theodolite Method	28
2.3.4 Stranové krytí	29
2.3.5 Intenzita svitu, kontrast a tlumení	29
2.3.6 Bezpečná vzdálenost od překážek	30
2.3.7 Pravidelné letové ověřování PAPI na LKPR	30
2.3.8 Intervaly letových ověřování a tolerance	31
3 Alternativní metody kalibrace	32
3.1 Popis UAS	32
3.2 Laser Beam	33
3.3 Stranové krytí, intenzita svitu a kontrast	34
3.4 Bezpečná vzdálenost od překážek	34
3.5 Návrh vlastní alternativní metody	34
3.5.1 Požadavky na UAS	35

3.5.2	Lasertový dálkoměr	36
3.5.3	Trajektorie letu	36
3.5.4	Provozní oblast	37
3.5.5	Vyhodnocování měření	40
4	Experimentální ověření návrhu	43
4.1	Postup pro experiment	43
4.1.1	Místa letu	44
4.1.2	Výpočet predikce letu	45
4.2	Vyhodnocení experimentu	46
4.2.1	Náročnost na manévrování	47
4.2.2	Výpočet dat získaných pro 1. místo	47
4.2.3	Výpočet dat získaných pro 2. místo	48
4.2.4	Vyhodnocení	49
5	Zhodnocení rizik a ostatních omezení	51
5.1	Současný proces schvalování letu	51
5.2	Hodnocení rizik	52
5.3	Provozní omezení	55
5.4	Zhodnocení provozní bezpečnosti navrhované metody	56
6	Diskuze	58
	Závěr	59
	Seznam literatury	60
	Seznam obrazových příloh	65
	Seznam tabulek	67

Seznam použitých zkratk

ADM	Aerodrome Design Manual	
AFIS	Automated Flight Inspection System	
AMC	Airspace Management Cell	Pracoviště uspořádání vzdušného prostoru
AIP	Aeronautical Information Publication	Letecká informační příručka
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
AT-VASIS	"AT"-Visual Approach Slope Indicator System	
CDI	Course Deviation Indicator	
DJI	Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd	
ECU	Electronic Control Unit	Elektronická řídicí jednotka
FAA	Federal Aviation Administration	
HOP		Hustě osídlený prostor
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla letu podle přístrojů
ILS	Instrument Landing System	System pro přesné přiblížení a přistání
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems	
LED	Light-Emitting Diode	Elektroluminiscenční dioda
LKPR	Václav Havel Airport Prague	Letiště Václava Havla Praha
LOC	Local Time	Místní čas
LPZ		Letecké pozemní zařízení
METAR	Aerodrome routine meteorological report	Pravidelná letištní meteorologická zpráva
METH	Minimum Eye Height over Threshold	Minimální výška očí nad prahem dráhy
MLS	Microwave Landing System	Mikrovlnný přistávací systém
NOTAM	Notice To Airman	Oznámení pro pracovníky zabývající se letovým provozem

NSF	Non – Standard Flight	Nestandardní typ letu
OPS	Obstacle Protection Surface	Ochranná plocha
PAPI	Precision Approach Path Indicator	
PAR	Precision Approach Radar	Přesný přibližovací radar
RRP	Runway Reference Point	
RWY	Runway	Dráha
ŘLP ČR		Řízení letového provozu České republiky
SELČ		Středoevropský letní čas
SORA	Specific Operations Risk Assessment	
SZZ		Světelné zabezpečovací zařízení
TCH	Threshold Crossing Height	Výška bodu na sestupové ose nad prahem dráhy
T-VASIS	"T"-Visual Approach Slope Indicator System	
UA	Unmanned Aircraft	Bezpilotní letadlo
UAS	Unmanned Aircraft Systems	Bezpilotní systém
ÚCL		Úřad civilního letectví
VFR	Visual Flight Rules	Let za viditelnosti
VGSI	Visual Glide Slope Indicator	

Úvod

Odvětví letového ověřování dodnes nepředstavuje příliš povědomé prostředí, a to dokonce ani pro zasvěcenější veřejnost. Na druhou stranu bezpilotní systémy (modely koptér) se v současné době setkávají s obrovským zájmem, a to napříč všemi skupinami populace. Za posledních pár let můžeme narazit pouze na individuální práce, které se snaží tato dvě odvětví propojit a využít jejich benefity k úsporám jak časovým, tak i finančním. Ačkoliv drtivá většina zařízení používaných v letecké dopravě je certifikovaná, nebo je alespoň vydáno potvrzení o shodě, žádný výrobce ani provozovatel zařízení nezaručí věcný a správný chod po dobu životnosti zařízení. Z toho důvodu je nezbytné při provozu zařízení provádět jeho pravidelné kontroly a ověřování. Abychom získali jistotu, že naváděcí zařízení poskytují dostatečně přesné vedení, je nezbytné provádět kalibrační měření v pravidelných intervalech. Trendem současné doby je vměstnat co nejvíce letadel do vzdušných prostorů, a tím získat jejich co nejefektivnější využití. S tímto trendem rostou i požadavky na bezpečnost a přesnost navádění letadel, které jsou čím dále blíže k sobě. Člověk se snaží efektivně využít doslova téměř každé chvíle, protože zdržení přináší pouze ztrátu. To, aby letecký spoj dosáhl své destinace za téměř jakýchkoliv meteorologických podmínek, zajišťují postupy přístrojového přiblížení v závěrečné kritické fázi letu. Jedním z doplňkového vybavení k přístrojovému přiblížení je právě systém PAPI.

K výběru tohoto tématu mě vedla především osobní zvědavost. Toužil jsem prozkoumat tento letecký obor, který je téměř neznámý. Obor, ve kterém figurují létající laboratoře vybavené přístroji, které kontrolují pozemní navigační aparáty, zda správně navigují letadla.

V první třetině práce bychom se chtěli zabývat současnou doporučenou metodikou letového ověřování námi zvoleného pozemního navigačního zařízení. Pro dokonalejší pochopení problematiky před tím provedeme rozbor zvoleného pozemního navigačního systému v rozsahu potřebném pro naši práci. Hlubší analýza současného letového ověřování překračuje rámec této práce.

Ve druhé třetině práce budeme analyzovat veřejně publikované alternativní přístupy letového ověřování PAPI. Naše hledání se zaměří pouze na bezpilotní systémy a pokusí se odpovědět na otázku využitelnosti jejich vlastností. Na základě podnětu z firmy, která se zabývá touto problematikou na profesionální úrovni, provedeme návrh vlastní metody ověřování úhlového nastavení reflektorů navigačního systému. Více informací nebylo možné získat vzhledem k jejich povaze. Tyto informace nejsou volně publikovatelné a jsou předmětem duševního vlastnictví firem, které s tímto systémem pracují.

V poslední třetině práce nad rámec zadání podstoupíme experimentální let, od kterého si slibujeme, že nám odpoví na otázku proveditelnosti námi navržené metody. V závěru práce

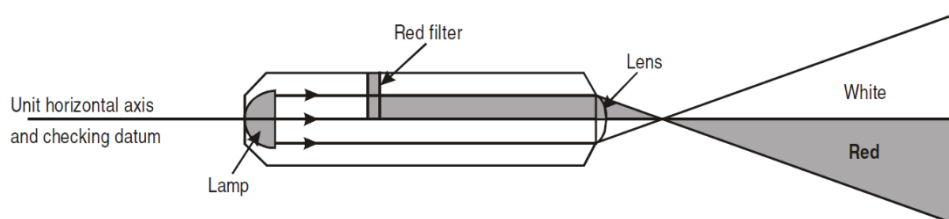
bude uveden krátký vhled do problematiky bezpečnosti provozu bezpilotních systémů v rámci řízeného okrsku letiště, což je nezbytné z hlediska zachování bezpečnosti provozu daného letiště.

1 Precision Approach Path Indicator

Systém Precision Approach Path Indicator, zkráceně "PAPI", tvoří dodnes neodmyslitelnou komponentu základního světlo-technického zabezpečení letiště a patří do kategorie systému Světelných sestupových soustav pro vizuální přiblížení (anglicky: Visual Glide Slope Indicator – VSIGI). V České republice jsou jím vybavena všechna mezinárodní a vojenská letiště. Hlavním účelem tohoto zařízení je sloužit pilotům v konečné fázi přiblížení na přistání. Systém se skládá ze čtyř uzavřených světelných zařízení, z nich každé obsahuje dva zdroje světla a červený filtr. Umístěny jsou vedle přistávací dráhy na úrovni předpokládaného místa dotyku letadla se zemí. Tyto reflektory vyzařují pouze dva druhy barev: červenou a bílou. Díky poměru barev může pilot odvodit svoji odchylku od ideální sestupové roviny. Ačkoliv pro většinu letišť je systém PAPI dobrovolnou výbavou, tak pokud daná letiště využívají proudové letouny nebo jiné letouny s obdobnými požadavky na jejich vedení, je tento systém vyžadován v ICAO Annexu 14, a tím tvoří neodmyslitelnou součást vybavení typického mezinárodního letiště. V jiných případech musí být součástí světelného obrazce, který se vztahuje ke kompletnímu světlo-technickému zabezpečení. Podle dochovaných a odtajněných zdrojů Britského ministerstva obrany se jako první na vývoji podíleli dva hlavní průkopníci Tony Smith a David Johnson. Tento systém byl poprvé představen v roce 1974, ale během následujících dvou let byl dále zdokonalován do podoby, jakou známe dnes. [1] Na světě existuje více druhů takovýchto světelných sestupových soustav, které zde budou zmíněny, ale nebudeme se jim dále věnovat. Rozsáhlejším systémem než PAPI je T-VASIS a AT-VASIS. Oba druhy mají společný vzhled s tím rozdílem, že T-VASIS je nainstalován na obou stranách přistávací dráhy. Na první pohled tyto systémy můžou pozorovateli připomínat optický přistávací systém „meatball“ na vojenských letadlových lodích nebo styl vynesení zpracovaného signálu ILS na přístroji CDI. Ukazatelem odchylky v sestupu je v tomto případě počet rozsvícených světél ve směru od nulté světelné příčky. Od 1. 1. 2020 nebude AT-VASIS a T-VASIS dále bráno jako standardní vybavení pro vizuální přiblížení dle Předpisu L14. [2] Naopak nejjednodušším systémem je APAPI. Jedná se o redukci PAPI na dva reflektory, a tím můžou nastat pouze tři různé poměry barev. Tím, že je jednodušší, je levnější nejen na pořízení, ale i na samotný provoz, a proto jsou APAPI využívána spíše na vnitrostátních letištích.

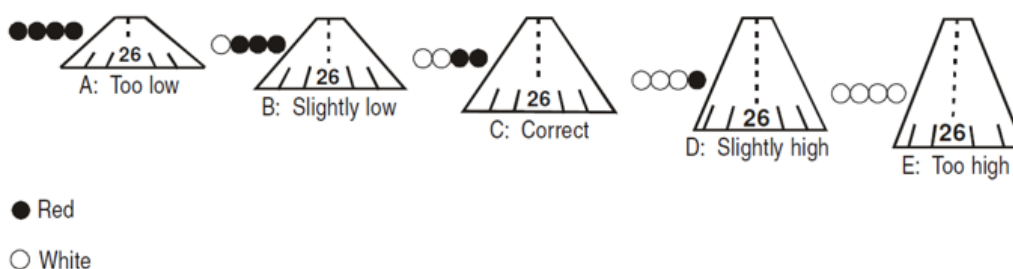
1.1 Obecný popis

Při prvním pohledu pozorovatel spatří systém čtyř stacionárních reflektorů umístěných v jedné řadě rovnoměrně od sebe. Hlavní skelet tvoří rám, zdroj světla, letecký barevný filtr a čočka (případně soustava čoček), což opravdu není příliš mnoho komponent pro stavbu jediného reflektoru, jak lze vidět na obrázku 1. Jedná se tedy o nezávislý nekooperativní navigační systém pro leteckou dopravu.



Obrázek 1: Řez reflektorem PAPI, (zdroj: [3])

Jednotlivé vícežárovkové reflektory jsou od sebe rovnoměrně rozmístěny v jedné ose, která je kolmá k ose dráhy. Při přiblížení pilot vidí soustavu čtyř světél, která mu slouží jako rychlá vizuální reference jeho aktuální pozice vůči sestupové rovině. Celkem může pilot spatřit pět různých barevných kombinací. Každá barevná kombinace znázorňuje odchylku od sestupové osy (viz obrázek 2). Nyní budou tyto kombinace systematicky definovány od největší odchylky od sestupové roviny směrem k zemi. V této poloze by pilot viděl všechna světla červená, jedná se o kombinaci „A“ na obrázku 2. Pokud se bude pilot pohybovat těsně pod sestupovou rovinou, uvidí nejvzdálenější reflektor kolmo od přistávací dráhy zářit bílou barvou a zbylé tři reflektory zářit červeně (kombinace „B“ na obrázku 2). Při dodržení správné sestupové roviny jsou reflektory orientovány tak, aby počet „červených“ a „bílých“ byl vyvážený, jak je znázorněno v kombinaci „C“ na obrázku 2. Český výraz proto je „na sestupu“. Tento trend přechodu barev pokračuje dále, kdy se postupně mění vyzařovaná barva v nejvzdálenějším reflektoru až po ten nejbližší k okraji přistávací dráhy. To znamená, že v poloze nad sestupovou rovinou uvidí pilot první tři bílé a zbylý reflektor červeně. Poslední kombinace jsou čtyři bílé zářící reflektory signalizující velké odchylení ve směru nad sestupovou rovinou. [3]

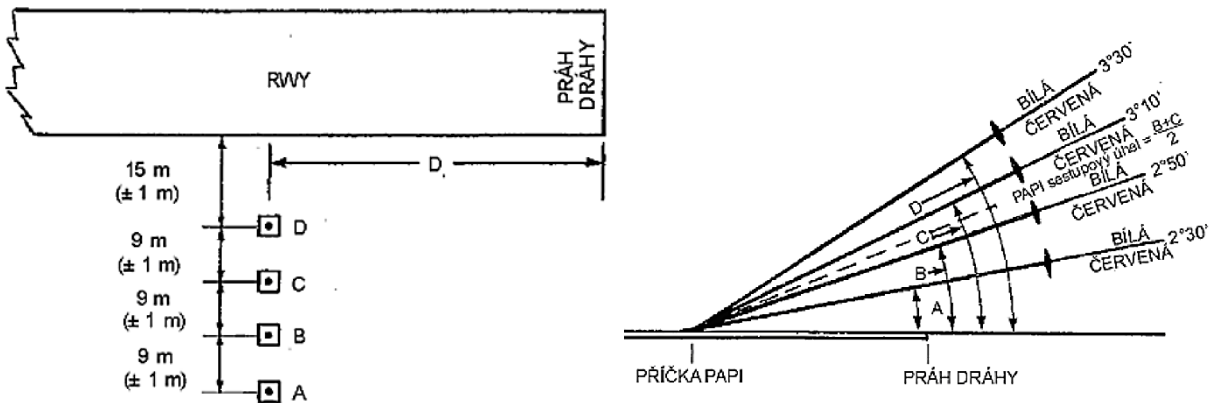


Obrázek 2: Barevné kombinace, (zdroj: [3])

1.2 Rozmístění a orientace

Z předešlých kapitol doplněných o obrazovou přílohu je zhruba jasné, o jakém zařízení je tu pojednáváno a jaký je jeho účel. Proto dále rozvedeme detailnější popis tohoto systému a nastíníme případné komplikace při plánování a projektování PAPI. Jedním z prvních zdrojů, kde by případný projektant hledal informace a normy pro stavbu, je ICAO dokument 9157 s názvem Aerodrome Design Manual – Part 4, Visual Aids. Zároveň na stejné úrovni je ustanovení Ministerstva dopravy Předpis L14 – Letiště. Oba dokumenty se shodují v tom, že systém PAPI by měl být umístěn nalevo od přistávací dráhy. Pokud to místní podmínky neumožňují, lze ho umístit napravo. V tomto případě je ale nutné zajistit, aby trend přechodu barev byl zrcadlově opačný k trendu, který je popsán v předchozí kapitole. To znamená, že první změnu pozorovatel zpozoruje na nejbližším reflektoru při pohybu směrem vzhůru od povrchu země. Další možností je instalace na obě strany dráhy, ale i zde platí, že musí docházet k symetrickým přechodům vyzařovaných barev. S touto instalací se setkáme v oblastech, kde je náročnější provést bezpečné přiblížení, příkladem je letiště Innsbruck (LOWI) v sousedním Rakousku.

První reflektor je odsazen patnáct metrů od okraje přistávací dráhy, následující a zbylé reflektory jsou usazeny každých devět metrů od předešlého reflektoru. Žádný z nich by však neměl být blíže než čtrnáct metrů k pojízděcí dráze, odbavovací ploše či jiné přistávací dráze. Veškeré rozestupy mezi reflektory a okolními plochami musí být s přesností na jeden metr. V jaké vzdálenosti od prahu přistávací dráhy bude tento systém usazen, zaleží na tom, jaké služby pro přiblížení budou poskytovány. Pokud bude například poskytováno ILS přiblížení, v tom případě je rozhodnutí o něco jednodušší, protože systém PAPI musí v co největší míře korespondovat se systémem ILS. Jinými slovy, kam vás navede ILS, musí vás navést i PAPI. Světelná příčka reflektorů PAPI bude tedy umístěna do oblasti předpokládaného dotyku ± 10 m (anglicky: Touchdown zone). [4] Pokud ale není poskytováno ILS ani MLS přiblížení, je nutné znát typy letadel, která budou tuto dráhu využívat. Na základě toho je nutné stanovit minimální výšku podvozku letadla nad prahem dráhy z Tabulky 5-2 v Předpise L14 a ideální úhel sestupu pro dané typy letadel s ohledem na délku přistávací dráhy a okolní překážky. [2]



Obrázek 3: Typická příčka PAPI pro sestupovou rovinu 3°, (zdroj: [2])

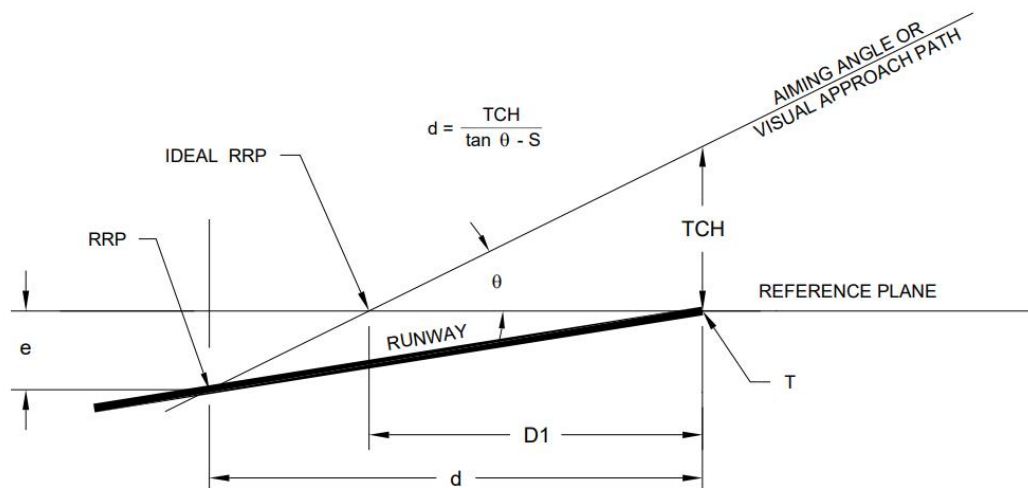
Pokud bychom natočili všechny reflektory stejným směrem, nedošlo by k výše popsaným změnám vyzařovaných barev a oněm barevným kombinacím, neboť všechny reflektory mají stejnou vnitřní stavbu. Proto musíme každou jednotku natočit pod jiným úhlem. Lze konstatovat, že jednotka „A“ – viz obrázek 3) natočená pod nejmenším úhlem bude signalizovat pozorovateli první změnu při pohybu směrem od zemského povrchu. Orientace následujícího reflektoru „B“ – viz obrázek 3) bude pod větším úhlem, než je předchozí jednotka, ale zároveň pod menším úhlem, než má další jednotka „C“ – viz obrázek 3). Přesný výpočet jednotlivých nastavení vychází z ADM Part 4, kde je stanoven všeobecný úhel sestupové roviny Θ a od něj jsou stanoveny jednotlivé odchylky pro každou jednotku. I zde je polovina světél orientovaných pod sestupovou osu symetricky pootočena ke druhé polovině světél orientovaných nad sestupovou osu. Konkrétní hodnota pootočení dvou jednotek nejbližších k sestupové ose, tj. jednotka „B“ a „C“, je $\pm 00^{\circ}10'$. Výrazně více jsou vychýleny krajní jednotky „A“ a „D“, kdy jejich orientace jsou rozdílné o $\pm 00^{\circ}30'$ oproti sestupovému úhlu Θ . Dále zde platí pojem minimální výška očí pilota nad prahem dráhy (METH). Ten nám říká, v jaké výšce oko pilota bude vidět barevnou kombinaci „na sestupu“. Tato spodní hrana indikace je určena úhlem menším o 2 minuty oproti úhlu nastavení jednotky „B“, tedy o 12 minut oproti sestupovému úhlu. Názorně provedeme výpočet vzdálenosti příčky PAPI od prahu dráhy, kdy sestupový úhel bude 3°. V Tabulce 5-2 v Předpise L14, jsou stanoveny minimální výšky podvozků nad prahem dráhy pro různé kategorie letadel. [2] Například největším letadlem může být Boeing 747 – 400, který spadá do nejnáročnější kategorie. Minimální výška očí pilota pro tento letoun vychází ze součtu minimální výšky kol nad prahem dráhy a vzdálenosti mezi koly letounu a očima pilota. Výsledná hodnota je 20 metrů. Úhel spodní indikace „na sestupu“ je $2^{\circ}48'$. [5] Za pomoci goniometrické funkce tangens vypočítáme vzdálenost pro usazení příčky $D1$

$$D1 = \frac{METH}{\tan(2^{\circ}48')} .$$

(1.1) [6]

Výše uvedený text platí pro ideální stav dráhy a přilehlého okolí. Vůbec se nezabývá sklonem či terénními nerovnostmi dráhy a překážkami v okolí, které by vedly ke změně úhlu sestupové roviny. Za ideální podmínky považujeme situaci, kdy terén dráhy je ideálně rovný a v přilehlém okolí se nevyskytují žádné překážky, které by narušovaly ochrannou plochu. Tato plocha byla stvořena a je definována pro jednodušší určení nezbytnosti deviace sestupové osy. V anglické literatuře se setkáme s názvem Obstacle Protection Surface, zkráceně OPS. Tvarově se jedná o lichoběžník, který začíná užší stranou u prahu dráhy a postupně se rozšiřuje pod úhlem 10°–15° od rohů přistávací dráhy do vzdálenosti 7,5–15 km. Finální rozměry ochranné plochy záleží na nejnáročnějším typu letadla využívajícího tuto přistávací dráhu. [2]

Na zřetel musíme vzít i podélný sklon dráhy. Obrázek 4 nám ukazuje příklad, kdy povrch dráhy není v jedné rovině a od prahu dráhy „T“ postupně klesá. V této situaci musí dojít k posunu světelné řady PAPI směrem od prahu dráhy, z důvodu požadavku METH. Obdobný název je Threshold Crossing Height „TCH“. Dle výsledku vzorce na obrázku 4 dojde k již zmíněnému posuvu. Obdobný postup platí i pro stoupavý sklon dráhy. [4]



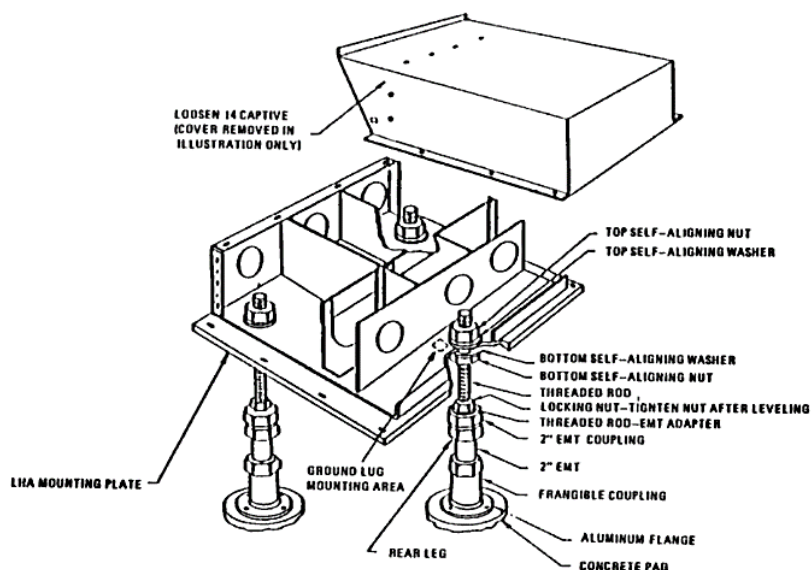
Obrázek 4: Stoupavý sklon RWY, (zdroj: [4])

O tom, že existují různě náročné skupiny letadel, bylo pojednáno už dříve. Také byla zmíněna závislost mezi PAPI a ILS, kdy vedení musí být co nejvíce stejné. Příjem signálu ILS, který je zpracováván, je tam, kde je umístěna anténa. Je to velmi triviální poznámka, ale výšková vzdálenost mezi okem pilota, které vyhodnocuje vedení PAPI, může být i více než 10 metrů. Takto velká vzdálenost nastane u letounů typu Boeing 747 nebo Airbus A380. Pro kompenzaci a také z důvodu, aby nebyla snížena bezpečnost, lze posunout světelnou příčku PAPI o 90 m + 15 m, - 0 m nad rámeček vzdálenosti bodu dotyku určeném ILS. [4]

Aby se předešlo nechtěnému zmatení pilotů nejnáročnějších letadel 4. kategorie, lze nastavit světelná návěstidla tak, aby úhel mezi jednotkou B a C byl více rozevřený, a to na 0,5°.

1.3 Vnitřní struktura reflektoru

Jak už bylo naznačeno dříve, obecně se jedná o speciální druh venkovního reflektoru. Typicky bývá usazen na třech podpěrách, které umožňují jemnou nivelaci a samotné nastavení rámu do požadovaného sestupového úhlu. [7] Celá jednotka musí být zcela odolná vůči proudění z motorů letadel a zároveň při možné srážce s letadlem nesmí způsobit velké škody. Doslova řečeno, při srážce dojde ke zlomení lámacích spojek a jednotka bude odtlačena pryč. [3] Na obrázku 5 lze vidět schéma podstavy a samotného rámu, který se skládá z horní a dolní části.



Obrázek 5: Části podstavy, (zdroj: [7])

Proces úpravy světla do požadované projekce byl popsán v kapitole 1.1. V nejvíce rozšířených typech reflektorů PAPI jsou zdrojem světla halogenové žárovky o výkonu 200 W při odběru proudu 6,6 A. Pro takovou žárovku je charakteristická i patice Pk30d s průměrnou dobou životnosti 1000 hodin.

Kvalitu projekce snižují meteorologické podmínky, jako je sníh, led a případně kondenzace, která se vytváří uvnitř. Efektivním bojem proti těmto nechtěným vlivům je přidání samostatného nezávislého topného elementu, který změní vnitřní podmínky, a zamezí tak tvoření kondenzátu nebo námrazy. Výkonnost těchto tepelných těles je relativně malá, pohybuje se okolo 50–150 W. [3]



Obrázek 6: Vnitřní struktura reflektoru, (zdroj: [38])

1.4 Napájení

Jedním z mnoha požadavků na systém PAPI je, aby mohl být využitelný v jakoukoliv denní i noční dobu. Na měnící se okolní světelné podmínky, jako jsou rozbřesk a soumrak, musí být adekvátně zareagováno tím, že se změní intenzita vyzařovaného světla z reflektorů. Jinak by docházelo ke zbytečnému oslnění pilotů přibližovaných letadel, a to by vedlo ke snížení bezpečnosti provozu. V opačném případě by nemusela být jasně rozeznatelná vyzařovaná barva. Tyto relativně malé změny v intenzitě vyzařování zajišťuje automaticky řídicí jednotka systému. Minimální svítivost je stanovena na 15000 kandel ve svazku světla, který je nejbližší ose vyzařování. [3] Svítivost se definuje jako hustota světelného toku podle vztahu:

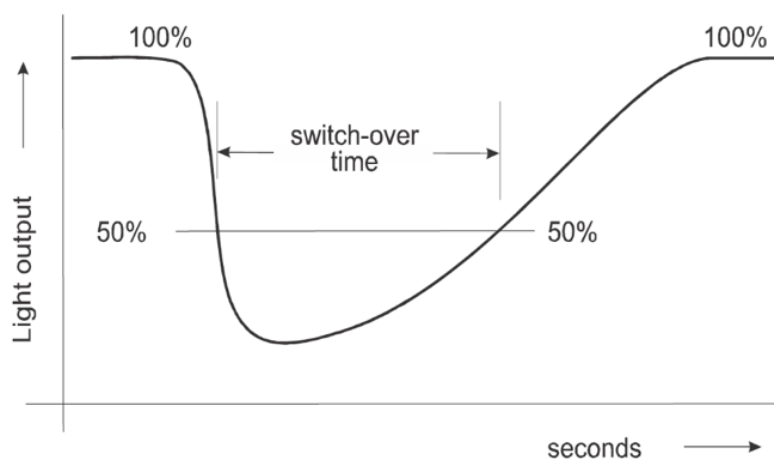
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} . \quad (1.2)$$

Jedná se o podíl světelného toku Φ a vyzařovaného úhlu Ω . Pro představu: svítivost PAPI je přibližně třikrát menší než svítivost předních reflektorů automobilu. [8]

Ovšem to není jediná možnost, jak měnit intenzitu svitu, existuje také možnost manuálního ovládání. Vývod tohoto ovládacího panelu musí být zaveden minimálně do řídicí věže letiště, aby sami řídicí letového provozu měli možnost reagovat na měnící se světelné a povětrnostní podmínky. Další možnost manuálního ovládání je skrze radiokomunikaci. Řídicí jednotka systému je napojena na radiostanici, která je naladěná na frekvenci používanou tamním letišťem a vyhledává krátkodobé klíčování v radiokomunikačním provozu. Krátkodobým klíčováním se rozumí situace, kdy pilot pouze klikne spínačem mikrofону letadlové vysílačky. Dle počtu těchto zaklíčování se zcela rozsvítí reflektory nebo změní svoji intenzitu svitu. Tento

system se používá na méně vytížených letištích, kdy skončila provozní doba letiště, ale stále jsou dovoleny přílety a odlety. [9]

Zajištění dostatečného a spolehlivého množství elektrické energie pro chod leteckých navigačních zařízení nemusí být vždy jednoduchý úkol. Základní náležitosti daného zdroje jsou popsány v Předpisu L14, Hlava 8 – Elektrické systémy s odkazy na detailní specifikace v ADM – Part 5, Electrical systems. Nicméně se nemusí vždy jednat pouze o jediný zdroj, ale rovnou o kombinaci několika samostatných vnějších zdrojů. Právě úroveň bezpečnosti provozu letišť a jejich vybavení se odvíjí od kvality a kontinuálnosti dodávek elektrické energie. Zcela nepřetržitou dodávku zajistit nelze, proto se musí počítat s nenadálým výpadkem, případně výpadky. Nejprve si musíme stanovit, jak prioritní v porovnání s ostatními systémy jsou PAPI. Pro rozklíčování této otázky slouží pro území České republiky Tabulka 8-1 v Předpisu L14. Z ní se dozvíme, že úroveň zálohování (Switch-over time) pro světelnou sestupovou soustavu pro vizuální přiblížení je 15 sekund. Platí jak pro nepřesné přístrojové přiblížení, tak i pro přesné přístrojové přiblížení. To znamená, že doba poklesu svitu pod 50 % a jeho následný vzestup nad 50 % nesmí přesáhnout 15 sekund. Zaměříme zde pozornost na poznámku k maximální době přepnutí z hlavního zdroje na záložní. Ta nám říká, že pokud jsou přiblížení prováděna nad nebezpečným či členitým terénem, tak maximální doba přepnutí je 1 sekunda. Za záložní zdroje můžeme považovat motorgenerátor, baterie nebo jejich kombinaci. [2]



Obrázek 7: Doba přepnutí, (zdroj: [9])

1.5 Budoucnost PAPI

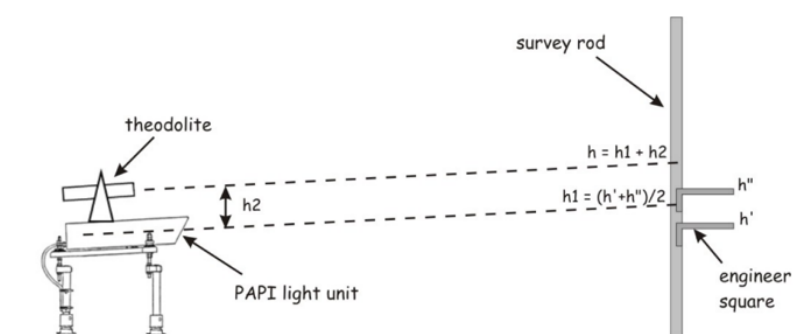
Pro budoucnost existují dva hlavní směry, kam se dále ubírat. První předpoklad počítá s pokračujícím požadavkem ze strany legislativy na existenci systémů VSGL a v tomto případě bude docházet k modernizacím a přechodům na jiné zdroje světla. Pravděpodobně do jakéhokoliv jiného odvětví, a letectví nevyjímaje, prostupují nebo už plně vstoupily technologie typu solid-state. Jedná se o polovodiče, pokročilé elektrické obvody a v našem případě i elektroluminiscenční diody (LED). Tyto světelné zdroje vyčnívají nad tradičními halogenovými žárovkami svojí dlouhou životností a nízkými náklady na provoz. Číselně vyjádřeno, jedná se o úsporu mezi 62 % až 80 % elektrické energie. Ohledně životnosti LED zdroje je nutné zohlednit podmínky, ve kterých zařízení pracuje. Pokud se jedná o provoz vyžadující vysokou intenzitu svitu, je životnost minimálně 60000 hodin. V normálních podmínkách je životnost LED až 150krát delší oproti 200 W halogenové žárovce. [10]

Druhým hlavním směrem je implementace konceptu FAROS (Final Approach Runway Occupancy Signal) k reflektorům PAPI. Jedná se o zařízení, které monitoruje vstup a opouštění přistávací a vzletové dráhy letadly nebo vozidly. Využívá k tomu změny magnetické indukce ve smyčkách, které jsou zabudovány pod letištním povrchem. V situacích, kdy je na dráze zaznamenán pohyb letadla, se systém FAROS změní z kontinuálního svitu na přerušovaný, a tím dává letadlu na finálním přiblížení vědomí o tom, že dráha je okupována jiným strojem, anebo dokonce vozidlem. Tento systém je zatím v testovacích fázích a nenahrazuje povolení vydaná stanovištěm ATC. [11]

2 Současné metody kalibrace

Nejlépším způsobem, jak si ověřit, že jakékoliv zařízení je správně nainstalované a vykazuje správný, tedy požadovaný chod, je podrobit ho kalibračnímu procesu. Tento proces pracuje s předpokladem teoretického chodu, a vytváří tedy očekávání – v našem případě – změn vyzařovaných barev. Teoretický chod je odvozen z technických výkresů, schémat a místních předpisů. Obecně můžeme ověřování rozdělit na dva druhy: **pozemní ověřování a letové ověřování**.

Pozemní ověřování se provádí při nebo hned po instalaci daného zařízení. Můžeme ji nazvat i zběžnou kalibrací. Při této činnosti dojde k hrubému fyzickému seřízení úhlového nastavení jednotlivých jednotek za použití speciální vodováhy, přiložené k rámu reflektoru. Přesnější pozemní metody zahrnují i pokročilejší a sofistikovanější vybavení, jako je použití teodolitu. Je nezbytné dbát na bezpečnost práce při výkonu metody s teodolitem. Zařízení PAPI musí být pro tento účel nastaveno na nejnižší možný vyzařovací výkon a pozorovatel u měřicí latě (Survey Rod) by měl být vybaven slunečními brýlemi. Pokud není možné z jakýchkoliv důvodů snížit vyzařovací výkon, je podmínkou provést měření s nasazenými svářečskými brýlemi. To je názorně ukázáno na obrázku 8, kde pozorovatel nejprve detekuje rozsah přechodu vyzařovaných barev a zaznamená je hodnotami h' a h'' . Průměr těchto hodnot je hodnota h_1 , která nám udává výšku protnutí měřicí latě prodlouženou osou reflektoru. Obsluha teodolitu zjistí vzdálenost h_2 mezi teodolitem a reflektorem PAPI. Poté přičte hodnotu h_1 a nasměruje teodolit na výslednou hodnotu na měřicí lati. Výsledný úhel získaný z teodolitu je úhel nastavení reflektoru PAPI. Doporučená vzdálenost mezi obsluhou a pozorovatelem je v tomto případě zhruba 15 metrů.



Obrázek 8: Pozemní kalibrace, (zdroj: [12])

Na takto krátké vzdálenosti bohužel nemůžeme počítat s okamžitou změnou vyzařovaných barev, a proto se používá výše zmíněný rozsah přechodu. Bezprostřední změnu je pozorovatel schopen zpozorovat až ve značné vzdálenosti – přibližně 300 metrů.

Druhým způsobem oproti pozemnímu ověřování je **letové ověřování**. Jak název napovídá, je zde využito letadlo z řady civilních letounů, které bylo podrobena úpravám dle požadavků na

vybavení pro kalibraci jednotlivých leteckých pozemních zařízení LPZ. Cílem každého kalibračního měření je stanovení aktuálního nastavení. Od toho závěru lze vytyčit nezbytnou korekci, aby následující nastavení bylo v požadovaných limitech. [12]

2.1 Požadavky na letoun

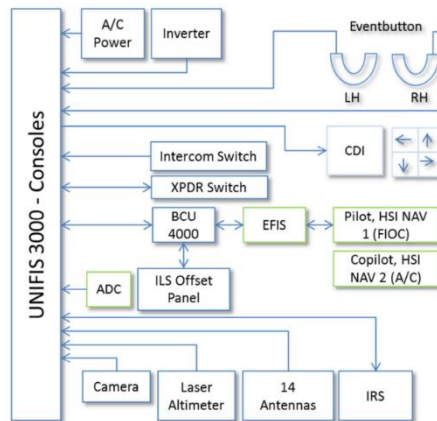
Zcela nepraktické je mít několik letounů a každý pro jiný typ LPZ, proto jsou tyto letouny upraveny instalací měřicích zařízení. Zde je kladen důraz na možnost maximálního rozsahu schopnosti kalibrovat různé typy LPZ jedním letounem. Zcela bezpodmínečně musí být vybrán letoun spolehlivý a neměl by být zvolen model, který je veden jako experimentální kus. Musí vykazovat relativně snadné ovládání se zaměřením na bezpečnost při malých rychlostech letu a měl by mít certifikaci pro přístrojové létání IFR. Následujícím, neméně důležitým požadavkem je zohlednění hluku vibrací za letu. Přístroje, kterými je letoun osazen, jsou náchylné právě na vibrace a kvalitu napájení. Různé pohonné jednotky vykazují různé stupně hluku a vibrací. Mezi motory s nejnižšími vibracemi se řadí proudové nebo turbovrtulové pohonné jednotky. S tím souvisí i kvalita napájení, kdy generátory na palubě nesmí generovat podpětí a šum, který by mohl vést k poškození vybavení. Další požadavky poukazují na ergonomii komfortu pro posádku, přesněji vybavení autopilotem, který značně sníží pracovní vytížení pilotů, a dostatečná schopnost vyhřívání a klimatizování kabiny nejen pro posádku, ale i měřicí přístroje. [13] Jelikož se v celkovém pohledu jedná o létající laboratoř, tak pokud je registrována v České republice, musí se její provozovatel a personál řídit normou ČSN EN ISO/IEC 17025 (Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří).

2.2 Měřicí přístroje

S rostoucí složitostí navigačních přístrojů přichází i složitější úkol tato zařízení udržovat ve správném chodu. Pro zajímavost, za první letecké pozemní zařízení určené k navigaci letadel se považuje letecký maják, který je velmi podobný tomu pro námořní dopravu. Tento styl navigace byl zaveden v roce 1920 ve Spojených státech a tvořil soustavu prvních leteckých koridorů. Každý maják byl vzdálen 10 mil od předchozího. Kalibrace v tomto případě byla velmi prostá, v dobrém počasí musel letecký inspektor vidět následující maják. S onou přibývajícím složitostí různých způsobů navigace potřebují letečtí inspektoři vybavení, které jim snáze poskytne potřebné výsledky měření. Dnes tento úkol zastávají specializovaná výpočetní zařízení známá pod anglickým názvem Automated Flight Inspection System (AFIS), která neslouží k navigaci letounu, ale pouze k vyhodnocování a stanovení kalibrace měřeného LPZ na základě porovnání polohy stanovené letounem a polohy stanovené jednotou AFIS. [14]

2.2.1 UNIFIS 3000

Příkladem AFIS je zařízení UNIFIS 3000, které se stalo bez nadsázky evropským standardem vybavení inspekčních letadel. Tento systém AFIS byl vyvinut společností Norwegian Special Missions a využívá ho i Oddělení letového ověřování ŘLP ČR, s. p. [15]



Obrázek 9: Schéma komponent UNIFIS 3000, (zdroj: [39])

Pole využití tohoto měřicího systému je skutečně rozsáhlé. Je způsobilé k letovému ověřování všech radionavigačních a radiokomunikačních LPZ (ILS, VOR, DME, NDB, MKR, VDF, RADAR, PAPI, VASIS, komunikace UHF, VFH atd.). Poziční systém zařízení je schopen určit polohu s přesností na 5 až 7 cm. To poskytuje dostatečnou přesnost ke kontrole ILS kategorie III. [16]



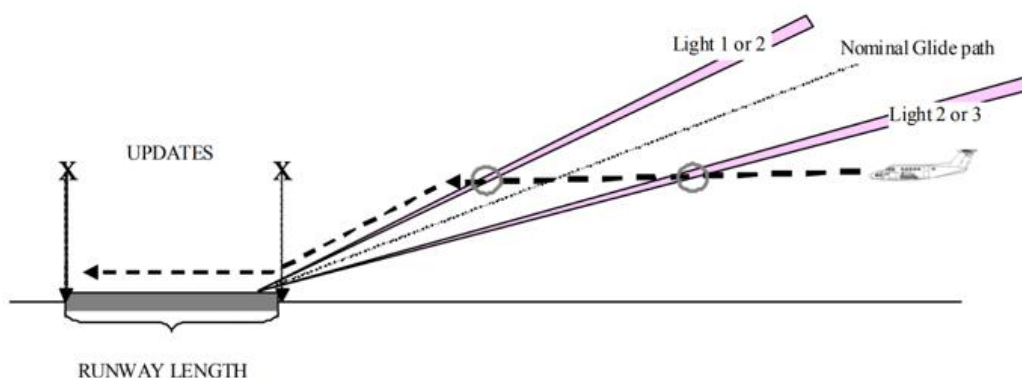
Obrázek 10: UNIFIS 3000, (zdroj: [40])

2.3 Metody doporučené FAA

V roce 2015 uveřejnil Federální úřad pro letectví (FAA) dokument s názvem Flight Inspection Manual s cílem poskytnout a sjednotit všechny standardizované metody letových ověřování. Nejedná se o přímé nařízení, kterou metodu používat, protože je na každé letové skupině, jakou metodu si zvolí praktikovat. Záleží na individualitě prostředí. Více méně každé letiště má několik objektů ve své blízkosti vyhodnocených jako nebezpečné letecké překážky. Pro příklad lze uvést komíny továren, vysílače, větrné elektrárny apod. Vyhodnocení těchto rizik a náročnosti manévrování s letounem může vést k limitaci možných metod. Ve zmíněném dokumentu jsou popsány postupy určené pouze pro letadla s pevnými nosnými plochami. Typicky se může jednat o turbopultové letouny značky Beechcraft řady King Air nebo proudové letouny typu Cessna Citation či Dassault Falcon. Pro letové ověřování systému PAPI jsou vypracovány celkem tři zcela různé metody pro ověření nastavené sestupové roviny: Level Run Method, On-Path Method a Theodolite Method. Další položky ověřování jsou stranové krytí, intenzita svitu, kontrast a bezpečná vzdálenost od překážek.

2.3.1 Level Run Method

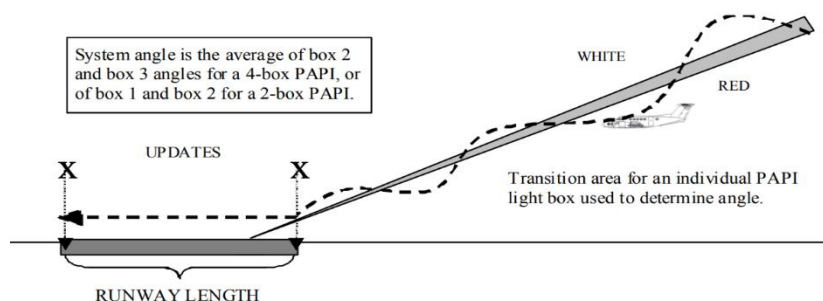
Tato metoda je navržena a určena pro systém PAPI a neměla by být použita pro soustavu typu VASI. Pracovní postup je následující. Kalibrační letoun poletí v ose dráhy a v takové výšce, aby před započítím měření pilot viděl všechny reflektory svítit červeně. Celou dobu bude udržovat konstantní rychlost a výšku. V závislosti na vzdálenosti počátku měření od prahu dráhy je nutné zvolit optimální rychlost letu. S nižší vzdáleností se doporučuje nižší rychlost. Během letu letecký inspektor (pilot) ohlašuje nebo zaznamenává změny prostřednictvím zmáčknutí tlačítka v kabině letounu, které je spojeno se systémem AFIS. Minimální počet zkušebních měření jsou dvě, nicméně doporučený počet jsou tři měření. Pokud jsou pro danou dráhu poskytovány další typy pozemního navádění, jako jsou ILS, MLS, PAR, musí být stanovena odchylka mezi systémem PAPI a jedním ze zmíněných LPZ. Výhodou této metody je relativně malý počet letů, a to díky tomu, že při jednom přiblížení jsou měřeny všechny reflektory. Výsledný počet letů jsou tři. [17]



Obrázek 11: Level Run Method, (zdroj: [18])

2.3.2 On-Path Method

Všestranná metoda je určena pro jakýkoliv typ světelných naváděcích soustav. Podobně jako u metody Level Run je počátek měření v ose dráhy a pod úrovní sestupové osy. Doporučená výška počátku měření je 1000 stop AGL (nad povrchem země). Při zaznamenání změny barvy pilot ohlásí nebo stiskne příslušné tlačítko AFIS v pilotní kabině. Poté pilot přejde do klesání a vyhledává další změnu. Výsledná trajektorie letu je fluktuace na rozhraní přechodu dvou barev. Stejně jako u předchozí metody jsou vyžadována minimálně dvě měření a doporučena tři. Nevýhodou této metody je větší počet letů, protože každý reflektor se ověřuje zvlášť. Dohromady to jsou celkem čtyři lety přiblížení za předpokladu dodržení doporučeného postupu. Obtížnější je stanovení závislosti na dalších naváděcích zařízeních LPZ, jako jsou ILS, MLS, PAR atd. [17]



Obrázek 12: On-Path Method, (zdroj: [18])

2.3.3 Theodolite Method

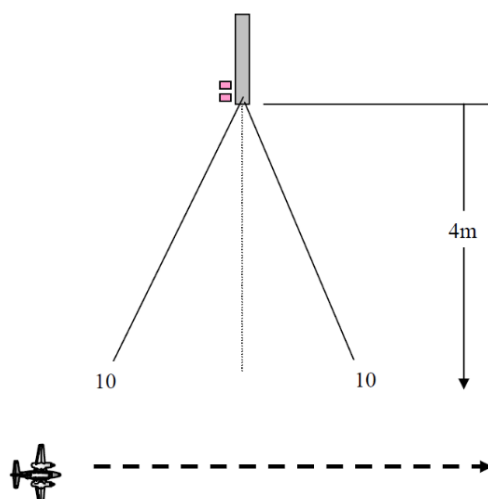
Poslední publikovaný postup zahrnuje použití teodolitu. Toto měřicí zařízení je schůdné pro měření obou výše zmíněných metod a není zapotřebí AFIS. Pozorovatel s teodolitem je umístěn na úroveň RRP, tedy tak, aby okulárem teodolitu procházela sestupová osa. Letečtí inspektori v obou případech nalítnou pod sestupovou rovinou do osy dráhy. Zde se důrazně doporučuje provádět měření na co nejmenších rychlostech, tedy aby byl letoun uveden do přistávací konfigurace. Pozorovatel teodolitem sleduje okno pilota a zaznamenává naměřené úhly přechodů ohlášené pilotem. Časová náročnost a kvalita provedení závisí na schopnostech pozorovatele. [18]



Obrázek 13: Použití Theodolite Method, (zdroj: [45])

2.3.4 Stranové krytí

Zkoumaný úhel stranového krytí je dán 10° na obě strany od prodloužené osy dráhy. Pilot zaujme výchozí polohu, která se nachází v dostatečné vzdálenosti od prahu dráhy, směr letu je kolmo k prodloužené ose dráhy a ve výšce, která je nad OPS. Konkrétní výška není stanovena, je pouze doporučeno letět v bezpečné vzdálenosti nad překážkami. Směr přeletu osy může být libovolný zprava doleva nebo zleva doprava. To neplatí, pokud jsou reflektory nainstalované na obou stranách RWY, a v tomto případě bude proveden inspekční let z obou stran. V průběhu letu pilot pozoruje správnost chodu PAPI, kontroluje, zda nedošlo k zaclonění reflektoru jakýmkoliv objektem. Veškeré anomálie hlásí pilot letovému specialistovi, který vyhodnotí úhlové pokrytí. V případě, že došlo k zaclonění nebo systém PAPI vykazuje použitelnost méně než 10° od osy dráhy, je nařízeno vydat NOTAM a tento fakt zapracovat do letištní dokumentace. [18]



Obrázek 14: Letová kontrola stranového krytí, (zdroj: [18])

2.3.5 Intenzita svitu, kontrast a tlumení

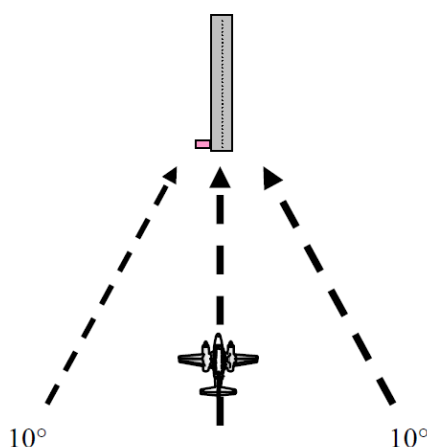
Intenzita svitu a kontrast jsou jediné dvě položky, které v rámci měření nepotřebují svůj vlastní let, neboť jsou zakomponovány v jakémkoliv předešlém úkolu. Pozorovatel hodnotí jednotlivé reflektory, zda je intenzita svitu všech jednotek přibližně stejná a dále jestli nemůže být ani jedna z jednotek zaměněna za jiný zdroj světla v okolí.

Kontrola tlumení znamená ověření správnosti chodu všech stupňů intenzity svitu. Jak lze nastavit intenzitu svitu, je popsáno v kapitole 1.4. [18]

2.3.6 Bezpečná vzdálenost od překážek

V kapitole 1.2 byla uvedena Ochranná plocha OPS, která slouží k určení rizikových objektů v blízkosti sestupové osy. Pro ověření, že reflektory PAPI uvedené do provozu jsou viditelné právě v blízkosti OPS, je zapotřebí provést kontrolní manévry. Letové ověřování se provádí letem po rozhraní ochranné plochy směrem k prahu dráhy. Zkoumá se, zda tuto plochu nenarušuje jakákoliv překážka, a po celou dobu letu musí všechny reflektory viditelně svítit červeně.

Není vyžadováno, aby tato procedura byla zapojena do pravidelného letového ověřování, a provádí se tedy pouze po instalaci nové jednotky (PAPI) nebo při výskytu překážky, u které panují pochybnosti. [18]



Obrázek 15: Kontrola OPS, (zdroj: [18])

2.3.7 Pravidelné letové ověřování PAPI na LKPR

Metodika je složena ze tří fází. První fáze letového ověřování používá metodu Level Run a jsou přitom měřeny úhly návěstidel, barevná rozlišitelnost a intenzita. Ve druhé fázi je kontrolováno stranové krytí. Rozdílem oproti metodice od FAA je větší rozevření zkoumaného úhlu, a to na 15° na obě strany od prodloužené osy dráhy. Třetí fáze je založena na trajektorii metody On-Path, kdy letoun střídá polohu nad a pod sestupovou rovinou. Nejsou měřeny úhly návěstidel, ale pouze se zkoumá intenzita, kontrast a tlumení. [19]

2.3.8 Intervaly letových ověřování a tolerance

První letové ověřování nastane po nainstalování daného systému nebo pokud se jedná o odstávku delší jak 30 dnů. Nelze stanovit jednu univerzální periodicitu letových ověřování, protože zde musí být brán ohled na specifika jednotlivých systémů. Právě tyto jednotlivé, jinak řečeno rozdílné systémy světelných zabezpečovacích zařízení vykazují různou spolehlivost. Délka periodicity tak zpravidla vychází ze stáří zařízení, možnosti údržby a náchylnosti na okolní podmínky. [20] Samotná maximální délka intervalů je definována ze strany státu, na jehož území je dané zařízení provozováno. Česká legislativa dále upravuje délku intervalu podle toho, pod jakou úroveň přiblížení je toto SZZ přiřazeno. V tabulce 1 jsou zpracovány intervaly letových ověřování světelných LPZ, údaje byly převzaty z Dodatku N, Předpisu L14 a redukovány pro naše potřeby. Hodnoty dob platnosti a tolerancí jsou uvedeny ve dnech.

Druh LPZ	Pravidelná letová ověřování	
	Doba platnosti	Tolerance
SZZ CAT II a III	180	30
SZZ NPA / CAT I	360	30
SZZ VFR NOC (letišťe)	360	30
PAPI / A-PAPI (letišťe)	360	30

Tabulka 1: Intervaly letových ověřování, (zdroj: vlastní zpracování dle [2])

Do rozsahu prací pravidelného ověřování minimálně patří úhlové nastavení, stranové krytí, intenzita svitu, kontrast, tlumení a koincidence s elektronickou sestupovou osou. Mimořádné letové ověřování může být vyvoláno na žádost státního dozoru nebo při narušení OPS. [2]

Tolerance nastavení vizuální sestupové roviny je $\pm 0,2^\circ$ od jmenovitého úhlu. [18] Při posuzování koincidence s elektronickou sestupovou rovinou se rozlišuje rozdíl mezi úhlem sestupové roviny PAPI a například sestupové roviny ILS. V tomto případě je elektronická sestupová rovina nadřazená té světelné. Zásadní podmínkou je, že v žádném případě nesmí pilota mást světelná sestupová rovina, a proto se seřizuje podle elektronické sestupové roviny. Maximální přípustný rozdíl mezi nimi je $\pm 0,2^\circ$. [18]

3 Alternativní metody kalibrace

Snaha optimalizovat zavedené a odzkoušené postupy za účelem snížit provozní náklady se velkou měrou promítá do všech odvětví letecké dopravy. Vyvíjejí se nové, lehčí materiály, nové, úspornější pohonné jednotky, nová navigační zařízení pro optimalizaci vzdušných tratí (Airways) a mnoho dalšího za účelem šetřit životní prostředí i finance. V poslední dekádě skoro každý zaznamenal nárůst zájmu o civilní bezpilotní systémy, které mohou sloužit oficiálně pro rekreaci nebo pro letecké práce. Popisu bezpilotního systému bude věnována následující podkapitola. Pomineme rekreační část a budeme se věnovat pouze leteckým pracím. Využití bezpilotních systémů je velmi pestré, jako například monitorování požárů, hledání pohřešovaných osob, a dokonce i výsadba stromů. Letecké práce ovšem zahrnují i letové ověřování a existují zmínky o snahách implementace systémů UAS (Unmanned Aircraft Systems). Pořizovací cena multikoptéry je nesrovnatelná s pořizovací cenou kalibračního letounu. Pokud ale chceme začít UAS ověřovat některé LPZ, musíme si stanovit, jaké jsou požadavky na dané LPZ. Pro náš případ systému PAPI je nutné ověřit správnou orientaci reflektorů, a pokud je poskytováno přístrojové přiblížení, tak i vzájemnou korelaci s výstupy ze systémů pro přesná přístrojová přiblížení. To přináší další náklady na speciální vybavení UAS, které dokáže zpracovat například signál systému ILS. V tomto bodu vyvstává otázka, jak moc se vyplatí vývoj a investice do takto komplexního bezpilotního prostředku. Dále je potřeba stanovit, pro jaké letové ověřování bude UAS používán, zda se bude jednat o pravidelné, nebo mimořádné ověřování.

3.1 Popis UAS

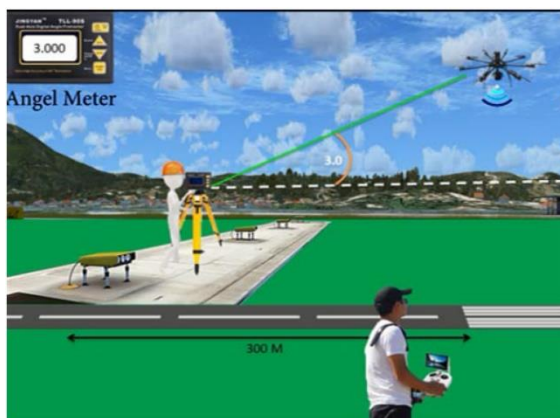
Pro potřeby této práce a ujednocení terminologie definujeme pro nás potřebný bezpilotní systém (UAS). V Předpise L2 doplnku X lze najít následující doslovnou deskripci: „*Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bepilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více.*“ [21] V našem každém dalším případě bude bezpilotní systém těžší než vzduch, bude tedy muset vytvářet vztlak aerodynamickými silami. V současné době ideálními kandidáty pro leteckou práci letového ověřování bezpilotním systémem jsou typy multikoptér.

Učební texty pro piloty UAS popisují multikoptéru jako „*motorové vrtulové letadlo s přibližně svislou osou rotace nosných pohonných jednotek*“. Rozdělení samotných multikoptér je pak podle počtu pohonných jednotek. [22]

3.2 Laser Beam

V roce 2018 byl na konferenci International Flight Inspection Symposium (IFIS) představen návrh kalibrace úhlového nastavení reflektorů PAPI za použití dronu a viditelného laserového paprsku. Mezi potřebné vybavení se řadí multikoptéra s videozáznamovým zařízením na palubě, přesná digitální vodováha osazená laserem III. třídy s dosahem minimálně 2 km a maximálním rozptylem 1 cm. Jsou zde dvě stanoviště, jak napovídá obrázek 16. Na prvním stanovišti je operátor digitální vodováhy a laseru, jehož úkolem je nastavovat nominální úhlové hodnoty pro každý reflektor na základě komunikace s pilotem dronu. Druhé stanoviště je pilot dronu, ten je zodpovědný za bezpečnost letu a vyhodnocení aktuálně vyzařované barvy světla z reflektoru. Postup práce je následující. Pilot multikoptéry po vzletu provede přelet nad místo měření a operátor uvede laser do chodu a nastaví první úhel 2.5° . Pilot převede multikoptéru do stoupání a vyhledává laserový paprsek, po najetí na nejsilnější příjem laserového paprsku převede dron do visu. V této výšce je očekávaný první přechod červené do bílé. Tuto hypotézu vyhodnotí pohledem na živý obrazový výstup. Inspekce zbývajících jednotek PAPI probíhá na naprosto stejném principu. [23]

Z analýzy této metody vyplynuly některé nevýhody. První nevýhodou této metody je již zmíněný přednastavený úhel, pod kterým bude laser vyzařovat paprsek. Proto je obtížné stanovit případnou korekci, kdy musí operátor a pilot intenzivně spolupracovat, aby našli správně zaměřenou odchylku. Druhou nevýhodou je využití laseru. Pokud podmínky stanovují použití laseru s minimálním dosahem 2 km, je nezbytné brát ohled na bezpečnost v prostoru relativně daleko za prahem dráhy. Mohlo by zde totiž dojít k nechtěnému oslnění pilotů jiného letadla, které je právě v tomto prostoru. [24] Americká FAA za rok 2019 eviduje přes 6100 případů oslnění letadla laserem ze Země. [25]



Obrázek 16: Vizualizace, (zdroj: [23])

3.3 Stranové krytí, intenzita svitu a kontrast

Koncepce ověřování stranového krytí poukazují, že lze provádět obdobným způsobem jako při použití letounu s jediným rozdílem, a tím je vzdálenost UAS oproti vzdálenosti, v jaké by se pohyboval letoun.

Pro ověření intenzity svitu a kontrastu je doporučeno mít na palubě multikoptéry světelný senzor, jelikož videozáznam nebo živý přenos výstupu z kamery na palubě neposkytuje věrohodný obraz a dochází ke zkreslení. Světelný senzor toto zkreslení zkompenzuje a poskytne pozorovateli lepší přehled o situaci. [26]

3.4 Bezpečná vzdálenost od překážek

Určit nebezpečné překážky, vzdálenost mezi OPS a potenciálně nebezpečnými překážkami za pomoci UAS lze dvěma způsoby. Prvý je let po rozhraní OPS, tedy postup podobný tomu současnému s použitím letounu. Výhodou je využití již známého postupu a nevýhodou je časová náročnost, kdy doba letu multikoptéry je značně delší než doba letu kalibračního letounu. Druhým způsobem je koncepce představená Brazílským řízením letového provozu, jež eviduje přes 160 VGSI zařízení. Tato koncepce poukazuje na využití technologie 3D mapování terénu při ověřování bezpečné vzdálenosti od překážek. Požadavek na tuto technologii je, aby dokázala určit překážku s nejvyšší nadmořskou výškou a vypočítat vzdálenost do OPS. [26]

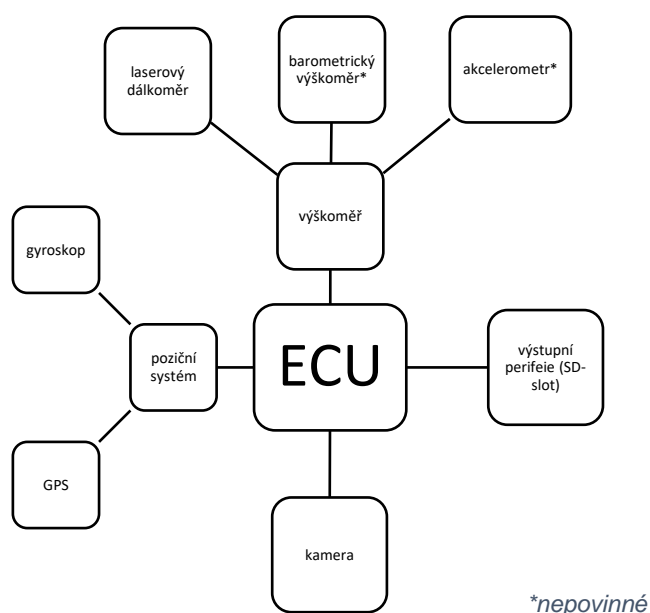
Zajímavý pohled na hodnocení překážek předkládá Český obranný standard ČOS 584101. Ten uvádí, že pokud jsou vedeny přesné topografické plány v prostoru OPS, je předvídatelný růst vegetace. V tomto případě lze část úkonů letového ověřování provést na zemi. [20]

3.5 Návrh vlastní alternativní metody

Dalším cílem této bakalářské práce je vyvinout vlastní postup kalibrace úhlového nastavení PAPI za použití bezpilotního prostředku. Naši koncepci budeme směřovat pro dráhy, kde není poskytováno přístrojové přiblížení. Tento návrh počítá s bezpilotním prostředkem, který bude mít veškeré měřicí vybavení na palubě, a tedy nebude zapotřebí dalšího externího zdroje dat. Nejlepším kandidátem z řad UAS pro tento úkol je multikoptéra a s ní spojená jednoduchost implementace vlastního vybavení. Konkrétněji lze poukázat na multikoptéry řady Matrice od firmy DJI s nosností až 6 kg nákladu. Výhodou využití laserového dálkoměru jako výškoměru je relativně přesně změřená vzdálenost za nízkou pořizovací cenu.

3.5.1 Požadavky na UAS

Za náklad nesený multikoptérou je považována měřicí stanice, která se skládá minimálně z následujících komponent: řídicí jednotky, která zpracovává vstupní data z výškových a polohových senzorů; vlastního pozičního systému, pokud není možnost horizontální polohu sdílet mezi multikoptérou a měřicí stanicí na palubě; údaje o výšce budou získávány primárně z laserového dálkoměru; jako další zdroj výškové informace lze použít například barovýškoměr nebo odvodit polohu na základě výpočtu zrychlení z akcelerometru, případně využít jejich kombinaci; poslední položkou nutné výbavy je videozáznamové zařízení. Zpracovaná data o výšce a poloze je doporučeno promítat přímo do videozáznamu. Finální výstup videozáznamu by měl připomínat pohled skrze Head – Up Display.



Obrázek 17: Schéma návrhu zapojení měřicí stanice, (zdroj: vlastní zpracování)

Způsob vyhodnocování výšky musí být uzpůsoben schopnostem jednotlivých komponent. Řídicí jednotkou (ECU) měřicí stanice může být jednodeskový počítač.

Pro bezpečný provoz multikoptéry je nezbytné implementovat záchranný systém, aby chování modelu bylo bezpečné i při poruše. Může se jednat například o poruchu na přijímači.

3.5.2 Laserový dálkoměr

Při měření vzdálenosti několika desítek metrů si dnes nedokážeme představit, že bychom nepoužili laserový dálkoměr. Přesnější označení je bezdotykové měření a zařízením je elektrooptický dálkoměr, který využívá monochromatický zdroj světla (laser). Dále tyto měřiče můžeme rozdělit podle principů měření, a to na impulzní, fázové, nebo frekvenční. Benefity použití laserového dálkoměru jsou nízká pořizovací cena a relativně vysoká přesnost měření.

Například by se mohlo jednat o výrobek SF30 High Speed Laser Rangefinder, který je vhodný svým dosahem měření 100 m, přesností ± 10 cm, malými rozměry, nízkou hmotností a je bezpečný k použití (Třída 1M). [27]



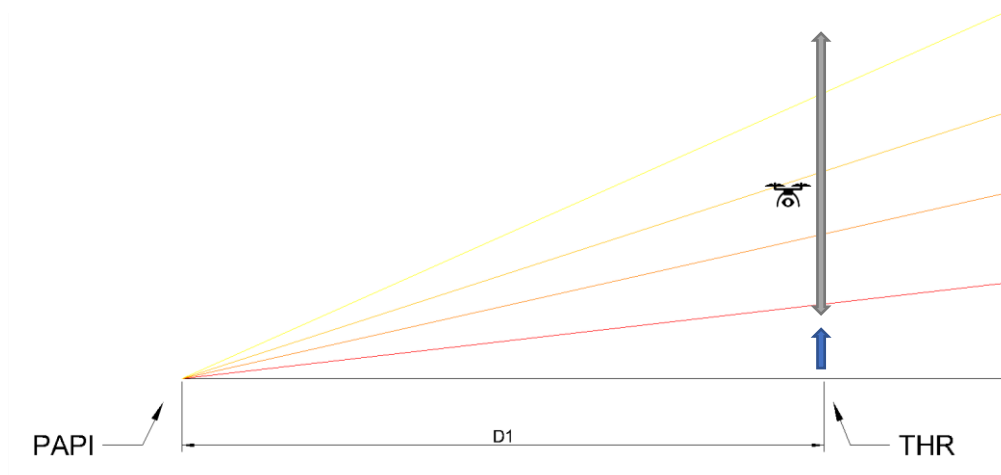
Obrázek 18: SF30/SF11, (zdroj: [27])

3.5.3 Trajektorie letu

Místo měření je navrženo na práh přistávací dráhy, a to z několika důvodů. Prvním je znalost místa takto význačného bodu, jako je horizontální poloha a elevace. Druhým je dobrá odrazivost paprsku laserového dálkoměru od povrchu přistávací dráhy. Zde vycházíme z předpokladu, že na letišti je zpevněná dráha. Předletová příprava by měla zahrnovat výpočet predikce přechodů barev pro jednotlivé reflektory, a tím usnadní odhad minimální i maximální výšky stoupání. Pro stanovení zběžného odhadu výšek jednotlivých přechodů využijeme trigonometrickou funkci tangens. Poté lze stanovit, že

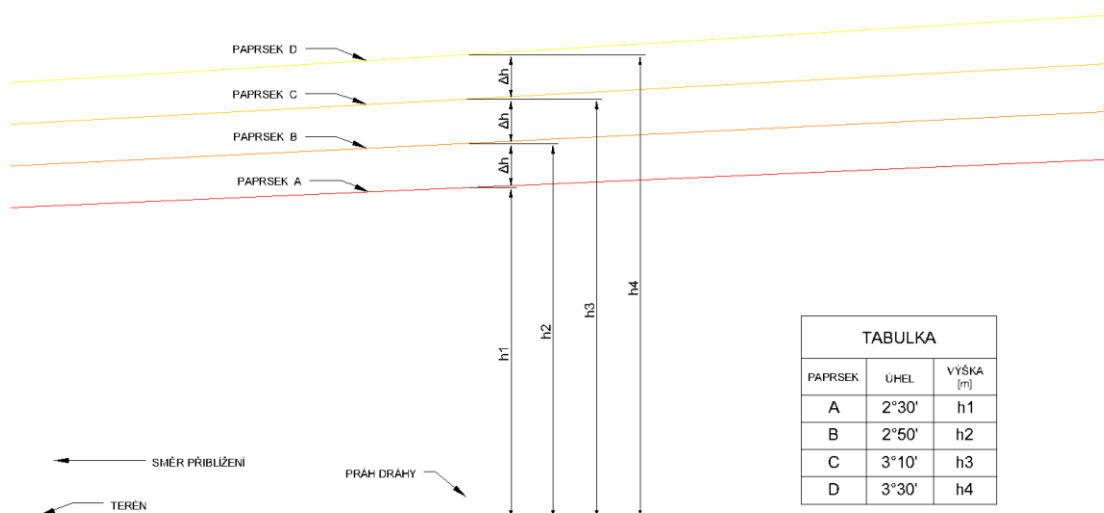
$$h_i = \tan(\alpha_i) \cdot D1 \tag{3.1}$$

Trajektorie měřícího letu je pak až prostá. Multikoptéra odstartuje z prahu dráhy a bude pokračovat svislým pohybem vzhůru s minimálními horizontálními odchylkami. V h1 metrech dojde k přeměně barvy vyzařovaného světla z červené na růžovou při nastavení sestupového úhlu 2.5° . Toto je signál, že je mýjen přechod dvou barev (obrázek 20). Růžová barva bude přecházet plynule do bílé.



Obrázek 19: Trajektorie cyklu, (zdroj: vlastní zpracování)

Multikoptéra bude dále plynule stoupat až do výšky $h_4 + 1$ m. Rychlost stoupaní bude záležet na rychlosti odečtu výšky tak, aby bylo zaručeno minimální zpoždění vůči videozáznamu. Následné klesání bude prováděno v podobné rychlosti, neboť data z klesání budou také vyhodnocována. Klesání bude zastaveno ve výšce $h_1 - 1$ m a následně multikoptéra přejde do opětovného stoupaní do výšky $h_4 + 1$ m. Tyto cykly budou provedeny celkem tři, dohromady bude k vyhodnocení šest údajů pro každý reflektor PAPI. Časovou náročnost pro tento úkol odhadujeme okolo 10–15 minut.



Obrázek 20: Vertikální profil, (zdroj: vlastní zpracování)

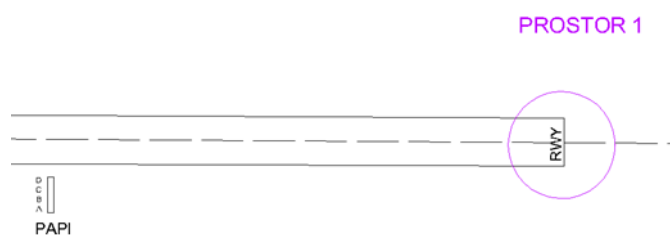
3.5.4 Provozní oblast

Každá organizace, úřad nebo firma dotčená letem bezpilotního prostředku bude potřebovat znát trasu letu nebo vyčleněný prostor letu, který nebude během letu opuštěn. Na základě trajektorie letů navrhne teoretickou provozní oblast pro pravidelné letové ověřování, která

bude v souladu s požadavky Úřadu pro civilní letectví (ÚCL) pro vyřízení žádosti Hustě osídleného prostoru (HOP). Součástí této žádosti je návrh dopadové oblasti. Pokud postihne UAS technická závada nebo poškození, tak v této oblasti dojde k dopadu modelu na zem. Minimální rozměry oblasti nejsou stanoveny, avšak každý žadatel musí posoudit své schopnosti a povahu okolí. Konkrétní tvar dopadové oblasti je požadován, jedná se o pomyslnou základnu kuželu. Nyní je rozlišováno, zda bude mít v průběhu letu model horizontální složku rychlosti, a pokud ano, poměr výšky a poloměru základny není 1:1, ale 2:1. [28]

3.5.4.1 Prostor 1

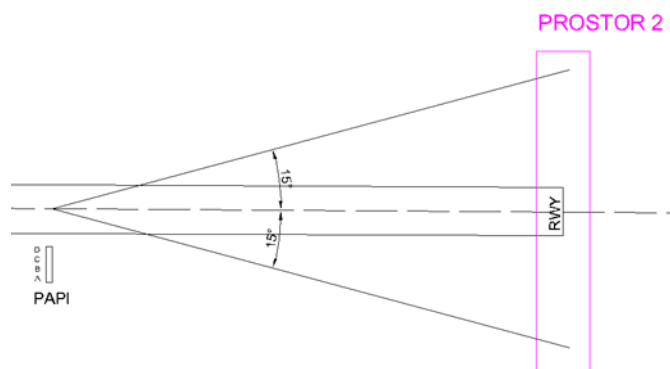
Jedná se o prostorové těleso válcovitého tvaru například o poloměru 100 metrů a výšce $h_4 + 5$ metrů. Tento prostor má střed spodní podstavy ve středu prahu dráhy a je primárně určen pro výškové měření úhlového nastavení PAPI.



Obrázek 21: Prostor 1 - pohled shora, (zdroj: vlastní zpracování)

3.5.4.2 Prostor 2

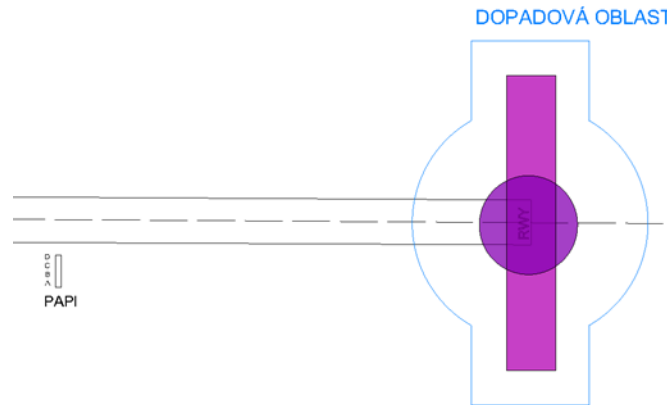
Jedná se o prostorové těleso hranolového profilu například o šířce 50 metrů, délce 300 metrů a výšce $h_4 + 5$ metrů. Prostor 2 je delší hranou kolmý k ose dráhy a je určen k ověření úhlového krytí.



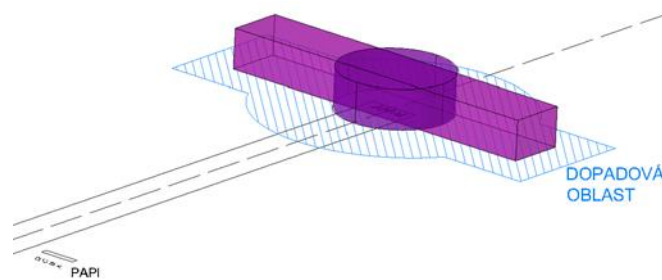
Obrázek 22: Prostor 2, (zdroj: vlastní zpracování)

3.5.4.3 Dopadová oblast

Výsledný tvar dopadové oblasti vznikl složením předešlých prostorů. Uvažujeme, že UAS bude mít nenulovou složku horizontální rychlosti.



Obrázek 24: Dopadová oblast, (zdroj: vlastní zpracování)



Obrázek 23: Vizualizace prostorů, (zdroj: vlastní zpracování)

Oblast byla vizualizována pro maximální výšku prostorů 35 m. Není podmínkou takovéto skládání prostorů, lze například provést zjednodušení do jednoho prostorového tělesa odpovídajícího potřebám. Tento způsob byl použit pouze pro názorný příklad jedné z možností, jak přistupovat k dopadovým oblastem.

3.5.5 Vyhodnocování měření

Výsledný sestupový úhel VGSI je určen aritmetickým průměrem. Předpis aritmetického průměru neboli střední hodnoty je

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (3.2)$$

Po dosazení proměnných do vzorce (3.2) dostaneme pro nás obecné řešení, kdy B a C jsou vypočtené úhly stejnojmenných reflektorů

$$\alpha = \frac{B + C}{2} . \quad (3.3)$$

S využitím laserového dálkoměru přichází i jistá obezřetnost k nasbíraným datům. Pokud bude dálkoměr umístěn pevně k rámu měřicí stanice a dojde k naklonění nebo naklopení multikoptéry, tak měřená vzdálenost bude větší než aktuální skutečná letová výška. Pro názornost uvedeme příklad prodloužení při úhlu vychýlení φ . Kdy je prodloužení Δs a měřená vzdálenost a , poté platí

$$\Delta s = a - a \cdot \cos(\varphi) . \quad (3.4)$$

Odhad prodloužení v letové výšce například 35 m a při vychýlení 5° je ~ 13 cm. Ideální upevnění dálkoměru je na kardanův závěs nebo automatické nivelační soustrojí (Gimbal), které zajistí neustálé míření paprsku kolmo k zemi. Toto provedení je nezbytné, pokud požadujeme získání naprosto přesných hodnot. Důvodem je relativní letová nestabilita UAS vzhledem k uspořádání jeho nosných pohonných jednotek.

Pro naše potřeby je nezbytné vytvořit referenční hodnotu výšky. Bohužel nikdy nebude změřena zcela správně, a tedy bude zatížena určitou chybou. Potřebujeme znát výšku měřicí stanice nad reflektory, abychom poté byli schopni vypočítat úhlové nastavení. Tato referenční hodnota se skládá ze součtu hodnoty rozdílu elevace terénu (výškový rozdíl mezi příčkou PAPI a místem letu) e a hodnoty opravené aktuální letové výšky a o úhel vychýlení φ . Kdy předpis výsledné výšky letu h nad příčkou PAPI je

$$h = e + a \cdot \cos(\varphi) \quad (3.5)$$

Pro výpočet úhlového nastavení reflektoru použijeme funkci tangens

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{e + a \cdot \cos(\varphi)}{m} \right). \quad (3.6)$$

Zdrojem nejistot v našem případě je nepřesné zaměření elevace terénu, nepřesné měření laserovým dálkoměrem, nepřesné měření náklonu modelu a nepřesně změřená horizontální vzdálenost m mezi příčkou PAPI a UAS. Krajiní meze neboli intervaly ve kterých by se měly pohybovat skutečné hodnoty je Δz_{imax} ($l = \text{laser}$, $t = \text{terén}$, $\varphi = \text{náklon}$, $m = \text{hor. vzdálenost}$)

$$u_{lB} = \frac{\Delta z_{lmax}}{\sqrt{3}} ; u_{tB} = \frac{\Delta z_{tmax}}{\sqrt{3}} ; u_{\varphi B} = \frac{\Delta z_{\varphi max}}{\sqrt{3}} ; u_{mB} = \frac{\Delta z_{mmax}}{\sqrt{3}}, \quad (3.7) [29]$$

$\sqrt{3}$ pokud počítáme s rovnoměrným rozdělením. [29] Získání výsledného úhlu ω je dosaženo metodou nepřímé měření veličiny. Zde platí kvadratický zákon hromadění nejistot. Po jeho úpravě a dosazením (3.7) dostaneme

$$u_{\omega} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial e}\right)^2 u_{tB}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial a}\right)^2 u_{lB}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \varphi}\right)^2 u_{\varphi B}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial m}\right)^2 u_{mB}^2}. \quad (3.8) [29]$$

Výsledný úhel ω zapíšeme ve formě

$$\omega = (\theta \pm u_{\omega}) [^{\circ}].$$

Abychom získali představu, jak velkou nejistotu přináší měření výšky h naší metodou s použitím laserového dálkoměru, tak provedeme výpočet teoretického odhadu nejistot. Pokud bude používán navržený laserový dálkoměr, náklon UAS bude přesně 0° , a terén bude odvozen z portálu AGS CZUK s deklarovanou úplnou střední chybou 0,18 m. [30] Můžeme provést odhad nejistoty měření. V tomto případě je funkce pro výpočet výšky (3.5). Po dosazení a úpravě do kvadratického zákona hromadění nejistot získáme

$$u_h = \sqrt{\left(\frac{0,18}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2} \cong 0,12 \text{ m.}$$

Na základě tohoto výpočtu lze říci, že krajní teoretická nejistota měření výšky je přibližně 12 cm.

Zhodnotili jsme nejistoty plynoucí z „nedokonalosti“ měřicích zařízení. Nesmíme zapomenout ani na chyby vznikající při vyhodnocování změn barev. Vzhledem k množství faktorů (zdrojů

nejistot) a jejich individuální povaze vstupujících do této problematiky bude nastíněn pouze jejich krátký výčet. Bylo zde znázorněno, že funkci vyhodnocování může zastávat člověk nebo stroj. Obtížně se určuje lidská chyba, protože záleží na osobních zkušenostech pozorovatele a kvalitě videozáznamu. Dále lze pracovat i se samotným videozáznamem – lze ho pozastavit, přetočit nebo ho procházet pro jednotlivých snímcích (frame). Kdežto kvalita vyhodnocování strojem bude naopak ovlivněna předchozí laboratorní kalibrací, a proto se této problematice nebudeme dále věnovat.

4 Experimentální ověření návrhu

Ověřovací pokus byl uskutečněn dne 1. 7. 2020 na Letišti Praha, a. s., a jeho počátek byl zaznamenán v 9:40 SELČ. Měření bylo zprostředkováno skrze zástupce oddělení bezpečnosti Letiště Praha, kteří velkoryse poskytli model bezpilotního prostředku a pilota. Typ použitého modelu je DJI MAVIC AIR.



Obrázek 25: DJI MAVIC AIR, (zdroj: [41])

Meteorologické podmínky byly příznivé bez význačných jevů, ale nebyly ideální z důvodu rychlosti vanoucího větru. Před zahájením experimentu byl zapsán METAR pro letiště Praha:

LKPR 010730Z 23010KT 200V260 9999 FEW032 22/14 Q1012 NOSIG.

Z tohoto zápisu lze vyčíst, že 1. den v měsíci 9:30 (loc) rychlost vanoucího větru byla okolo 10 uzlů ze směru 200° až 260° (magnetického severu) a dohlednost větší než 10 km. Zbylé údaje pro nás nejsou potřebné, tak zde nebudou rozebírány.

4.1 Postup pro experiment

Pohyb multikoptéry byl uveden v kapitole 3.5.3. Zde bude probrána souslednost jednotlivých kroků. Na začátek definujme, co vše si chceme experimentem ověřit, případně zjistit. Cílem experimentu bude ohodnotit: obtížnost na ovládání, obtížnost na vyhodnocení, přesnost a časovou náročnost. Při reálném experimentu provedeme ověření:

- I. zda může tovární vybavení volně dostupné multikoptéry poskytovat relativně přesná data o naměřené výšce,
- II. zda lze očekávat přechod dvou barev v předem vypočteném bodě,
- III. jaký je rozdíl nebo zda existuje závislost mezi daty nasbíranými ze dvou různých míst,
- IV. jaké minimální množství dat je potřebné pro následující vyhodnocení.

Navrhujeme naše první měření uskutečnit na vhodném místě před prahem dráhy. Zde se bude ověřovat predikce přechodu barev na základě výpočtu a momentální výšky multikoptéry. Na druhé místo měření bude proveden přejezd automobilem po skončení činnosti v prvním místě měření.



Obrázek 26 - Graficky znázorněný postup (zdroj: vlastní zpracování)

Způsob vyhodnocování bude záležet na možnostech multikoptéry. Nabízejí se dva způsoby:

1. Pozdější vyhodnocování: V průběhu letu a při měření bude pořizován videozáznam, na který bude automaticky vynesena informace o výšce, případně o poloze. V tomto případě na místě nebude prioritou zapsat výšku změny barvy, ale pouze nalezení místa změny.
2. Okamžité vyhodnocování: V průběhu letu a při měření bude pořizován videozáznam, který bude sloužit pouze jako obrazový podklad. Zde bude potřebná nebytná součinnost operátora multikoptéry a osoby zapisující výšku, ve které došlo ke změně barvy.

4.1.1 Místa letu

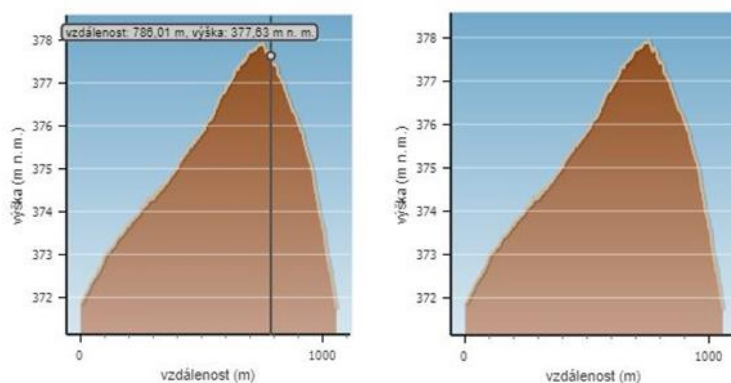
V předešlých kapitolách byla probírána souslednost jednotlivých kroků a trajektorie letu. V této kapitole jsou uvedena a popsána reálná místa, odkud byl let veden. Pro náš účel byla zvolena dráha 30, a to z několika důvodů. Jednak díky plánované uzavírce dráhy od konce června a zadruhé z důvodu polohy začátku dráhy, která je více než dostatečně vzdálená od okolních budov, terminálů a okolního leteckého provozu využívajícího dráhy 06/24.

Za první místo měření byla vybrána asfaltová plocha navazující na místní komunikaci na pozemku letiště. Tato plocha umožňuje odstavení vozidla i plochu pro vzlet a přistání UAS. Přesné označení místa za pomoci souřadnic je 50.0887992N, 14.2852642E. Druhé místo měření je na zhruba dvojnásobné vzdálenosti od prahu dráhy oproti prvnímu. Opět byla vybrána optimální asfaltová plocha a její souřadnicové označení je 50.0873192N, 14.2881289E. Na obrázku 27 jsou obě místa přehledně označena ve žlutých kruzích.

Na rozdíl od teoretické úvahy musíme při vyhodnocování měření vzít v úvahu i terénní nerovnosti, které ovlivňují výsledek. Pro tento účel byla použita Mapová aplikace analýzy výškopisu od Českého zeměměřického úřadu. Střední chyba výšky v aplikaci je určena na 18 cm v odkrytém terénu. [30] Vzhledem k tak malé chybě nebude bráno v potaz její zohlednění. Analýzou výškopisu bylo zjištěno, že první místo je položené o 6 metrů výše než příčka PAPI a druhé místo je na zhruba stejné výškové úrovni. Ve vyhodnocení prvního místa bude přičteno 6 metrů k naměřené výšce a ve vyhodnocení druhého místa bude tato chyba z důvodu malé odchylky zcela ignorována.



Obrázek 28: Označení míst, (zdroj: vlastní zpracování dle [42])



Obrázek 27: Analýza výškopisu, (zdroj: vlastní zpracování dle [44])

4.1.2 Výpočet predikce letu

Návrh trajektorie letu pro experiment vychází z kapitoly 3.4.3. Z důvodu aktuálních provozních podmínek na LKPR jsme se rozhodli provést měření dále od příčky PAPI. Na základě vzdálenosti míst měření od světelné příčky můžeme provést výpočet predikce přechodů barev. Důležité je si uvědomit, že LPZ na dráze 30 na LKPR jsou koncipovaná pro letadla

nejnáročnější na vedení. V tabulce 2 jsou přehledně shrnuty hodnoty predikcí včetně terénní nerovnosti.

Reflektor	A	B	C	D
Úhel nastavení [°]	2,42°	2,75°	3,25°	3,58°
1. místo [m]	33	37,5	44,3	48,8
2. místo [m]	44,8	51	60,2	66,3

Tabulka 2: Predikce, (zdroj: vlastní zpracování)

4.2 Vyhodnocení experimentu

V kapitole 4.1 jsou uvedeny dvě možnosti, jak přistupovat k vyhodnocování experimentu. Pro naplnění všech hledisek navrhované metody bylo rozhodnuto provést obě varianty. V průběhu



Obrázek 30: Záběr 1 z UAS, (zdroj: vlastní zpracování) Obrázek 29: Záběr 2 z UAS, (zdroj: vlastní zpracování)

letu byly zaznamenávány hodnoty výšek přechodů barev a zapisovány do předem připraveného archu. Zároveň byly pořizovány dva videozáznamy, jeden z videokamery na palubě a druhý jako záznam obrazovky řídicí stanice pilota modelu. Především přiložené obrázky jsou ukázkou výstupu z videozáznamu. Obrázek 30 byl pořízen nad osou reflektoru D a naopak obrázek 29 pod osou reflektoru A.

Po vzletu z 1. místa byl proveden přelet a stoupání do výchozího bodu pro měření. Přechod prvního reflektoru „A“ jsme zaznamenali v 28 metrech a pokračovali ve stoupání až do výšky 44 metrů. První měření proběhlo dle plánu přípravy a trajektorie letů je shodná s kapitolou 3.5.3. Po usouzení, že jsme získali všechna potřebná data, bylo provedeno přistání a přesun po zemi na druhé místo měření. Následovalo opětovné vybalení a připravení techniky k letu. Jelikož se jednalo o vzdálenější místo od reflektorů PAPI na rozdíl od předešlého, tak doba stoupání trvala zhruba o třetinu déle. Náplň letu byla naprosto stejná jako v prvním případě – provedení měření během stoupání a klesání. Vzhledem k menší časové náročnosti, než se předpokládalo při plánování letu, byla provedena ještě jedna metoda inspirovaná Level Run v kapitole 2.3.1.

Z druhého místa měření byl proveden ve výšce 48 metrů horizontální let o konstantní rychlosti 15,4 km.h⁻¹. Opodstatnění zmíněné rychlosti není, protože vstup požadavku rychlosti je zadáván na dotykové obrazovce ve formě posuvníku, a tím je náročnější provést požadované nastavení. Experiment byl ukončen v čase 10:05.



Obrázek 31: Snímek obrazovky řídicí stanice, (zdroj: vlastní zpracování)

4.2.1 Náročnost na manévrování

Na základě vyjádření pilota konstatujeme, že potřebné figury nejsou nijak obtížné a let lze provádět sousledností jednotlivých pohybů, není tedy zapotřebí superpozice více pohybů v jeden okamžik.

4.2.2 Výpočet dat získaných pro 1. místo

Výška změny vyzařované barvy každého reflektoru je určena výpočtem aritmetického průměru z celkem šesti naměřených hodnot. Předpis výpočtu aritmetického průměru je

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \tag{5}$$

Po přičtení chyby terénní nerovnosti dostaneme výslednou výšku od referenční osy terénu. Pro vypočtení úhlu nastavení použijeme rovnici 3.1 v kapitole 3.5.3. Výsledný sestupový úhel je brán jako aritmetický průměr úhlu reflektoru B a C, tedy

$$\alpha = \frac{B + C}{2} .$$

(6)

Maximální přípustná odchylka od nominální sestupové osy 3° je $\pm 0,2^\circ$.

Reflektor	A	B	C	D
Aritmet. průměr výšky změny [m]	27.17	31.25	36.08	40.83
Chyba terénu (+ 6 m)	33.17	37.25	42.08	46.83
Úhel reflektoru [°]	2.44	2.74	3.09	3.44
Úhel sestupu α [°]	2.92			

Tabulka 3: Vyhodnocení 1. místa, (zdroj: vlastní zpracování)

4.2.3 Výpočet dat získaných pro 2. místo

Zcela stejným postupem jako v předchozí podkapitole provedeme výpočet pro druhé místo, a proto bližší popis zde nebude rozebírán.

Reflektor	A	B	C	D
Aritmet. průměr výšky změny [m]	44.08	49.67	56.00	63.25
Chyba terénu (+ 0 m)	44.08	49.67	56.00	63.25
Úhel reflektoru [°]	2.43	2.74	3.09	3.49
Úhel sestupu α [°]	2.91			

Tabulka 4: Výpočet 2. místo, (zdroj: vlastní zpracování)

Při výpočtu byla zjištěna chyba měření, která ovlivnila výsledky. Hodnoty získané z měření během klesání vykazovaly mnohem větší odchylku od predikce. Tabulka 5 je složena pouze z dat získaných během stoupání.

Reflektor	A	B	C	D
Aritmet. průměr výšky změny [m]	46.83	52.67	58.00	64.50
Chyba terénu (+ 0 m)	46.83	52.67	58.00	64.50
Úhel reflektoru [°]	2.58	2.90	3.20	3.56
Úhel sestupu α [°]	3.05			

Tabulka 5: Výpočet 2. místo – pouze stoupání (zdroj: vlastní zpracování)

4.2.4 Vyhodnocení

Bylo provedeno celkem 12 měření při délce experimentu 25 minut. Určený sestupový úhel pro první místo je 2,92° a pro druhé místo je 2,91°.

Stanovení chyby provedeného měření je základem každého vyhodnocení. Poskytnutím aktuálních podkladů ze strany Letiště Praha a. s. bylo deklarováno, že úhel sestupu nastavený v průběhu měření byl 3°.

PAPI 30							
Parametr	Výsl. [°]	Nom. [°]	Tol. [°]	Parametr	Výsl. [°]	Nom. [°]	Tol. [°]
El. Náv.č.1 [°]	2.51	2.42	± 0.2	Šest. Úhel [°]	3.00	3.00	± 0.2
El. Náv.č.2 [°]	2.79	2.75	± 0.2	H krytí L [°]	19	± 15° - noc ± 10° - den	
El. Náv.č.3 [°]	3.20	3.25	± 0.2	H krytí R [°]	-20		
El. Náv.č.4 [°]	3.60	3.58	± 0.2	Tlumení		OK	
Byla v průběhu LO provedena korekce nastavení [ANO/NE]						NE	
Podmínky:		Noc, Jasno					

Obrázek 32: Výťah z výstupní dokumentace posledního letového ověřování, (zdroj: [19])

Na tomto základě již můžeme stanovit absolutní chybu měření K_X , která je rozdílem od skutečné hodnoty. Jednotkou této veličiny jsou stupně. Pro názornější určení přesnosti použijeme vyjádření přes relativní chybu. Kdy X je sestupový úhel 3°

$$K_{rX} = \frac{K_X}{X} .$$

[29] (7)

Po výpočtu relativní chyby pro první místo dojdeme k výsledku 2,67 % a pro druhé místo 3 % (včetně hodnot získaných při klesání). Nebudeme provádět vyhodnocení pro Tabulku 5, protože by mohla být vznesena námitka na objektivitu práce. Vzhledem k tomu, že bylo použito nekalibrované a necertifikované měřicí zařízení, tak nebudou dále rozebírány nejistoty měření.

Tento experiment jsme uskutečnili, abychom získali odpovědi na naše otázky položené v kapitole 4.1. Bohužel musíme konstatovat, že nelze použít volně dostupnou multikoptéru pro kalibraci systému PAPI, aniž by byly podniknuty úpravy a kalibrace zařízení. Úpravou myslíme

přidání přesnějšího zdroje výškové informace, například laserového dálkoměru. Toto přidané zařízení musí projít ideálně laboratorním kalibračním měřením, při kterém se zjistí korekční koeficient. Použití volně dostupné multikoptéry je však dostačující pro zběžnou kontrolu funkčnosti zařízení, kdy není zkoumáno úhlové nastavení.

Během experimentu jsme zjistili, že lze očekávat přechod barev v předem vypočtené výšce.

Po vyhodnocení měření ze dvou míst lze říci, že s rostoucí vzdáleností od příčky PAPI roste i přesnost a věrohodnost měření.

Nelze přesně určit minimální počet měření, ale lze uvést situaci, za jaké bude prováděno vyhodnocování, a k tomu přiřadit pouze odhad minimálního počtu nasbíraných hodnot. Pokud bude vyhodnocování provádět pozorovatel z videozáznamu podobnému jako na obrázku 31, tak na základě naší zkušenosti konstatujeme, že počet šesti hodnot je opravdové minimum, a doporučujeme navýšení například na deset hodnot. Dále při vyhodnocování člověkem nedoporučujeme vycházet z hodnot zapsaných přímo na místě, protože se ukázalo, že jsou značně zatíženy chybou pozorovatele, a tím se stávají nepoužitelnými.

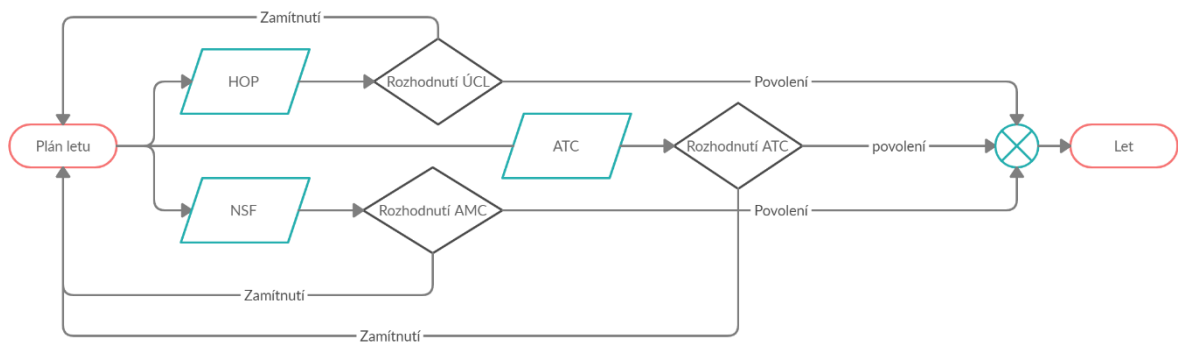
Aplikace metody Level Run nedopadla dle očekávání. Ukázalo se, že kvůli vanoucímu větru o síle 10 uzlů dochází k velkému snosu, což způsobuje značné zkreslení uletěné vzdálenosti.

5 Zhodnocení rizik a ostatních omezení

Obecně panují obavy ohledně provozu bezpilotních prostředků. Nebylo by proto objektivní, kdyby v této práci nezazněly bezpečnostní aspekty. Abychom dokázali pojmout celé toto téma, potřebovali bychom samostatnou práci, a proto zde uvedeme pouze v krátkosti některé body. Pro lepší pochopení pozadí letů UAS v CTR nejprve popíšeme proces schvalování letu a v návaznosti zmíníme provozní omezení. Závěrem této kapitoly nastíníme problematiku provozní bezpečnosti vlastními metodami.

5.1 Současný proces schvalování letu

Uvažujme současný proces schvalování letu v rámci České republiky. V současné době jakýkoliv zájemce o let v blízkosti řízeného letiště musí splnit řadu kritérií. Doplněk X tuto blízkost stanovuje na okruh menší než 5,5 km od vztažného bodu řízeného letiště. Samotná předpokládaná trasa nebo oblast letu vytváří případné požadavky na další povolení. Jelikož na pozemku letiště se vyskytují hustě zastavěná místa a dochází tam k obchodním činnostem, je zapotřebí vyjednat žádost pro let v Hustě osídleném prostoru (HOP). Vyřízení této žádosti provede ÚCL do 30 dní (ve složitých případech do 60 dnů) od zahájení řízení. [31] Kromě udání popisu činnosti, dne a času letu je dále nezbytné stanovení oblasti provozu s návrhem dopadové oblasti. Pro vyplnění těchto údajů můžeme vycházet z poznatků v kapitole 3.5.4. Dalším místem, ze kterého musí žadatel o let dostat kladnou odpověď, je AMC ŘLP ČR, s. p. Zde se podává žádost o nestandardní let (NSF) v řízeném vzdušném prostoru. Veškeré body a náležitosti této žádosti jsou specifikovány v AIP části ENR 1.1 (v kapitole 1.1.11.1.). [32] Jelikož obecně nestandardní lety vytvářejí vyšší nároky na řízení letového provozu, může dojít k zamítnutí nebo časovému posunutí letu. V případě, že jsou všechny odezvy kladné, je dále ještě nezbytné obdržet povolení od příslušného stanoviště ATC, ve kterém bude zamýšlený let probíhat. Zodpovědná osoba 1 hodinu před letem telefonicky kontaktuje příslušné stanoviště ATC a obdrží, nebo neobdrží povolení k letu. Poslední podmínka je nadřazená všem předešlým, tedy ani s povoleními HOP a NSF nenabývá pilot pravomoci k letu, pokud neobdržel letové povolení od stanoviště ATC.



Obrázek 33: Proces schvalování, (zdroj: vlastní zpracování)

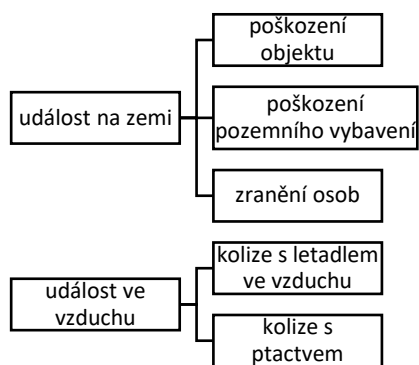
Tímto byly zohledněny všechny náležitosti ze strany státních orgánů, ŘLP ČR, s. p., a zbývá zohlednit předpisy a požadavky samotného letiště, ve kterém bude let probíhat. Na základě předletové přípravy je stanoveno místo vzletu UAS. Zodpovědná osoba s dostatečným časovým předstihem kontaktuje dispečink jednotky provozu ploch, která podle svého posouzení dá podnět k vydání NOTAM.

S narůstajícím zájmem široké veřejnosti o bezpilotní prostředky úměrně narůstají i požadavky na ochranu letiště. Možnosti, jak monitorovat narušení perimetru letiště systémem UAS, byly zpracovány v řadě publikací a nebudou zde rozebírány. UAS letového ověřování je známý nahlášený provoz s jasnou zodpovědnou osobou jak pro ATC, tak i pro provozovatele letiště. Nechtěná aktivace poplachu letem UAS by mohla vést k ukončení letu a v krajním případě i k sestřelení UAS. Abychom tomuto nedorozumění předešli, zodpovědná osoba informuje dostatečně v předstihu dispečink ostrahy letiště o zamýšlené činnosti.

5.2 Hodnocení rizik

Hodnocení rizik je založeno na následcích konkrétních událostí. Riziko je definováno jako předpokládaná závažnost a pravděpodobnost události s následky. Samotné nebezpečí je stav, který by mohl způsobit nehodu nebo k ní přispět.

Abychom mohli zhodnotit rizika a určit případná rozhodnutí, jak jim předejít, musíme nejprve definovat události, které mohou nastat. Evropská agentura pro bezpečnost v letectví poukazuje na poznatky v dokumentu Specific Operation Risk Assessment (SORA) od Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems. [33] Z tohoto dokumentu vyplývá, že události se mohou stát buď ve vzduchu, nebo na zemi a pokaždé jsou nějak ztrátové, tzv. ztrátové události, anglicky Loss Event. Ztrátou se rozumí situace, kdy dojde k poškození objektu, pozemního vybavení, kolizi s letadlem po vzletu nebo ke zranění osob.



Obrázek 34: Rozdělení událostí, (zdroj: vlastní zpracování dle [34])

JARUS SORA předkládá jako jediné nebezpečí, které by mohlo vést k fatálním následkům, ztrátu kontroly nad bezpilotním prostředkem. [34] Z tohoto nebezpečí nám plyne riziko ve dvou rovinách, a to pravděpodobnostní a závažnostní. Riziko je obvykle klasifikováno pomocí matice 5 x 5, tedy 5 kategorií závažnosti a 5 kategorií pravděpodobnosti. Příklad matice je uveden v ICAO DOC 9859. Dále rozlišujeme i zbarvení polí, které uživateli pomohou určit úroveň rizika: vysoké riziko (červená), střední riziko (oranžová) nebo nízké riziko (zelená).

Bezpečnostní riziko		Závažnost				
		Katastrofická A	Nebezpečná B	Závažná C	Nízká D	Zanedbatelná E
Pravděpodobnost						
Častá/četná	5	5A	5B	5C	5D	5E
Více pravděpodobná	4	4A	4B	4C	4D	4E
Pravděpodobná	3	3A	3B	3C	3D	3E
Neppravděpodobná	2	2A	2B	2C	2D	2E
Extrémně nepravděpodobná	1	1A	1B	1C	1D	1E

Tabulka 6: Safety Risk Matrix, (zdroj: vlastní zpracování dle [35])

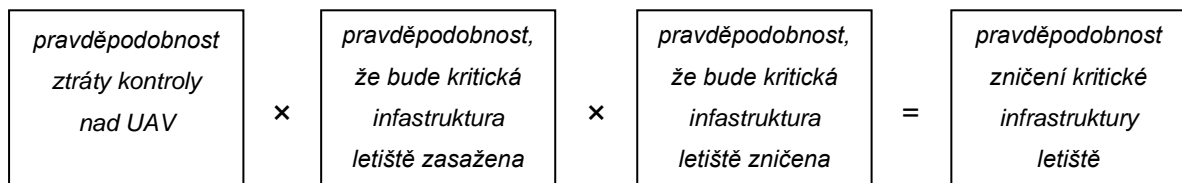
Vysoké riziko není akceptováno a musí by být provedena okamžitá opatření nebo zastavena jakákoliv dotčená činnost. Střední riziko může být akceptováno na základě přijatých protiopatření. Nízké riziko je akceptovatelné a nevyžaduje žádné další činnosti k jeho dalšímu snižování. [35]

Riziko lze také popsat matematicky jako dvousložkový vektor, určený pravděpodobností a závažností s počátkem v nebezpečí. Pokud bychom chtěli analyzovat složitější sled nebezpečí vedoucí k události, tak rizika je pojící jsou určena složkou, a to pravděpodobností přechodu, kterou se můžeme dostat až k ztrátové události, přičemž závažnost zůstává stejná.



Obrázek 35: Nebezpečí, (zdroj: vlastní zpracování)

K odhadu pravděpodobnosti nastalé události se užívá vzorec, kdy se jednotlivé pravděpodobnosti mezi sebou násobí. Výsledný součin je pravděpodobnost události – například poškození pozemního vybavení. [34]



Obrázek 36: Výpočet pravděpodobnosti, (zdroj: vlastní zpracování dle [34])

Daná metrika může být dále doplněna o následující otázky:

- Existuje historická událost podobná té, o které se uvažuje, nebo je to izolovaný výskyt?
- Které další vybavení nebo součást stejného typu mohou mít podobné vady?
- Kolik zaměstnanců dodržuje nebo podléhá daným postupům?
- Jaké procento času je používáno podezřelé vybavení nebo sporný postup?
- Jaká je expozice uvažovaného nebezpečí? [35]

Postup, jak snižovat rizika, popisuje Safety Management Manual (SMM). Provázejí ho tři základní otázky a odpovědi, jak dále postupovat.

- Lze vyloučit bezpečnostní rizika? Pokud je odpověď ano, budou přijata příslušná opatření a zpětná vazba na vytvořenou bezpečnostní knihovnu. Pokud odpověď zní ne, nastává následující otázka:
- Lze zmírnit bezpečnostní rizika? Pokud odpověď zní ne, musí být operace zrušena. Pokud odpověď zní ano, jsou přijata zmírňující opatření a další otázka zní:
- Lze akceptovat zbytkové bezpečnostní riziko? Je-li odpověď ano, jsou podniknuty kroky (pokud je to nutné). [35]

Kateřina Sekyrová ve své diplomové práci poukazuje na fakt, že pro UAS zatím neexistují statistiky nehod. Proto se musí využívat techniky, jako je například Analýza stromu událostí. [36] Pouze doplníme, že lze i expertně určit nebezpečí, ale celkově je lepší nebezpečí určit za pomoci bezpečnostních metod.

Jako názornou ukázkou expertního určení nebezpečí můžeme použít studii pánů Gettingera a Michela z roku 2015. Tato studie přiřazuje vybraným nebezpečím úroveň rizika.

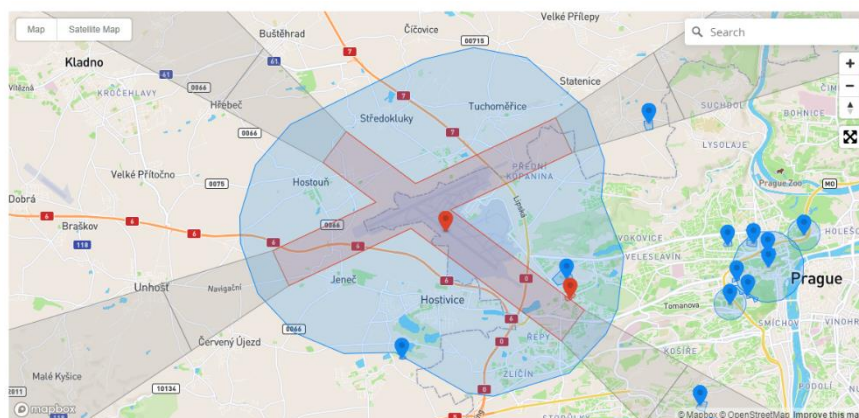
Úroveň rizika	Nebezpečí
Vysoké	Let UAS v blízkosti věže ATC, Nezkušený pilot UAS, Selhání senzoru, Používání neschváleného kmitočtu pro řídicí stanici, Ztráta kontroly na UAS
Střední	Ztráta kontroly na UAS (vybaveno Fail-safe systémem), Změna letového plánu UAS za letu
Nízké	Pohyb ptactva v blízkosti UAS, Let UAS na hranici provozní oblasti

Tabulka 7: Nebezpečí dle úrovně rizika, (zdroj: vlastní zpracování dle [37])

5.3 Provozní omezení

Vybrané příklady omezení byly zmíněny hned v úvodu této kapitoly. V současné době je pohlíženo na letící bezpilotní prostředek v CTR jako na hrozbu okolní, a proto nejčastějším důvodem zamítnutí letu je právě hustota okolního provozu. Nejjednodušším způsobem, jak minimalizovat šanci zamítnutí, je vycházet ze statistik průměrného počtu pohybů za jeden den v rámci letiště. Pokud budeme sledovat nejen denní dobu, ale i konkrétní den v týdnu, můžeme dojít ke zjištění jistých opakujících se stereotypů.

Geofencing, jak název napovídá, je vytvoření virtuálního plotu pro UAS a slouží k zamezení neoprávněného vstupu do jinak zakázaného prostoru, kterým CTR bezesporu je. S touto implementací se můžeme setkat například u produktů výrobce DJI. Aby byl umožněn vzlet ze strany řídicí jednotky, je nutné si nejprve obstarat autorizaci, která má určitou dobu platnosti. Z hlediska bezpečnosti je nevýhodou tohoto systému snadné obejítí této překážky, a to stavbou vlastního bezpilotního prostředku.



Tips: In compliance with the relevant laws, policies, and regulations, some GEO Zones will not appear on this web map. Please refer to the DJI GO app for more GEO Zones in effect. As it consumes too much time for mass data uploading, all safe fly zones may be hidden when zoomed out.

DJI GEO Zones

● Restricted Zones
 ● Altitude Zones
 ● Authorization Zones
 Warning Zones
 Enhanced Warning Zones

Obrázek 37: Geofencing DJI mapa okolí LKPR, (zdroj: [43])

V poslední řadě je zcela nezbytné dbát na výkonnost daného bezpilotního prostředku. Ke každému volně dostupnému modelu UAS je přibalen uživatelský manuál, kde jsou udány informace od maximálních režimů letu až po omezení podle povětrnostních podmínek. Pro dodržení maximální bezpečnosti letu nesmí být let prováděn mimo uvedené hodnoty.

5.4 Zhodnocení provozní bezpečnosti navrhované metody

Vzhledem ke specifičnosti zadání této práce nelze ke zhodnocení provozní bezpečnosti přistupovat jako v obvyklých případech, kdy je pojednáváno o UAS jako o neznámé hrozbě. V těchto případech neznáme, s jakým modelem se budeme setkávat, kdo je vlastníkem, odkud vstoupí do našeho prostoru perimetru, ani jaký je cíl jeho cesty. Na rozdíl od UAS, který je pro nás již identifikovaný na základě podaných žádostí a oznámení. S tímto provozem už lze pracovat, měnit jeho trajektorii letu, pozdržet let nebo případně nařídit přistání stroje. Právě s tímto oprávněným letem celý text této bakalářské práce počítá a prosazuje jej. V důsledku toho se nám snižuje nebezpečí sblížení s jiným letadlem po vzletu a let UAS je zhruba na stejné úrovni jako jiný VFR provoz.

Ve vlastním návrhu metody kalibrace systému PAPI za použití UAS jsme představili dvě teoretické oblasti letu. Při předletové přípravě by mělo být dbáno na povahu okolí a vzdálenosti místa vzletu/přistání od okolních překážek. Druhým faktorem, který by měl být vzat v potaz, jsou letové zkušenosti pilota. V předchozí kapitole jsme zmínili, že nebezpečí s nejhoršími možnými následky představuje UAS, které přestalo být ovladatelné. Také jsme jako jednu

z podmínek vybavení bezpilotního letadla určili instalaci záchranného systému. V případě, že nastane tato situace a UAS je „fail–safe“, řídicí jednotka dokáže sama provést přistání.

Předejití technické závadě jde pravidelnou údržbou a řádnou předletovou prohlídkou dle příručky uživatele. Jedná-li se o model vlastní výroby, je dobré se řídit pokyny a doporučeními výrobců komponentů.

Dalším aspektem letu v CTR je kooperace se stanovištěm ATC. Připomeneme, že hodinu před letem zodpovědná osoba telefonicky kontaktuje příslušné stanoviště ATC a na základě posouzení hustoty provozu získá, anebo nezíská povolení k letu. Jelikož se v našem případě jedná o let v blízkosti přistávací dráhy, může být požadována podmínka pro obousměrné spojení. To znamená mít u sebe radiostanici, které podléhá zákonu č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích, a je nezbytné vlastnit průkaz radiotelefonisty. V případě nenadálého zvýšení letového provozu stanoviště ATC vydá pokyn k ukončení letu UAV. Pro snížení rizika přiblížení bezpilotního prostředku k jinému letadlu ve vzduchu může zodpovědná osoba proaktivně plánovat let v době dopravního sedla a nočních letů. Nepřináší to jen snížení rizika přiblížení, ale i menší pracovní zátěž pro stanoviště ATC.

ŘLP ČR, s. p., nabádá provozovatele a piloty, aby si v rámci předletové přípravy zjistili a připravili telefonní čísla na stanoviště ATC, která mají ve správě prostory, ve kterých bude let probíhat. V případě nenadálé události by tak byli okamžitě schopni tuto událost ohlásit. Poskytní by tak informace stanovišti ATC například o neřiditelném UAS, který pokračuje posledním známým směrem.

6 Diskuze

Výsledek teoretického výpočtu přesnosti měření výškové informace vlastní metodiky nám přinesl uspokojivé výsledky. Aby bylo zaručeno správné měření vzdálenosti laserem, doporučujeme před letem provést kalibrační měření nebo nechat otestovat měřicí stanici v akreditované laboratoři. Pokud bychom chtěli zvýšit přesnost měření, tak jako první se nabízí lépe zaměřit odrazovou plochu pro laserový paprsek. Relativní nejistota zaměření odrazové plochy v současném případě vychází o řád vyšší než hodnota relativní nejistota měření laserovým dálkoměrem a tím přispívá větší měrou k nepřesnému měření. Bohužel, skutečný stav může prokázat až let se zmíněným měřicím vybavením.

Tato práce nám ukázala velký potenciál využití bezpilotních systémů v tomto odvětví. Za nás vidíme největší uplatnění při ověřování SZZ heliportů. Často se jedná o zastavěné oblasti, kde musí být brán ohled i na okolní životní prostředí a zejména hlukové znečištění. V současné době tento úkol zastávají převážně letouny, jejichž metodika je relativně podobná metodice pro SZZ letiště.

Zmínka o využívání UA s pevnými nosnými plochami je násobně méně, což je vztaženo už i k tak malému počtu publikací pro UAS koptéry. U nalezených dokumentů se vždy jednalo o koncepci návrhu vybavení nebo řízení, a nikoliv o metodiky pro ověřování.

Ze své zkušenosti mohu potvrdit, že v oblasti letového ověřování lze v současnosti nalézt mnoho aktuálních problémů, které skýtají široký potenciál možných výzkumných aktivit pro studenty Ústavu letecké dopravy. Jako příklad mohu uvést: Konstrukce ILS přijímače pro UAS, Využitelnost UAS pro letové ověřování ALS, Využitelnost UAS pro letové ověřování HPAPI, Konstrukce světelného senzoru s rozpoznáváním barev pro UAS nebo Analýza legislativních požadavků pro provádění letových ověřování.

Závěr

Záměrem této bakalářské práce bylo zmapovat současnou metodologii letových ověřování leteckého pozemního zařízení PAPI a k tomu dohledat publikované návrhy alternativních metod za použití bezpilotních prostředků.

Pro snazší pochopení problematiky bylo nezbytné provést technický popis námi zvoleného LPZ (PAPI). V této kapitole jsme věnovali zvýšenou pozornost různým možnostem montáže a nastavení. S tím souvisejí i individuální požadavky různých výškových kategorií letadel.

Analýza současných metod nám ukázala, že existují dvě základní trajektorie letu používané pro ověřování úhlového nastavení reflektorů. Se zřetelem na vybavení inspekčního letounu nebo pozemního personálu se přistupuje k výběru metody kalibrace. Dále byly popsány další parametry zkoumané v průběhu letové inspekce.

Pátrání po alternativních přístupech nás zavedlo k zatím jediné veřejně publikované metodě. Byl rozebrán její postup, uvedeno potřebné vybavení a na závěr dodáno krátké zhodnocení ohledně bezpečnosti provozu. Vzhledem k malému počtu publikací na toto téma jsme se rozhodli vypracovat návrh vlastní alternativní metody. Vycházeli jsme z poznatků současných metod a publikací zabývajících se provozem UAS. Návrh počítá s využitím laserového dálkoměru jakožto hlavního zdroje výškové reference, a kromě toho jsou uvedeny další komponenty měřicí stanice. Nad rámec zadání jsme uspořádali experimentální let, abychom posoudili proveditelnost měření a objevili případná úskalí při letovém ověřování PAPI. Experimentální let nám ukázal, že lze zkoumat úhlové nastavení reflektorů za pomoci UAS. Překvapila nás relativní přesnost výškové senzorky použitého modelu. Bohužel, jelikož se jedná o nekalibrované a necertifikované zařízení, nelze ho použít pro kalibraci úhlového nastavení.

Tato práce poskytne čtenáři rozšířený rámcový úvod do problematiky letového ověřování leteckého pozemního zařízení PAPI. Ověřování LPZ za použití UAS má v budoucnu své zaručené místo. Zde zmíněné poznatky a navržená metodika může sloužit jako výchozí zdroj informací pro budoucí bádání a vývoj. Bylo pro mě ctí se v této problematice pohybovat. Věřím, že nabyté poznatky a navržená řešení přenesu do své budoucí profesní činnosti.

Seznam literatury

- [1] ABOUT PAPI. Research Engineers [online]. 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: http://www.research-engineers.com/about_papi.html.
- [2] ČESKÁ REPUBLIKA. *LETECKÝ PŘEDPIS LETIŠTĚ L14*. In: . Letecká informační služba, 2018. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/index.htm>
- [3] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Aerodrome Design Manual: Part 4 - Visual Aids*. 4. Qubec, Canda: ICAO, 2014. ISBN 92-9194-209-X.
- [4] AC 150/5340-30J: DESIGN AND INSTALLATION DETAILS FOR AIRPORT VISUAL AIDS. FAA . U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION a FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2018 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5340-30J.pdf.
- [5] KANADA. *Advisory Circular (AC) No. 302-009* [online]. Transport Canada, 2019 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://tc.canada.ca/en/aviation/reference-centre/advisory-circulars/advisory-circular-ac-no-302-009>
- [6] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 978-80-7196-345-5.
- [7] U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION A FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Precision Approach Path Indicator (PAPI): TI 6850.76*. Chicago IL, USA: Sonicraft., 1988.
- [8] REICHL, Jaroslav. *Fotometrické veličiny. Encyklopedie fyziky*. [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>.
- [9] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Aerodrome Design Manual: Part 5 — Electrical Systems*. 2. Qubec, Canda: ICAO, 2017. ISBN 978-92-9258-246-3.
- [10] RELIANCE PAPI L-880(L) / L-881(L). *ADB SAFEGATE*. [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://adbsafegate.com/documents/2064/en/data-sheet-reliance-papi-l-880-l-881l>.

- [11] Final Approach Runway Occupancy Signal (FAROS). *SKYbrary* [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Final_Approach_Runway_Occupancy_Signal_\(FAROS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Final_Approach_Runway_Occupancy_Signal_(FAROS))
- [12] CANADA. *Advisory Circular (AC) No. 300-006: Precision Approach Path Indicator Maintenance and Inspection (PAPI)*. [online]. 2012, 2012-10-12 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/reference-centre/advisory-circulars/ac-300-006.html>. Dostupné také z: <https://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/reference-centre/advisory-circulars/ac-300-006.html>
- [13] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Manual on Testing of Radio Navigation Aids: Volume I — Testing of Ground-based Radio Navigation Systems*. 5. Qubec, Canda: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2018.
- [14] THOMPSON, Scott. *Flight Inspection History*. [online]. květen 2008 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/avn/flightinspection/fihistory/.
- [15] VALENTA, Pavel. *Dva dny s Calibrou*. [online]. 27.12.2018 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.flying-revue.cz/dva-dny-s-calibrou-reportaz>.
- [16] Příloha č.1. *ŘLP ČR, s.p* [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: http://www.rlp.cz/obchod/ProdejPronajem/Documents/2020-06-08_L410/Prodej_L410-Priloha1.pdf
- [17] U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION A FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *UNITED STATES STANDARD FLIGHT INSPECTION MANUAL*. FAA [online]. USA, 2015, duben 2015 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/8200_1D_USSFIM_\(04_15_15\).pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/8200_1D_USSFIM_(04_15_15).pdf)
- [18] *FLIGHT INSPECTION HANDBOOK: TI 8200.52. AA* [online]. In: . USA, 2007 [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/avn/flightinspection/onlineinformation/pdf/TI%208200-52%20w%20Chg%201-%204.pdf#page=113&zoom=100,0,0.

- [19] POSPÍŠIL, Petr. *Výtah z výstupní dokumentace posledního letového ověřování* [elektronická pošta]. In: . odesílatel: POSPISIL Petr <petr.pospisil@prg.aero> komu: Marek Hamza <hamzamar@fd.cvut.cz> datum: 23. 7. 2020 7:55: Osobní komunikace, 2020 [cit. 2020-08-05].
- [20] *ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD: LETOVÉ OVĚŘOVÁNÍ POZEMNÍCH LETECKÝCH RADIONAVIGAČNÍCH A RADIOLOKAČNÍCH PROSTŘEDKŮ NATO*. 3. Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2017.
- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. *LETECKÝ PŘEDPIS PRAVIDLA LÉTÁNÍ L 2: DOPLNĚK X*. In: . Letecká informační služba, 2017. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [22] *Učební texty pro piloty UAS*. 3. vydání. Praha: Dronim, 2019.
- [23] RAHNAMA, Ebrahim, Mostafa ASAADI a Kaveh PARTO. PRE-flight checks of navigation systems and PAPI lights using a UAV. In: *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)* [online]. IEEE, 2018, 2B4-1-2B4-7 [cit. 2020-07-03]. DOI: 10.1109/ICNSURV.2018.8384839. ISBN 978-1-5386-5679-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8384839/>
- [24] Laser ohrozil dvě letadla přistávající na Ruzyni. Případ vyšetřuje policie. *IDNES* [online]. [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/letiste-vaclava-havla-oslneni-pilotu-laser-cizinecka-policie.A170803_170824_domaci_fer
- [25] Laser Incidents. *Federal Aviation Administration* [online]. [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://www.faa.gov/about/initiatives/lasers/laws/>
- [26] HABERFELD, Leonardo a Rafael HOLANDA. Implementation of RPAS in Flight Inspection Activities at Brazilian Airspace Control System (SISCEAB). *International Flight Inspection Symposium (IFIS)* [online]. s. 14 [cit. 2020-08-02]. Dostupné z: http://www.icasc.co/sites/faa/uploads/documents/20th_IFIS_Papers/Papers/IFIS18-0023.pdf
- [27] SF30-C High Speed Laser Rangefinder - 100 m. *Parallax Inc.* [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.parallax.com/product/28058>

- [28] Bezpilotní letadla - HOP, Česká republika. *Česká asociace profesionálních provozovatelů bezpilotních letadel, z.s.* [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: https://www.apbl.cz/administrace/soubory_ke_stazeni/1488230820_cz_2017_02_24_uas_hop.pdf
- [29] MALÁ, Zuzana, Danuše NOVÁKOVÁ a Tomáš VÍTŮ. *Laboratorní cvičení z fyziky 1*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04311-0.
- [30] Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). *Geoportál ČÚZK* [online]. [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(tn025tcve0znmqfwsobipxfa\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(tn025tcve0znmqfwsobipxfa))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)
- [31] Povolení k létání bezpilotního letadla – žádost o povolení k létání nad rámeč standardně udělených provozních omezení. *Úřad pro civilní letectví* [online]. [cit. 2020-07-11]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/letadla-bez-pilota-na-palube/letadla-bez-pilota-na-palube-jina-nez-balony/povoleni-k-letani-bezpilotniho-letadla-zadost-o-povoleni-k-letani-nad-ramec-standardne-udelenych-provoznich-omezeni/>
- [32] ENR 1. VŠ EOBEČNÁ PRAVIDLA A POSTUPY. *AIP* [online]. Air Navigation Service of the Czech Republic, 2019 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/e1-1.pdf
- [33] EASA. *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947*. In: . EU, 2019, ročník 2019, číslo 1. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/AMC%20%26%20GM%20to%20Commission%20Implementing%20Regulation%20%28EU%29%202019-947%20%E2%80%94%20Issue%201.pdf>
- [34] JARUS. *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)* [online]. In: . [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v1.0.pdf
- [35] ICAO. *Doc 9859: Safety Management Manual (SMM)*. In: . 2009, číslo 2. Dostupné z: https://www.icao.int/safety/fsix/Library/DOC_9859_FULL_EN.pdf#search=doc%209859

- [36] SEKYROVÁ, Kateřina. *BEZPEČNOSTNÍ ASPEKTY PROVOZU UAV V OKOLÍ ŘÍZENÝCH LETIŠŤ*. Praha, 2018.. MAGISTERSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze.
- [37] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. *Airports and Unmanned Aircraft Systems, Volume 1: Managing and Engaging Stakeholders on UAS in the Vicinity of Airports*. 1. Washington, DC: The National Academies Press., 2020. ISBN 978-0-309-49877-7.
- [38] IDM 5196. *ADB SAFEGATE*. [online]. 2009 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://adbsafegate.com/documents/4911/en/data-sheet-idm-5196>.
- [39] INSTALLATION OF FLIGHT INSPECTION SYSTEM UNIFIS 3000 IN A KINGAIR B300 - EASA STC 100 43 630. *Berlin Aviation*. [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.bba.aero/wp-content/uploads/2013/11/EASA-STC-100-43-630.pdf>.
- [40] FLIGHT INSPECTION. *Norwegian Special Mission* . [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.nsm.aero/flight-inspection/>.
- [41] 754931.jpg. In: *Electro World* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://cdn.electroworld.cz/images/img-1000/1/754931.jpg>
- [42] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz a.s, TopGis s.r.o. [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- [43] FLY SAFE GEO ZONE MAP. *DJI* [online]. [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/flysafe/geo-map>
- [44] *MAPOVÁ APLIKACE ANALÝZY VÝŠKOPISU* [online]. Praha: Zeměměřický úřad [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/dmr/>
- [45] SPECIAL FLIGHT INSPECTION GROUP, a DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPACO AÉREO. Seminário Insp. Voo 11. In: *ICAO* [online]. [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2011/FLTEST/Sesion%203%20Presentacion%201%20Brasil.pdf>

Seznam obrazových příloh

Obrázek 1: Řez reflektorem PAPI, (zdroj: [2])	16
Obrázek 2: Barevné kombinace, (zdroj: [3])	16
Obrázek 3: Typická příčka PAPI pro sestupovou rovinu 3°, (zdroj: [5])	18
Obrázek 4: Stoupavý sklon RWY, (zdroj: [4])	19
Obrázek 5: Části podstavy, [7]	20
Obrázek 6: Vnitřní struktura reflektoru, (zdroj: [36]).....	21
Obrázek 7: Doba přepnutí, (zdroj: [9]).....	22
Obrázek 8: Pozemní kalibrace, (zdroj: [14])	24
Obrázek 9: Schéma komponent UNIFIS 3000, (zdroj: [37]).....	26
Obrázek 10: UNIFIS 3000, (zdroj: [38]).....	26
Obrázek 11: Level Run Method, (zdroj: [17]).....	27
Obrázek 12: On-Path Method, (zdroj: [17])	28
Obrázek 13: Použití Theodolite Method, (zdroj: [43])	28
Obrázek 14: Letová kontrola stranového krytí, (zdroj: [17])	29
Obrázek 15: Kontrola OPS, (zdroj: [17]).....	30
Obrázek 16: Vizualizace, (zdroj: [22])	33
Obrázek 17: Schéma návrhu zapojení měřicí stanice, (zdroj: vlastní zpracování).....	35
Obrázek 18: SF30/SF11, (zdroj: [26])	36
Obrázek 19: Trajektorie cyklu, (zdroj: vlastní zpracování)	37
Obrázek 20: Vertikální profil, (zdroj: vlastní zpracování)	37
Obrázek 21: Prostor 1 - pohled shora, (zdroj: vlastní zpracování).....	38
Obrázek 22: Prostor 2, (zdroj: vlastní zpracování)	38
Obrázek 23: Vizualizace prostorů, (zdroj: vlastní zpracování)	39
Obrázek 24: Dopadová oblast, (zdroj: vlastní zpracování)	39
Obrázek 25: DJI MAVIC AIR, (zdroj: [39]).....	43
Obrázek 26 - Graficky znázorněný postup (zdroj: vlastní zpracování).....	44
Obrázek 27: Analýza výškopisu, (zdroj: vlastní zpracování dle [42])	45
Obrázek 28: Označení míst, (zdroj: vlastní zpracování dle [40])	45
Obrázek 29: Záběr 1 z UAS, (zdroj: vlastní zpracování).....	46
Obrázek 30: Záběr 2 z UAS, (zdroj: vlastní zpracování).....	46
Obrázek 31: Snímek obrazovky řídicí stanice, (zdroj: vlastní zpracování).....	47
Obrázek 32: Výtah z výstupní dokumentace posledního letového ověřování, (zdroj: [18]) ...	49
Obrázek 33: Proces schvalování, (zdroj: vlastní zpracování)	52
Obrázek 34: Rozdělení událostí, (zdroj: vlastní zpracování dle [32]).....	53
Obrázek 35: Nebezpečí, (zdroj: vlastní zpracování).....	54

Obrázek 36: Výpočet pravděpodobnosti, (zdroj: vlastní zpracování dle [32])	54
Obrázek 37: Geofencing DJI mapa okolí LKPR, (zdroj: [41]).....	56

Seznam tabulek

Tabulka 1: Intervaly letových ověřování, (zdroj: vlastní zpracování dle [2])	31
Tabulka 2: Predikce, (zdroj: vlastní zpracování).....	46
Tabulka 3: Vyhodnocení 1. místa, (zdroj: vlastní zpracování)	48
Tabulka 4: Výpočet 2. místo, (zdroj: vlastní zpracování)	48
Tabulka 5: Výpočet 2. místo – pouze stoupání (zdroj: vlastní zpracování)	49
Tabulka 6: Safety Risk Matrix, (zdroj: vlastní zpracování dle [32]).....	53
Tabulka 7: Nebezpečí dle úrovně rizika, (zdroj: vlastní zpracování dle [34])	55