



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Adam Výboštok

**OCHRANA LETADLA PŘED OPTICKÝMI ZDROJI
ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ**

Bakalářská práce

2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Adam Výbošťok

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Ochrana letadla před optickými zdroji
elektromagnetického záření**

Název tématu (anglicky): Aircraft protection against optical sources of
electromagnetic radiation

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je identifikovat podmínky, při kterých představují optické zdroje elektromagnetického záření, především nízkoenergetické lasry, největší ohrožení pro letový provoz. Řešen bude především směr paprsku vzhledem k poloze letounu.
- Optické zdroje elektromagnetického záření, typy a zdroje
- Legislativní ochrana letadla a letiště
- Detekování a zameření zdroje elektromagnetického záření
- Ozařování letadla v testovacích podmínkách a sběr dat
- Analýza dat a jejich vyhodnocení
- Diskuze řešení



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího BP
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Výroční zprávy ÚZPLN
Zákon 49/1997 o civilním letectví
Mikš A., Aplikovaná optika, FSV ČVUT

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
(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: **9. srpna 2021**
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 práce.

Adam Výboštok
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020

Pod'akovanie

Na tejto strane by som sa chcel veľmi pekne poďakovať vedúcemu mojej práce doc. Ing. Jakubovi Hospodkovi, Ph.D, ktorý mi dal možnosť túto tému spracovať a poskytol mi cenné rady. Ďalej doc. Ing. Bc. Vladimírovi Sochovi, Ph.D., Ing. Jánovi Žížkovi, leteckej škole F-Air, spolužiakom Roiovi Freudenthalovi a Alexandrovi Sorochinovi za ich pomoc pri zrealizovaní praktickej časti tejto práce. V neposlednom rade rodine a priateľom, ktorí ma podporovali.

Prohlášení

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

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

Nemám závažný důvod proti užití 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 01. 08. 2021

.....

Podpis

Abstrakt

Predmetom bakalárskej práce „Ochrana lietadla před optickými zdroji elektromagnetického záření“ je vykonať praktické experimenty ožarovania lietadla s ľahko dostupnými laserovými zariadeniami pri rôznych podmienkach. Následne tieto namerané dáta vyhodnotiť.

Kľúčové slová

Elektromagnetické žiarenie, laser, ochranné priestory, ľudské oko, ožiarovanie, laserový lúč

Abstract

The subject of the bachelor thesis “Aircraft protection against optical sources of electromagnetic radiation” is to execute practical experiments of irradiation of airplane with easily accessible laser devices under different circumstances. Subsequently evaluate these measured data.

Key words

Electromagnetic radiation, laser, safety areas, human eye, irradiation, laser beam

Obsah

Úvod	10
1. Optické zdroje elektromagnetického žiarenia, typy a ich dostupnosť	11
1.1 Elektromagnetické žiarenie	11
1.2 Elektromagnetické spektrum	12
1.3 Laser	13
1.3.1 Vznik laserového svetla	13
1.3.2 Stimulovaná emisia	13
1.3.3 Časti laseru	13
1.3.4 Zdroj žiarenia	13
1.3.5 Rezonančná komora	14
1.3.6 Aktívne prostredie	14
1.3.7 Operačné módy laseru	14
1.4 Príklady častých typov laserov	15
1.4.1 Hélium neónový (HeNe) laser	15
1.4.2 Iónové lasery	15
1.4.3 Laser na základe oxidu uhličitého	15
1.4.4 Nd:YAG laser	16
1.4.5 Excimerový laser	16
1.4.6 Polovodičové diódové lasery	16
1.5 Dostupnosť laserových zariadení	17
2. Predpisy a legislatívna ochrana letiska	18

2.1	ICAO Doc 9815.....	18
2.1.1	Laserová citlivá letová zóna (Laser beam sensitive flight zone LSFZ).....	18
2.1.2	Laserová kritická letová zóna (Laser beam critical flight zone LCFZ).....	18
2.1.3	Letová zóna bez laserového žiarenia (Laser beam free flight zone LFFZ)	18
2.1.4	Normálna letová zóna (Normal flight zone NFZ)	20
2.2	Letecký predpis L14 Letiská.....	20
2.3	Legislatíva v ČR.....	21
3.	Nebezpečenstvo lasera pre posádku a leteckú prevádzku.....	22
3.1	Pokožka.....	22
3.2	Ok.....	22
3.2.1	Rohovka	23
3.2.2	Komorová voda	23
3.2.3	Šošovka.....	23
3.2.4	Sklovec.....	23
3.2.5	Sietnica.....	24
3.3	Účinky laserového žiarenia zo zdravotného hľadiska	24
3.3.1	Rozptýlenie.....	25
3.3.2	Oslnenie a oslepenie	25
3.3.3	Dočasné oslepenie	25
3.3.4	Následné obrazy.....	25
3.3.5	Popáleniny sietnice.....	26
3.3.6	Vnútorne krvácanie sietnice.....	27
3.3.7	Trhliny na očnej guli.....	27

3.3.8	Iné účinky	27
3.4	Nebezpečné laserové účinky podľa vlnovej dĺžky	27
3.5	Dopad na prevádzku a tréning posádok.....	28
3.5.1	Situačné uvedomenie	28
3.5.2	Ochranné postupy pred letom.....	29
3.5.3	Postupy za letu pred vstupom do priestoru so známou laserovou činnosťou ..	29
3.5.4	Postupy za letu počas a po ožiarení kokpitu laserom.....	29
4.	Incidenty a štatistiky vo svete.....	31
5.	Experimenty.....	33
5.1	Predstava	33
5.2	Potrebné vybavenie	33
5.2.1	Lasery.....	33
5.2.2	Senzor a zdrojový kód	36
5.2.3	Program pre záznam dát CoolTerm	40
5.3	Vlastné merania.....	40
5.3.1	Meranie na vzdialenosť 1800 m.....	42
5.3.2	Meranie na vzdialenosť 1200 m.....	42
5.3.3	Zmena	43
5.3.4	Meranie v ose lietadla.....	43
5.3.5	Meranie v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi	44
5.3.6	Meranie 45° od osy lietadla vpravo v smere z kabíny	44
5.3.7	Meranie 45° od osy lietadla vľavo v smere z kabíny.....	44
5.4	Chyba merania	45

5.4.1	Chyba merania pre meranie v ose lietadla	45
5.4.2	Chyba merania pre meranie v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi.....	45
5.4.3	Chyba merania pre meranie 45° vpravo v smere z kabíny	46
5.4.4	Chyba z vplyvu prostredia.....	46
5.4.5	Náhodná chyba merania.....	46
5.4.6	Samotné sklo kabíny lietadla	46
6.	Diskusia.....	47
	Záver	49
	Citované diela.....	50
	Zoznam obrázkov	52
	Zoznam grafov.....	53
	Zoznam zdrojových kódov	54
	Zoznam tabuliek	55
	Zoznam príloh.....	56

Úvod

Kvôli exponenciálnemu zhusťovaniu leteckej dopravy majú niektorí jedinci v našej spoločnosti nutnosť vyjadriť svoju nespokojnosť s týmto trendom pomocou extrémnych spôsobov z dôvodov jasných len im samotným. Jeden z týchto dôvodov je ožarovanie lietadiel, vrtuľníkov a iných leteckých dopravných prostriedkov laserovým lúčom, ktorých zdrojom sú bežne dostupné laserové zariadenia napríklad laserové ukazovadlá. Za posledné roky sa po celom svete aj v Českej Republike počet laserových útokov stále zvyšuje.

V teoretickej časti tejto bakalárskej práce sa snažím čitateľovi ozrejmiť vznik, typy a funkcie laserového žiarenia. Ďalej jeho zdroje a využitie. Následne chcem ukázať existujúce ochranné oblasti zriadené okolo letísk so zákazom laserového žiarenia. Veľkou a poslednou časťou je predstaviť fyziologické postihy, ktoré sa môžu dostaviť po úspešnom ožarení posádky laserovým lúčom a predstaviť postupy s odporúčaniami ako sa v takejto situácii zachovať.

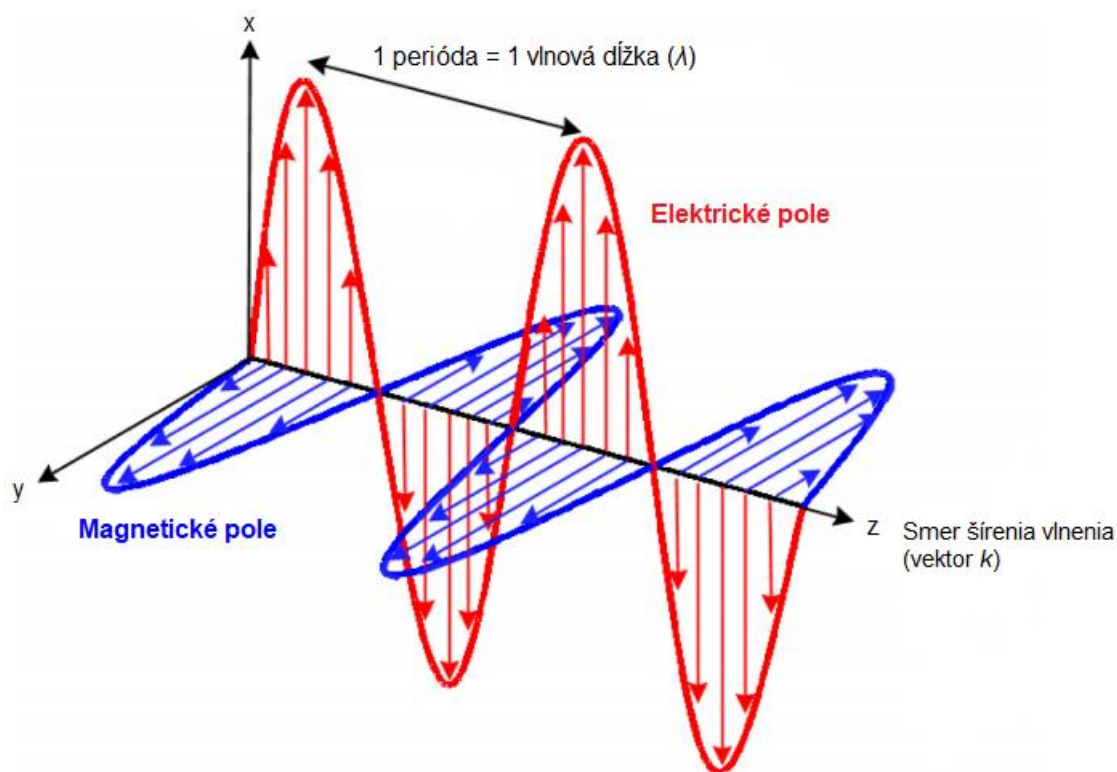
V praktickej časti chcem popísať prípravu a vykonanie experimentov ožarovania lietadla laserovým žiarením pri rôznych podmienkach a s rozdielnymi parametrami. Následne zo senzoru vyhodnotiť namerané dáta a okomentovať chovanie laserového žiarenia. Na záver identifikovať chyby, ktoré negatívne zasahujú do meraní a ovplyvňujú namerané hodnoty. Verím, že tieto experimenty pomôžu z vedeckého hľadiska ľuďom zaoberajúcim sa nebezpečím laserového ožarovania lietadiel.

1. Optické zdroje elektromagnetického žiarenia, typy a ich dostupnosť

1.1 Elektromagnetické žiarenie

Elektromagnetické žiarenie si môžeme predstaviť ako druh energie, ktoré sa dokáže šíriť priestorom. Je všade prítomné okolo nás aj v tomto okamihu. Môže mať prírodný zdroj ako je napríklad Slnko ale takisto aj umelý, vytvorený človekom. Rýchlosť tohto vlnenia je vo vákuu rovná rýchlosti svetla t.j. 299 792 458 m/s. (1)

Na pochopenie princípu tohto elektromagnetického žiarenia si dokážeme pomôcť analógiou k vlnám vo vode. Existujú vlny, ktoré sú široké a pomalé či rýchle, podobajú sa jemným vlnkám na hladine alebo sú silné ako vlny tsunami. Podobne sa správajú aj elektromagnetické vlny. Pre popísanie vln použijeme ich dve základné charakteristiky. Vlnovú dĺžku (λ) a frekvenciu (f). Na Obrázku 1 môžeme vidieť sínusovú vlnu, ktorá zobrazuje vlnu obecnú napr. elektromagnetickú vlnu alebo audio vlnu. (1)



Obrázok 1 Grafické zobrazenie elektromagnetickej vlny (1)

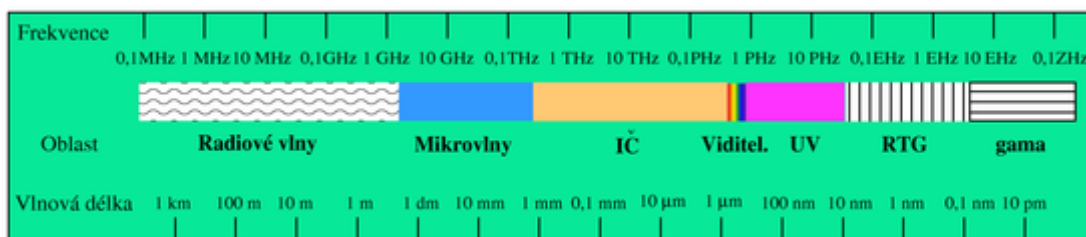
Osa z určuje smer šírenia vlny a má jednotky času alebo polohy. Tento smer šírenia popisuje vektor k . Elektromagnetické vlny pozostávajú z oscilujúcich častí elektrického a magnetického poľa, ktoré sú na seba kolmé. Vzdialenosti maxim alebo vrcholov sínusoidy

magnetického poľa na ose z určujú vlnovú dĺžku vlny λ v jednotkách vzdialenosti. Ak si ale osu z zadefinujeme ako čas môžeme tieto vzdialenosti vyjadriť ako periódu vlny T za určitý čas. Druhá vlastnosť elektromagnetických vln, ktorou je frekvencia vyjadruje koľko ráz za sekundu vlna osciluje. Túto frekvenciu sme schopní zistiť zo vzorca $f=c/\lambda$, kde c je rýchlosť svetla vo vákuu. (1)

Existuje viac druhov elektromagnetických žiarení, ktoré sú definované rozsahmi rôznych vlnových dĺžok a tvoria elektromagnetické spektrum niekedy sa nazývajúce Maxwellova dúha. (1)

1.2 Elektromagnetické spektrum

- **Rádiové vlny** majú rozsah vlnových dĺžok medzi 1 km – 1m. Využívajú sa pre prenos rozhlasového vysielania alebo televízneho. (1) (2)
- **Mikrovlny** majú vlnovú dĺžku 10 - 1 mm. Používajú sa napr. pre bezdrôtovú komunikáciu Wi-Fi, pre vysielanie satelitnej televízie alebo pre ohrev potravín v mikrovlnnej rúre. (1) (2)
- **Infračervené žiarenie** má vlnovú dĺžku 1 mm – 700 nm. (1) (2)
- **Viditeľné svetlo** má vlnové dĺžky 700 nm – 400 nm. Táto oblasť sa nazýva aj svetelné spektrum a je viditeľná nahým ľudským okom. Do tejto oblasti spadajú optické zdroje elektromagnetického žiarenia, ktorým sú napr. lasery. (1) (2)
- **Ultrafialové žiarenie (UV)**, ktorého zdrojom je napríklad Slnko má vlnové dĺžky medzi 400–10 nm. (1) (2)
- **Röntgenové žiarenie** sa využíva pre bezpečnosť napríklad na letiskách alebo v medicínskom priemysle. Jeho vlnové dĺžky sú v rozmedzí 10-1 nm. (1) (2)
- **Gama žiarenie** má vlnové dĺžky, ktoré sú menšie ako 50 pm, ktoré sú menšie ako atóm. Vzniká napr. pri štiepení atómov v jadrových elektrárnach. V medicíne sa vyžíva pri liečbe nádorov. (1) (2)



Obrázok 2 Elektromagnetické spektrum (14)

1.3 Laser

1.3.1 Vznik laserového svetla

Laserové svetlo je v princípe tvorené pomocou jadrových reakcií medzi jadrami atómov a elementárnymi časticami. Pre pohodlnejšie vysvetlenie týchto reakcií zjednodušíme popis jadra atómu. Bude sa skladať len z vlastného hustého jadra a jedného alebo viac elektrónov v pohybe okolo tohto jadra. Jeho elektróny sa budú vyskytovať na uzavretých vrstvách v elektrónovom obale. (3)

Tento obal mimo iné určuje aj optické vlastnosti daného atómu. Optické vlastnosti dokážu byť zmenené vďaka rôznym procesom, ktoré spôsobujú prechod elektrónov na vyššiu alebo nižšiu hladinu v obale, čo zapríčiňuje vyžiarenie určitej vlnovej dĺžky a teda vyžiarenie svetla v podobe fotónov. (3)

Medzi tieto procesy patrí absorpcia, spontánna emisia a stimulovaná emisia elektrónov, z ktorých je pre laser najdôležitejšie stimulovaná emisia. (3)

1.3.2 Stimulovaná emisia

V roku 1917 Albert Einstein uviedol, že fotón uvoľnený z jedného kladne nabitého atómu by mohol spôsobiť uvoľňovanie fotónov z druhého atómu. Fotón uvoľnený z druhého atómu by mal rovnakú frekvenciu, energiu, smer a fázu s fotónom z pôvodného atómu. Fotón, ktorý toto zapríčinil by ďalej pokračoval bez zmeny smeru. Tieto dva fotóny by teda spúšťali ďalšie uvoľňovacie procesy pri veľkom množstve kladne nabitých atómov. (3)

Pri stimulovanej emisii bude nastávať zväčšenie počtu fotónov idúcich v jednom smere, ktorý je určený umiestnením zrkadiel na koncoch optickej dutiny. Vďaka tomu sa počet fotónov pohybujúcich pozdĺž osi dvoch zrkadiel značne zvyšuje a nastáva „zosilňovanie svetla stimulovanou emisiou žiarenia“. Po dosiahnutí dostatočného zosilnenia sa vytvorí laserový lúč. (3)

1.3.3 Časti laseru

Obecne laser pozostáva z aktívneho prostredia, zo zdroja žiarenia pre budenie elektrónov a optickej dutiny. (3)

1.3.4 Zdroj žiarenia

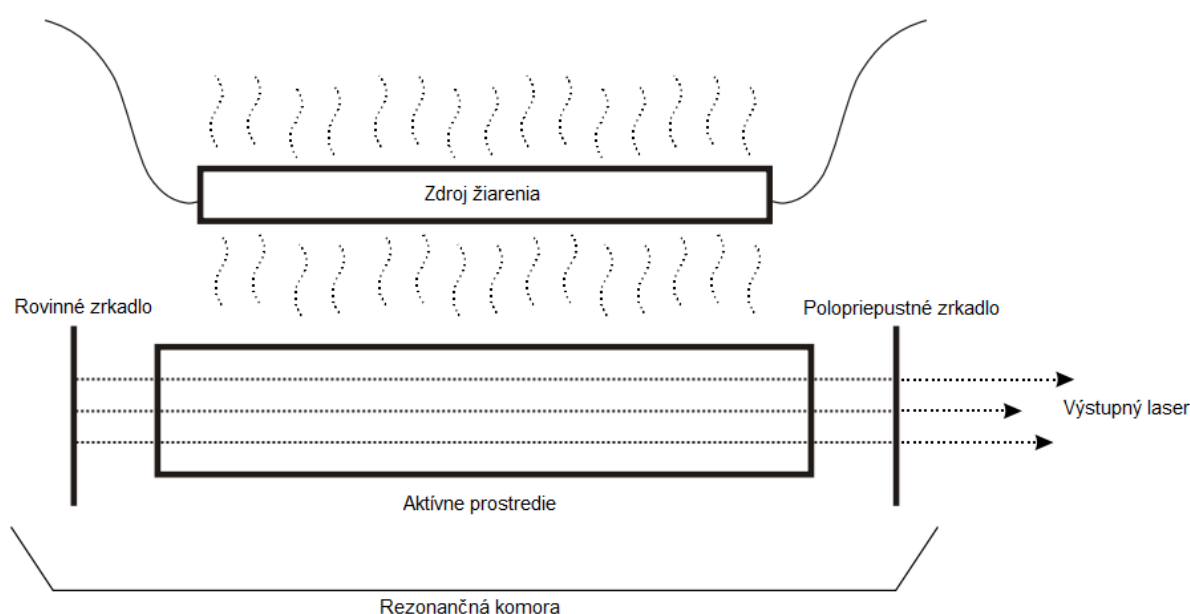
Dodáva energiu atómom alebo molekulám aktívneho prostredia dovoľujúc im sa dostať do kladne nabitého stavu. (3)

1.3.5 Rezonančná komora

Rezonančná komora je potrebná na zosilnenie laseru a na voľbu požadovaného smeru fotónov. Skladá sa zo zrkadiel v optickej dutine, ktoré musia byť presne zarovnané v jednej osi a jedno z nich musí byť polopriepustné. Postupné uvoľňovanie stále väčšieho množstva fotónov sa odráža na nepriepustnom zrkadle čo vytvorí úzky, sústredený lúč svetla, ktorý unikne von cez polopriepustné zrkadlo. (3)

1.3.6 Aktívne prostredie

Lasery sú označené podľa typu aktívneho prostredia, v ktorom prebieha uvoľňovanie fotónov. Existuje päť typov: pevnolátkové, plynné, farbivové, chemické a polovodičové. (3)



Obrázok 3 Stavba pevnolátkového laseru (4)

1.3.7 Operačné módy laseru

Operačné módy sa delia podľa toho ako veľmi veľký výkon je laseru dodávaný a časové trvanie jeho dodávky.

Kontinuálny

Lasery s kontinuálnym lúčom fungujú so stabilnou dodávkou energie pre lúč. V nízko výkonných laseroch ako HeNe, je výkon fixne stanovený od výroby a s dlhodobým používaním postupne klesá. (3)

Pulzný

Pulzné lasery vydávajú pulzy trvajúce niekoľko sto mikrosekúnd až po niekoľko milisekúnd. Tento mód sa niekedy nazýva ako dlhý pulzačný alebo normálny. (3)

Q-switch pulzný

Pulzné Q-prepínacie lasery sú výsledkom oneskorenia v dutine spôsobeného súčiastkou vloženou do obvodu, ktorá sa nazýva Q-switch. Dovoľuje laseru uložiť veľké množstvo potenciálnej energie. Potom nastáva jednopulzné vyžarovanie v oblasti 10^{-8} sekundy. Tieto pulzy budú mať veľké energetické maximá v rozmedzí od 10^6 až 10^9 Wattu. (3) (2)

Pulzne opakujúci

Pulzne opakujúce sa lasery vypúšťajú laser s pevnými alebo premenlivými pulzmi v rozmedzí pár až 20 000 pulzov za sekundu. (3)

1.4 Príklady častých typov laserov

1.4.1 Hélio neónový (HeNe) laser

Héliovo neónový laser tvoria kladne nabité atómy hélia. Výkon HeNe laseru je v rozmedzí od mW až po niekoľko desiatok mW v najsilnejších systémoch. Najdostupnejšie HeNe lasery sa využívajú v stavebníctve, v optickej meteorológii a pri tvorbe hologramov. (3) (2)

Najčastejšie pracuje na vlnovej dĺžke 633 nm. Niektoré hélivo neónové lasery pracujú na vlnových dĺžkach 594 nm kde produkujú žlté svetlo, oranžové na 612 nm a zelené na 543 nm. (3) (1)

1.4.2 Iónové lasery

Sú tvorené plynmi ako argón, kryptón, xenón a neón. Vedia poskytnúť široký rozsah vlnových dĺžok od ultrafialového žiarenia až po takmer infračervené žiarenie Iónové lasery môžu byť tvorené aj zmesou plynov a poskytovať žiarenie rôznych vlnových dĺžok. Fungujú podobne ako HeNe lasery. (3) Využívali sa v laserových tlačiarniach, pri liečbe sietnice, na tvorbu laserových show a na vytváranie CD. Z veľkej časti sú dnes nahradené diódovými lasermi. (2)

1.4.3 Laser na základe oxidu uhličitého

Je najefektívnejší a najvýkonnejší laser z pomedzi laserov s kontinuálnym lúčom. (3) Dokáže dodávať stály výkon o hodnotách do 100 kilowattov pri vlnovej dĺžke medzi 9 a 11 μm . (2) Molekuly CO_2 sú budené kolíziami medzi elektrónmi cez elektrické výboje. Majú vysokú

účinnosť až 30% oproti HeNe s účinnosťou 0,1%. (3) Využívajú sa často pri priemyselnom spracovaní materiálov a v medicíne. (2)

1.4.4 Nd:YAG laser

Patrí medzi tuholátkové lasery. Jeho aktívnym materiálom je izotropný kryštál Yttrium Aluminium Granátu, ktorému pomáhajú ióny neodymu a je jedným z najpoužívanejších laserov. Dosahuje priemerné výkony okolo 1000 W a vlnovú dĺžku 1,06 μm . (3) (2) Má využitie vo vede a výskume, medicíne, pri spracovaní materiálov a pri spektroskopii. (2)

1.4.5 Excimerový laser

Excimer je skratkou pre excitovaný dimer. Sú to molekuly, ktorým chýba uzemnený stav a existujú len vo vybudenom štádiu kde sú stabilné na krátky čas. Excimer sa po vyžiarení žiarenia dostáva do uzemneného stavu a ihneď sa rozpadá na jednotlivé atómy a vzniká ultrafialový laserový lúč. Využíva kombináciu vzácnych plynov ako argón, kryptón, xenón v kombinácií s fluórom, chlóróm a fleróviom. (2) Jeho výkony sú okolo 50-100 wattov. Využíva sa v priemysle a medicíne. (3)

1.4.6 Polovodičové diódové lasery

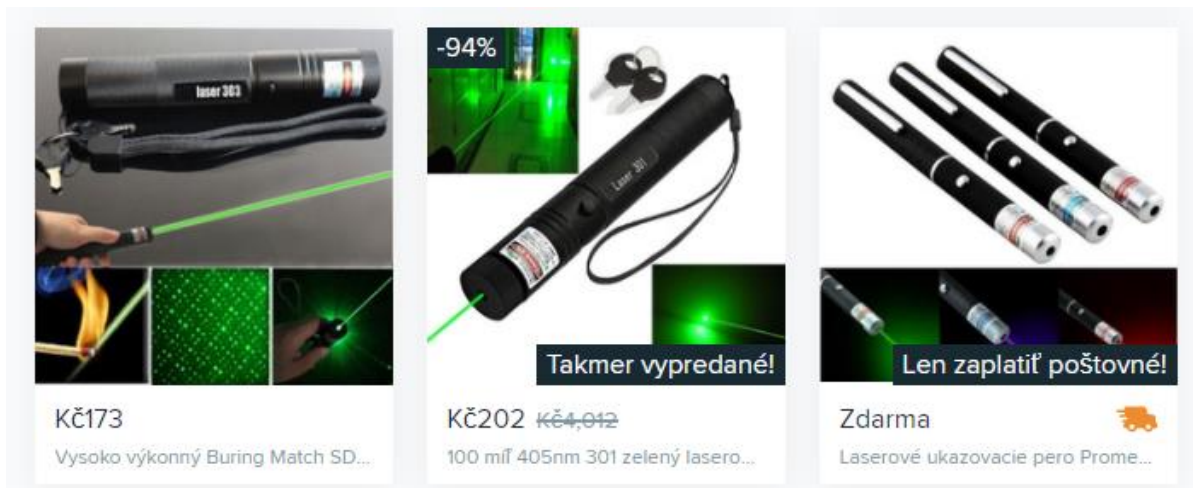
Sú pevnolátkové lasery zvyčajne s využitím externého prúdu ako zdrojom pre budenie kladne nabitých častíc vo vnútri polovodiča. (3) Laserový lúč sa vytvorí po dodaní externého prúdu a vytvorení PN prechodu, ktorý prepúšťa elektrický prúd len jedným smerom. (2)

Najčastejšie sa v nich používa galium arsenidová zlúčenina, ktorá vyžaruje infračervené svetlo o vlnovej dĺžke 840 nm. (2) (3) Ich výhodami sú malé rozmery, 80% účinnosť, výkon niekoľko sto wattov a nízka cena. Majú uplatnenie v CD prehrávačoch, tlačiarňach, počítačoch pri spracovaní materiálov alebo na hlasovú a dátovú komunikáciu. (2)

1.5 Dostupnosť laserových zariadení

V dnešnej dobe je na internetových obchodoch široký výber laserových zariadení s rôznymi určeniami, výkonmi, cenami a farbami laserového svetla.

Jednoduchšie laserové ukazováka majú výkon okolo 5 mW, čo je dostatočné pre dosah niekoľko sto metrov. Ich ceny sa pohybujú okolo 100 Kč. Prístup má k nim ktokoľvek a dajú sa kúpiť na internetových obchodoch ako je napríklad wish.com. Niekedy sú technické



Obrázok 4 Ponuka bežných laserových zariadení na webovej stránke wish.com (19)

parametre na týchto masových internetových obchodoch nezodpovedajúce realite a sú väčšinou menej výkonné ako je uvádzané. Ich cenové ocenenie tiež často závisí od daného predajcu.

Bežne dostupné laserové zariadenia s vyšším výkonom okolo 100 mW a dosahom niekoľko kilometrov sú taktiež veľmi jednoducho dostupné z podobných internetových obchodov ako už vyššie spomínaný wish.com. Cena týchto zariadení je približne 250 Kč.

Výkonnejšie kategórie laserov sú poskytované oficiálnymi spoločnosťami, ktoré tieto zariadenia distribuujú. Majú v ponuke lasery s výkonmi aj niekoľko kilowatt. Pre nákup takýchto zariadení je nutné poskytnúť informácie na aké aplikácie budú tieto zariadenia používané, ktoré sú vyhodnotené a až potom je povolený ich predaj.

2. Predpisy a legislatívna ochrana letiska

2.1 ICAO Doc 9815

Je dokument vydaný ICAO organizáciou v roku 2003. Predstavuje príručku zaoberajúcu sa laserovým žiarením a jeho dopadom na leteckú bezpečnosť. Obsahuje technický popis laserov, jeho fyzické a psychologické účinky na pilota, ako sa pred laserovým žiarením chrániť a vymedzuje laserové citlivé zóny okolo letiska. Je implementovaný v predpise Annex 14 a takisto z neho čerpá aj letecký predpis v českej republike L 14 Letiská.

Podľa odstavca 5.3.1.2 v Annex 14, by mali byť zriadené oblasti alebo zóny senzitivne pre laserové žiarenie. Tieto oblasti sú nasledujúce:

2.1.1 Laserová citlivá letová zóna (Laser beam sensitive flight zone LSFZ)

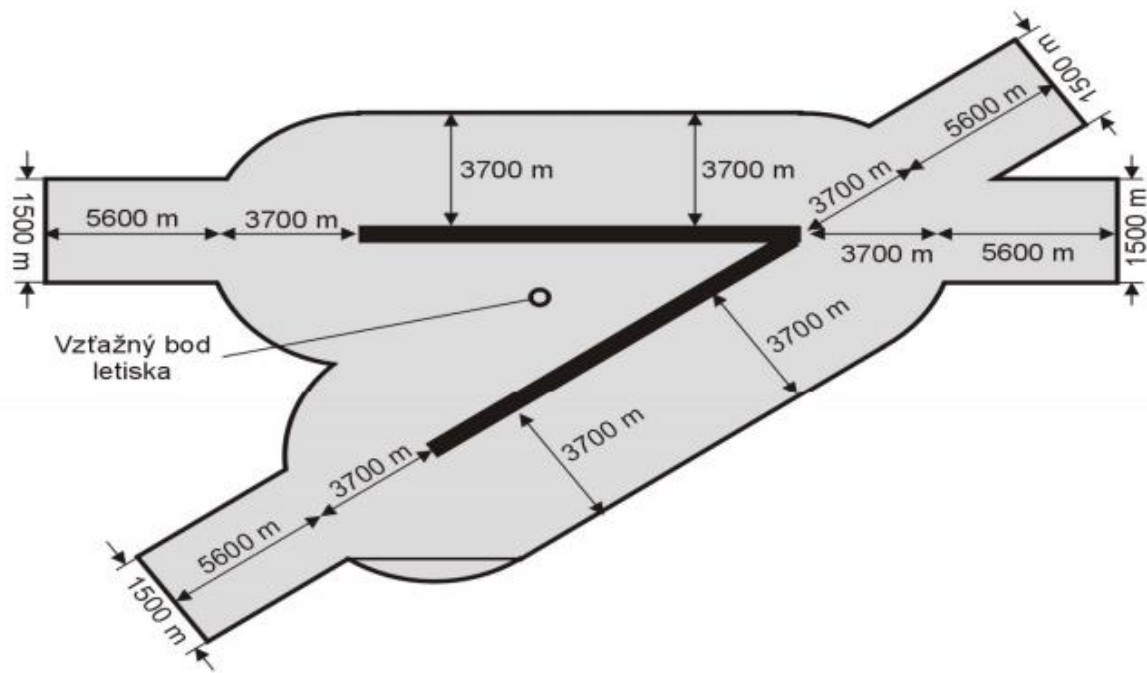
Intenzita v tejto oblasti nebude väčšia ako $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Zároveň nesmie intenzita laserového žiarenia zapríčiniť následný obraz (after-image) alebo dočasné oslepenie pilota. Nemusí byť priamo viazaný k LFFZ alebo LCFZ. (4)

2.1.2 Laserová kritická letová zóna (Laser beam critical flight zone LCFZ)

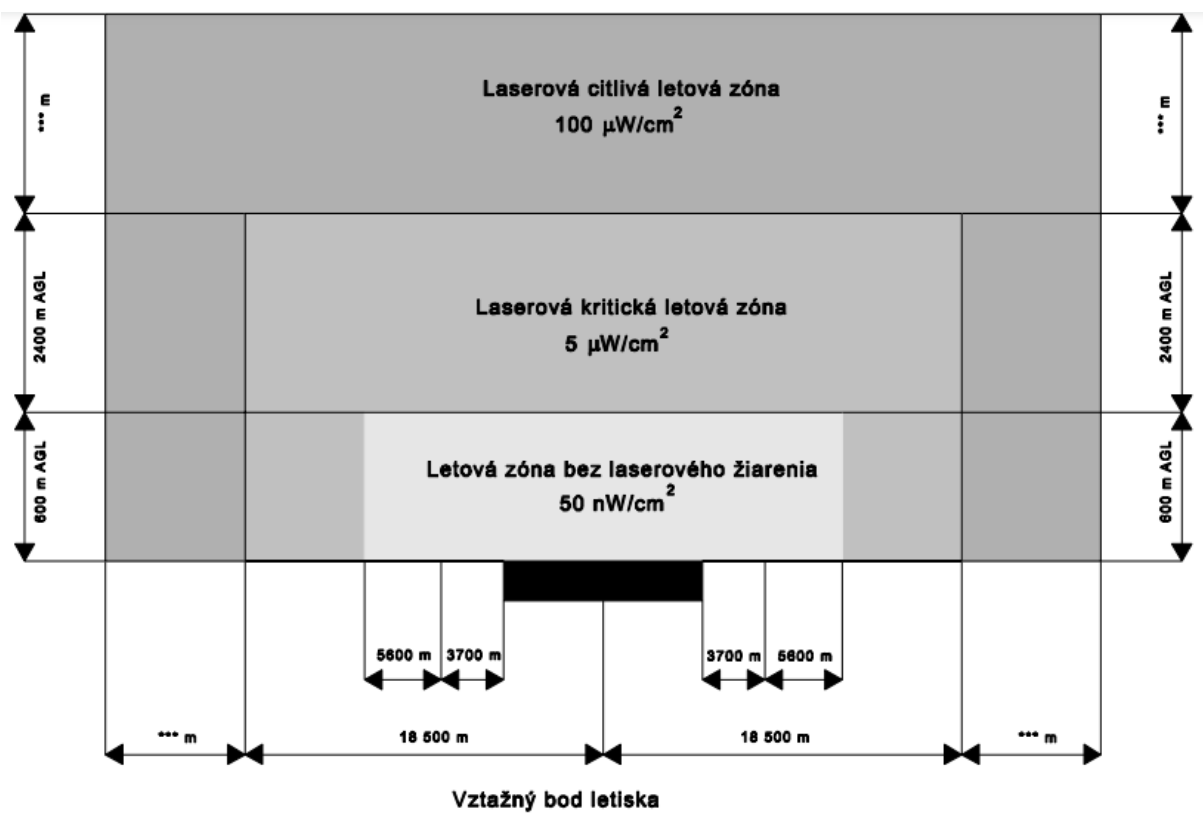
Je vzdušný priestor vo vzdialenosti 18 500 m (10 NM) od vzťažného bodu letiska. Siahá od zeme až do výšky vrátane 3 050 m (10 000 ft) nad zemou. Túto oblasť je možné upraviť potrebám prevádzky na letisku. Intenzita tu nepresiahne $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Ak posádka zasiahne laser v tejto zóne, môže dôjsť doznievaniu zrakového vnemu a oslneniu pilota prudkým jasom. (4)

2.1.3 Letová zóna bez laserového žiarenia (Laser beam free flight zone LFFZ)

Je vzdušný priestor v bezprostrednej blízkosti letiska do výšky vrátane 600 m (2000 ft) nad zemou do vzdialenosti 3 700 m (2 NM) vo všetkých smeroch od osi dráhy. Ďalej sa predlžuje v ose dráhy o 5 600 m (3 NM) a rozširuje o 750 m na každú stranu od osi dráhy. Vo vnútri tejto zóny je hodnota intenzity laserového žiarenia na úrovni nie viac ako $50 \text{nW}/\text{cm}^2$, pri ktorej sa nepredpokladá narušenie videnia posádky. (4)

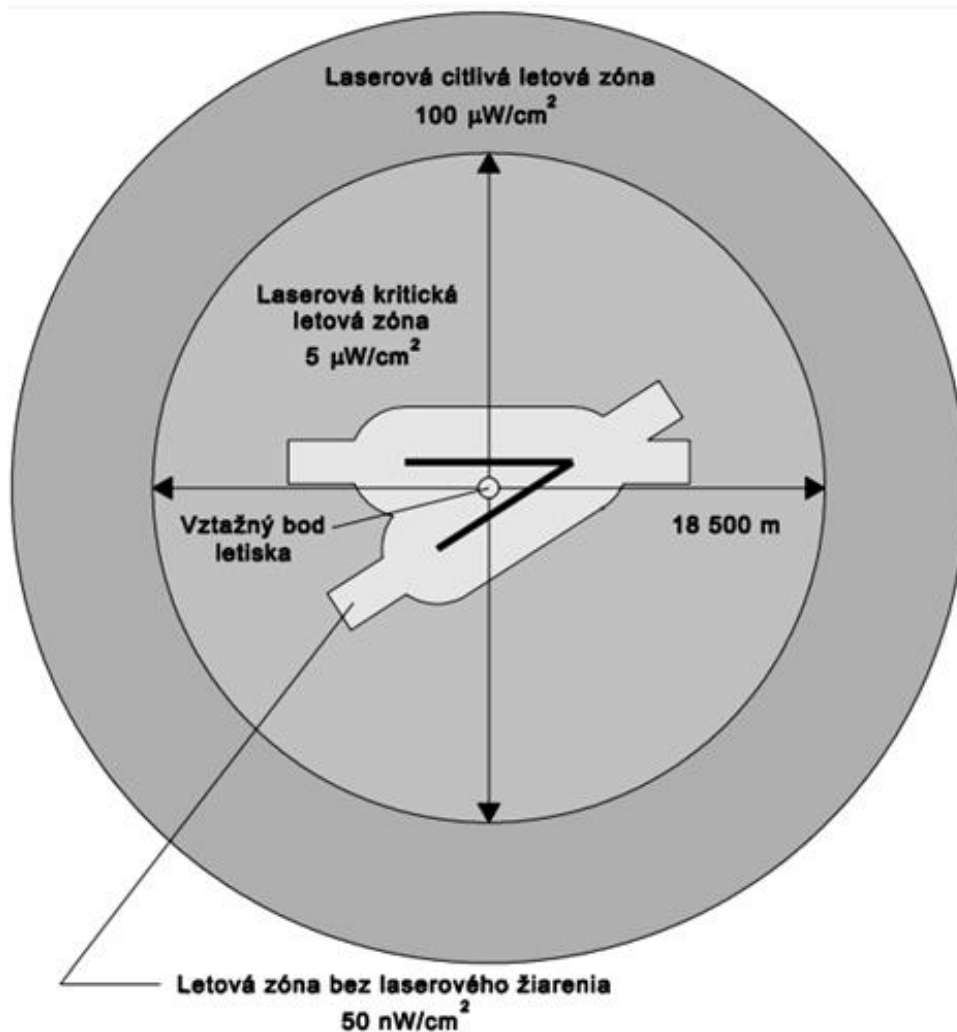


Obrázok 5 Letová zóna bez laserového žiarenia (15)



*** Určené na základe letisko-prevádzkového posúdenia

Obrázok 6 Ochranné letové zóny (15)



Obrázok 7 Ochranné zóny so znázornenými úrovňami (intenzitou) laserového žiarenia (15)

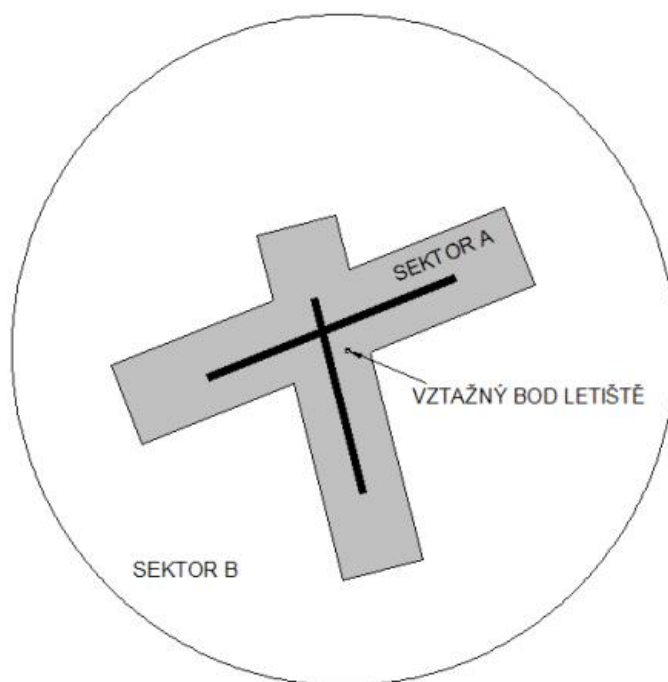
2.1.4 Normálna letová zóna (Normal flight zone NFZ)

Je vzdušný priestor, ktorý sa nedefinuje ako LFFZ, LCFZ, LSFZ ale musí byť chránený pred laserovým žiarením, ktoré by mohlo spôsobiť biologické poškodenie oka. Intenzita laserového žiarenia tu musí byť rovná alebo menšia než MPE pre lasery s kontinuálnym lúčom a pulsné lasery. MPE (Maximum Permissible Exposure) je maximálna prípustná dávka ožiarenia, ktorá môže zasiahnuť osobu a neprejavia sa u nej nepriaznivé vplyvy ožiarenia.

(4)

2.2 Letecký predpis L14 Letiská

Problematika laserových ochranných zón sa rozoberá v odseku 11.1.6, kde sú popísané dva sektory so zákazom laserových zariadení. (5)



Obrázok 8 Znáornenie ochranného pásma so zákazom laserových zariadení (5)

Sektor A vymedzený obdĺžnikom s pozdĺžnou osou totožnou so vzletovou a pristávacou dráhou o šírke 8 000 m, dĺžke presahujúcej prah dráhy o 10 000 m a zasahuje od zeme do výšky 600 m nad priemernou nadmorskou výškou prevádzkových plôch letiska. (5)

Sektor B má tvar kruhu so stredom vo vzťažnom bode letiska o polomere 20 000 m a zasahuje od zeme do výšky 2 400 m nad priemernou nadmorskou výškou prevádzkových plôch letiska. (5)

2.3 Legislatíva v ČR

V českej republike sa ohrozením lietadla laserom zaoberá zákon č.407/2010 Sb., ktorý je novelou zákona č. 49/1997 Sb. o civilnom letectví. Podľa tohto zákona sa stanovuje trestná sadzba až 5 000 000 Kč ak bude ohrozená bezpečnosť letovej prevádzky narušením ochranného pásma so zákazom laserových zariadení. (6)

3. Nebezpečenstvo lasera pre posádku a leteckú prevádzku

Laserová technológia má obrovské využitie v priemysle, medicíne, zbraňových systémoch a v každodennom živote. Dostupnosť tejto technológie umožňuje v dnešnej dobe komukoľvek vlastniť nejaký typ lasera. Napriek tomu ako vie byť laser nápomocný predstavuje pri nesprávnom používaní riziko ohrozenia zdravia a života. (4)

Pri incidentoch v leteckej prevádzke či už úmyselných alebo neúmyselných sú najviac ohrozené nízko lietajúce helikoptéry. Pre lietadlá je najväčšie riziko v posledných fázach priblíženia ale aj pri vzlete. Najohrozenejšie sú oči a pokožka posádky. (4)

3.1 Pokožka

Je ľahšie zasiahnuteľná z dôvodu omnoho väčšej plochy oproti oku no negatívne následky sú minimálne. Laser dokáže spôsobiť poškodenie kože, pokiaľ je zasiahnutá a vystavená dlhotrvajúcemu pôsobeniu vysokovýkonným laserom používaným v armáde alebo na vedecké účely. Poškodenie kože môže zahŕňať škvrny, vrásky alebo rakovinu kože. Dostať sa k takýmto zariadeniam nie je jednoduché a na druhú stranu ochrana spôsobom zakrytia kože napríklad odevom je jednoduché riešenie. (4)

3.2 Oko

Je najzraniteľnejšou časťou aviatika. Ak je vhodne zasiahnuté, posádka nebude môcť vykonávať svoju činnosť a teda môže dôjsť k ohrozeniu bezpečnosti letu. Má dve kritické oblasti, ktoré sú oblasť sietnice a oblasť mimo sietnicu. Vlnové dĺžky, ktoré môžu poškodiť sietnicu zahŕňajú viditeľné a blízke infračervené žiarenie. Sú to vlnové dĺžky, ktoré sa prenášajú cez optický systém oka (rohovka, sklovec, šošovka) a sú sústredené do sietnice. Toto pásmo zahŕňa celé viditeľné spektrum v rozmedzí 400 a 700 nm, až do blízkeho infračerveného žiarenia o 1 400 nm. (4)

Kritická oblasť mimo sietnicu sa vzťahuje k vlnovým dĺžkam, ktoré sú pohlcované hlavne predným očným tkanivom (šošovka a rohovka) bez podstatného prenosu za sietnicu. Toto pásmo zahŕňa UV a infračervené pásmo nachádzajúce sa za hodnotou 1 400 nm. Tento proces pohltienia žiarenia však môže mať akútne a dlhotrvajúce účinky na samotnú schopnosť pohlcovania ak sú prekročené prirodzené možnosti samoliečby. Typickým príkladom je kryštalická šošovka, ktorá je poslednou ochranou pred UV žiarením. Dá sa

povedať, že pohlcuje všetko zostatkové UV žiarenie, ktoré prechádza cez rohovku a komorovú vodu. Tento proces pohlcovania zapríčiňuje zmeny vo vnútri šošovky, ako je zožltnutie, čo zefektívňuje filtráciu UV a modrého žiarenia. Táto absorpcia môže ale spôsobovať aj zvýšené zakalenie šošovky vo forme šedého zákalu čo spôsobuje komplikácie zraku a videnia. Pri chirurgickom odňatí šošovky sa odstráni aj prirodzená zábrana pred UV žiarením a tkanivo sietnice je vystavené vyšším dávkam UV, ktoré by bolo obvyčajne pohltené. (4)

3.2.1 Rohovka Viacvrstvomá rohovka je priesvitná časť oka, ktorá sa významne podieľa na lámaní (refrakcii) prichádzajúceho svetla do sietnice. Rohovka dokáže pohltiť v podstate 100 percent vlnových dĺžok UV, ktoré sú kratšie než 280 nm. Absorpcia prebytočného UV žiarenia rohovkou môže spôsobiť poškodenie tkaniva rohovky. (4)

3.2.2 Komorová voda

Je to priesvitná tekutina s niekoľkými plávajúcimi bunečnými prvkami. Absorbuje určitú časť UV žiarenia, ktoré prechádza cez rohovku ale nie vo veľkom množstve. Tiež prepúšťa infračervené a viditeľné žiarenia do šošovky v podstate bez zoslabenia. (4)

3.2.3 Šošovka

Kryštalická šošovka je konečným ostriacim prvkom optickej stavby oka. Aj keď sa na lámaní svetla podieľa menej ako rohovka je to jediná časť oka, ktorá má schopnosť dynamicky upravovať zaostrenie na sietnicu. Dokáže to plne automaticky a takmer ihneď. V zásade je to posledná zábrana pred akýmkoľvek UV žiarením, ktoré prechádza cez rohovku a komorovú vodu. Šošovka pohlcuje UV žiarenie nad 300 nm takým spôsobom, že pohltí približne 50% UV žiarenia o hodnote 360 nm. (4)

Schopnosť prednej časti oka pohlcovať UV žiarenie má za následok, že v podstate žiadne UV žiarenie kratšie než 300 nm neprechádza cez sklovec. (4)

3.2.4 Sklovec

Je priesvitná štruktúra zo želatínového a vodnatého materiálu so stavebným tkanivom a bunkami. Aj pri tomto zložení však dokáže vo veľmi malej miere pohlcovať UV žiarenie no viditeľné a blízke infračervené žiarenie prenáša do sietnice bez jeho zoslabenia. (4)

3.2.5 Sietnica

Obsahuje nervové prvky a fotoreceptory (tyčinky a čapíky). Je najohrozenejšou časťou oka pri útoku optickým žiarením. (4)

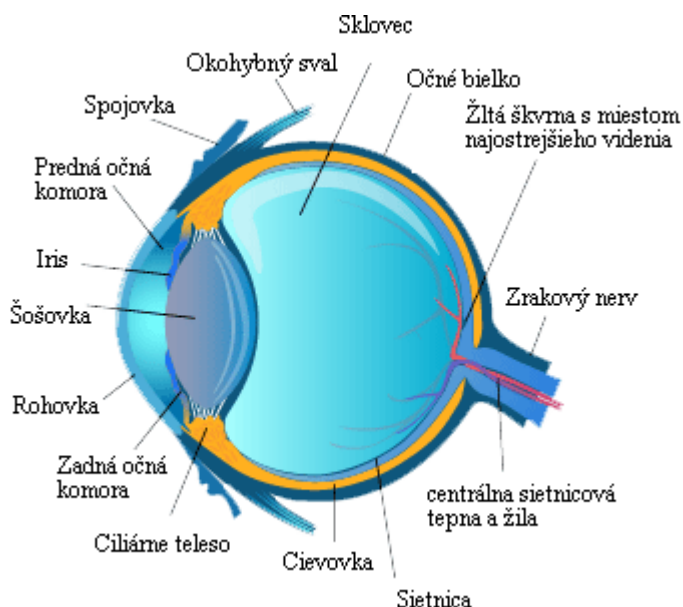
Náchylnosť sietnice na poškodenie sa zväčšuje so znižujúcou sa vlnovou dĺžkou. Tepelné poškodenie sietnice môže nastať ak je UV žiarenie prijímané vo veľkých dávkach. (4)

3.3 Účinky laserového žiarenia zo zdravotného hľadiska

Rozsah zdravotných následkov od ožiarenia laserom závisí na parametroch laseru, vlastnostiach okolia a na zraniteľnosti tkaniva. (4)

Je nutné definovať možný rozsah a trvanie negatívnych účinkov laserového žiarenia ako aj dopad na vykonávanie činnosti posádky čo všetko ovplyvňuje bezpečnosť leteckej prevádzky. Účinky môžu byť od malého rozptýlenia, oslnenia, oslepenia až po dočasnú slepotu spojenú s následnými obrazmi, popálením a vnútorného krvácania sietnice. Ďalšie účinky sú spojené s fyzickými a psychologickými javmi, ktoré zhoršujú vizuálne a kognitívne schopnosti pri vykonávaní nejakej činnosti. (4)

Každý laserový lúč dokáže prinajmenšom zapríčiniť rozptýlenie alebo pôsobiť rušivo na psychiku. Pri kritických častiach letu, lasery s malým výkonom sa môžu stať osudnými pre posádku a pasažierov, bez toho aby spôsobili fyzické poškodenie tkaniva. (4)



Obrázok 9 Stavba ľudského oka (22)

Celková náchylnosť ľudského oka na poškodenie závisí od svietivosti prostredia a úrovne adaptácie oka na svetlo v momente ožiarenia. Počas dňa bude potreba oveľa väčšieho

výkonu lasera aby spôsobil rovnaké nežiaduce účinky ako ožiarenie, oslnenie alebo dočasnú slepotu v nočných podmienkach. Okrem toho závisí aj na operačnom móde laseru, kde pulzný laser bude nebezpečnejší než laser s kontinuálnym lúčom. (4)

Ďalší ovplyvňujúci faktor je použitie zariadení so zberom denného svetla ako sú ďalekohľady, periskopy a teleskopy, ktoré zvyšujú množstvo žiarenia dopadajúceho do oka. (4)

3.3.1 Rozptýlenie

Prirodzenou reakciou človeka na jasné svetlo a hlavne v noci je sa naň pozrieť. Posádka za letu je zvlášť náchylná na zdroje neznámych svetiel z dôvodu, že môže ísť o prekážku na zemi alebo iné lietadlo a bude mať potrebu sa mu vyhnúť. Ak je tento zdroj bezvýznamným svetlom, piloti vrátia svoju pozornosť na činnosť, ktorú vykonávali predtým a stratia pri tom určitý čas. Pri silnom jasnom svetle môžu následné vplyvy na psychiku a zrak zapríčiniť problém s vykonávaním úlohy. (4)

3.3.2 Oslnenie a oslepenie

Tieto termíny sú synonymami, ktoré opisujú dočasné narušenie videnia bez jeho poškodenia. Oslnenie a oslepenie môže byť spôsobené akýmkoľvek zdrojom svetla a je veľmi rušivé ak sa oči plne adaptovali na tmú. Dá sa mu vyhnúť jednoduchým spôsobom kedy človek zmení svoj pohľad na zdroj svetla a tieto efekty zmiznú. (4)

Týmto javom sa dá zabrániť pomocou skiel a kabín, ktoré rozptyľujú dopadajúce svetlo. Akékoľvek okuliare alebo kontaktné šošovky dokážu tiež stlmiť dopadajúce svetlo. Je dokázané že citlivosť na oslnenie a oslepenie sa zvyšuje s narastajúcim vekom. (4)

3.3.3 Dočasné oslepenie

Ide o vizuálny efekt kedy stále vidíme jasné svetlo aj po vypnutí zdroja svetla. Oslepenie pretrváva pokiaľ sa oko zotavuje z vystavenia jasnému zdroju svetla. Intenzita dočasného oslepenia závisí na sile jasnosti svetla a na tom ako je oko prispôbené na tmú v čase keď je zasiahnuté. Ak sa oko nachádza vo svetlejšom prostredí je potreba jasnejšieho svetla na spôsobenie dočasného oslepenia. Môže trvať pár sekúnd alebo až niekoľko minút a predlžuje sa so vzrastajúcim vekom. (4)

3.3.4 Následné obrazy

Nastávajú po osvetlení jasným svetlom. Vyskytujú sa v podobe svetlých, tmavých alebo farebných škvŕn. Tieto škvŕny sú zapríčinené aj dočasným oslepením, no trvajú oveľa dlhší

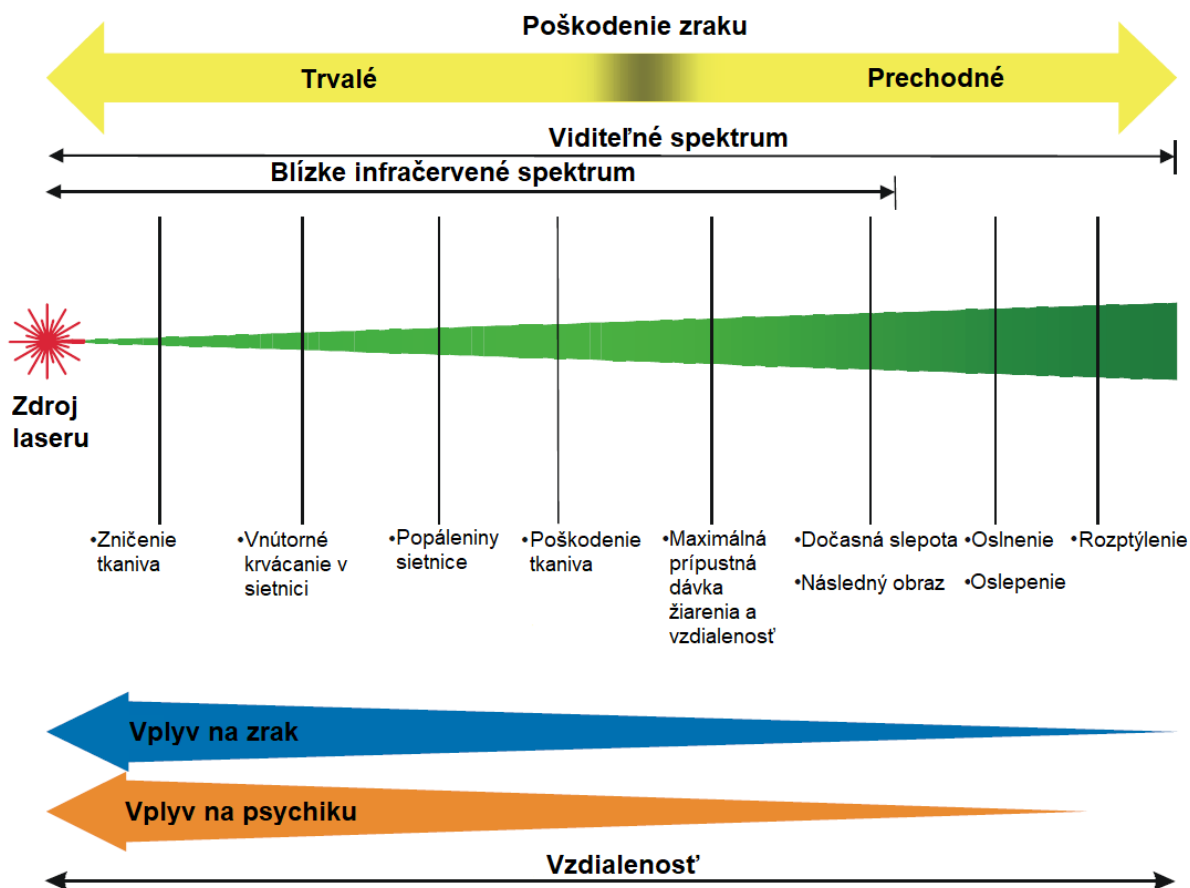
čas a znemožňujú schopnosti na vykonávanie úloh v kabíne. Niekedy dokážu trvať až niekoľko hodín alebo dokonca dní. (4)

Môžu byť spôsobené viditeľným a neviditeľným spektrom žiarenia. (4)

3.3.5 Popáleniny sietnice

Predstavuje závažné poranenie s trvalými následkami. Je spôsobené koncentráciou laserového lúča na sietnicu. Táto koncentrácia sa využíva pri operáciách a liečbe zrakových porúch. (4)

Pri nesprávnom použití je spálenie sietnice jedným z najhorších zranení, ktoré dokáže laserový lúč spôsobiť. Poranenie sietnice bude priamoúmerné veľkosti a jeho miestu. Popáleniny budú väčšie čím bude lúč lasera dopadať na oko priamejšie. Mimo osu oka budú popáleniny menšie. (4)



Obrázok 10 Typy poškodenia zraku (4)

3.3.6 Vnútorne krvácanie sietnice

Nastane ak laserový lúč pretne krvnú cievku niekde v oku. Vlastnosti krvácania budú závisieť od miesta výskytu cievy a na jej vetvení. Vnútorne krvácanie vzťahujúce sa na povrchové cievy nadobudne tvaru ohňa vzdalujúceho sa od miesta krvácania smerom von. Vnútorne krvácanie sietnice v hlbších vrstvách bude mať štruktúru ako bodky alebo škvrny. Krv sa tu môže nahromadiť z ciev, ktoré sú hlbšie v oku. Taktiež je možné porušiť zväzok cievok v takom rozsahu, že dôjde k hlbokému vnútornému krvácaniu. Táto krv sa potom nazbiera na povrchu sietnice alebo prejde do sklovca. Krv, ktorá sa dostane do sklovca tam určitý čas zostane ale so vzrastajúcim vekom postupne odtečie do cievneho systému oka. Vnútorne krvácanie môže mať veľký negatívny dopad na zrak. Zotavenie sa z neho záleží na mieste krvácania a schopnosti pohltiť krv späť. Zvyčajne sa krv zo sklovca sama vytratí v rozmedzí 6 až 12 mesiacov čo ale nie je pravidlom. V mnohých prípadoch bude na odstránenie krvi potreba chirurgického zákroku. (4)

3.3.7 Trhliny na očnej guľi

Laserový lúč dokáže poškodiť tkanivo do takej miery, že nevzniknú popáleniny a ani vnútorne krvácanie ale trhliny. Trhliny môžu byť spôsobené po vystavení vysokovýkonným laserom určitých vlnových dĺžok. (4)

3.3.8 Iné účinky

Po osvetlení jasným svetlom si niektorí ľudia zvyknú šúchať oči čo môže v niektorých prípadoch spôsobiť mechanické poranenie rohovky a spojivky. Nadmerné šúchanie tiež môže spôsobiť krvácanie spojiviek. (4)

3.4 Nebezpečné laserové účinky podľa vlnovej dĺžky

Tabuľka 1 Účinky ultrafialového žiarenia

Vlnová dĺžka(7)	Zrak(7)	Koža(7)	Typy laserov(4)
200 nm – 280 nm	spálenie očnej rohovky	začervenanie kože, rakovina kože, rýchlejšie starnutie kože	plynné: Argón fluoridový
280 nm – 315 nm	spálenie očnej	zvýšená pigmentácia	plynné: Xenón

	rohovky		chloridový
315 nm – 400 nm	beľmo	zatmavenie pigmentácie, popáleniny kože	plynné: Hélium kadmiový

Tabuľka 2 Účinky viditeľného žiarenia

Vlnová dĺžka(7)	Zrak(7)	Koža(7)	Typy laserov(4)
400 nm - 780 nm	šedý zákal, popáleniny sietnice	popáleniny kože	plynné: Argónový, Kryptónový, HeNe

Tabuľka 3 Účinky infračerveného žiarenia

Vlnová dĺžka(7)	Zrak(7)	Koža(7)	Typy laserov(4)
780 nm – 1400 nm	šedý zákal, popáleniny sietnice	popáleniny kože	pevnolátkové: Nd:YAG, Alexandritový
1.4 μm – 3.0 μm	popáleniny rohovky, šedý zákal	popáleniny kože	pevnolátkové: erbiový sklený, erbiový YAG
3.0 μm – 1000 μm	popáleniny rohovky	popáleniny kože	plynné: oxid uhličitý

3.5 Dopad na prevádzku a tréning posádok

3.5.1 Situačné uvedomenie

Popisuje ako jedinec vníma realitu vo svojom prostredí. Každý faktor, ktorý vedie k čiastočnej alebo úplnej strate situačného uvedomenia predstavuje bezpečnostné riziko pre let. Faktor, ktorý bude ovplyvnený laserovým žiarením bude priestorová orientácia. (4)

Strata priestorovej orientácie môže byť rozdelená na tri typy:

- **Typ 1:** jedinec si neuvedomuje stratu priestorovej orientácie

- **Typ 2:** jedinec si uvedomuje stratu priestorovej orientácie a dokáže sa s tým vyrovnat'
- **Typ 3:** jedinec si uvedomuje stratu priestorovej orientácie ale nedokáže sa s tým vyrovnat'

Laserové ožiarenie spôsobuje všetky tri typy ale najčastejšie typ 1 a 2. (4)

3.5.2 Ochranné postupy pred letom

Posádka by si mala vždy v NOTAMoch preveriť možný výskyt a čas činnosti spojenej s laserami. V leteckých mapkách sa takisto môžu vyskytovať informácie o stálych činnostiach laserov (zábavné parky, výskumné zariadenia atď.). (4)

3.5.3 Postupy za letu pred vstupom do priestoru so známou laserovou činnosťou

- Vonkajšie osvetlenie lietadla by malo byť zapnuté aby pozorovatelia na zemi mohli lietadlo identifikovať a určiť jeho polohu.
- Autopilot by mal byť v polohe zapnutý,
- jeden člen posádky by mal sledovať palubné prístroje a minimalizovať tak efekty možného ožiarenia,
- svetlá v pilotnej kabíne lietadla by mali byť rozsvietené. (4)

3.5.4 Postupy za letu počas a po ožiarení kokpitu laserom

Ak je pilot vystavený jasnému svetlu s podozrením, že je to laserový lúč, odporúčajú sa nasledovné kroky:

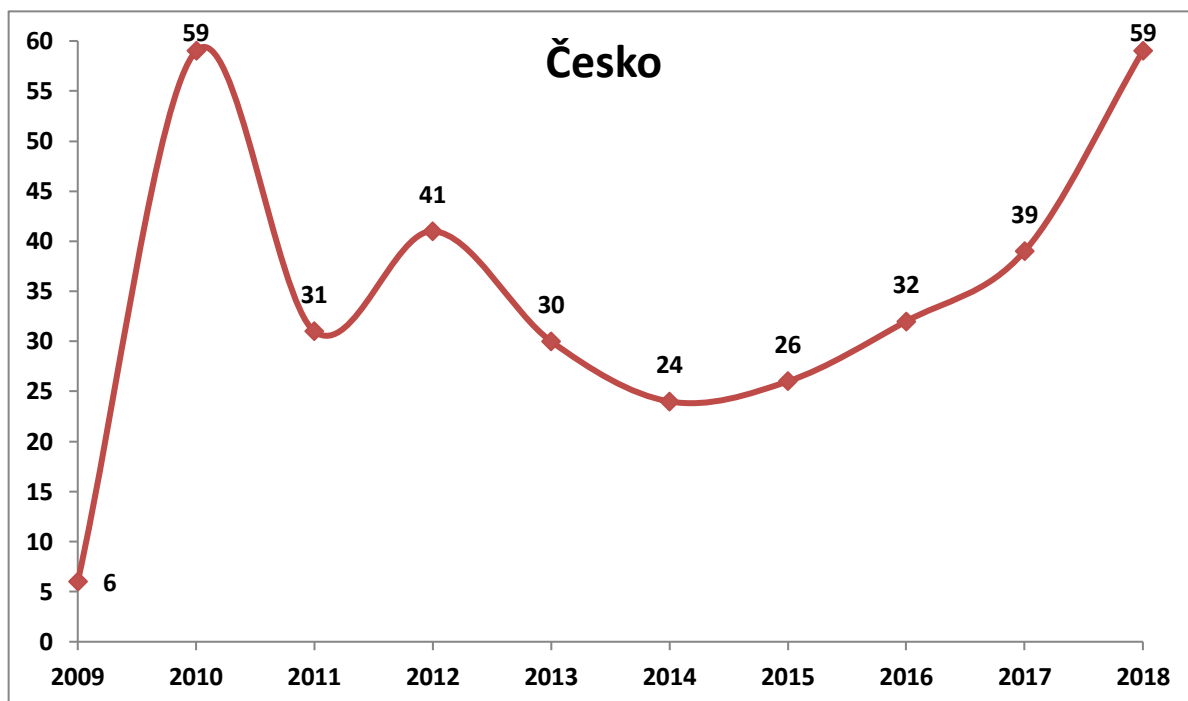
- odvrátiť pohľad od zdroja svetla,
- zakryť si oči pred zdrojom svetla,
- ohlásiť stav svojho zraku ostatným pilotom,
- prenechať riadenie lietadla druhému pilotovi,
- prejsť na let podľa prístrojov,
- zapnúť autopilota.

- premiestniť pomocou riadenia lietadlo do polohy kde pilotná kabína nebude ďalej ožarovaná laserovým lúčom,
- zhodnotiť stav svojho zraku napr. čítaním leteckých mapiek alebo sledovaním palubných prístrojov,
- vyhnúť sa šúchaniu očí,
- oznámiť riadeniu letovej prevádzky ožiarenie laserovým lúčom za letu a ak je potrebné vyhlásiť stav núdze. (4)

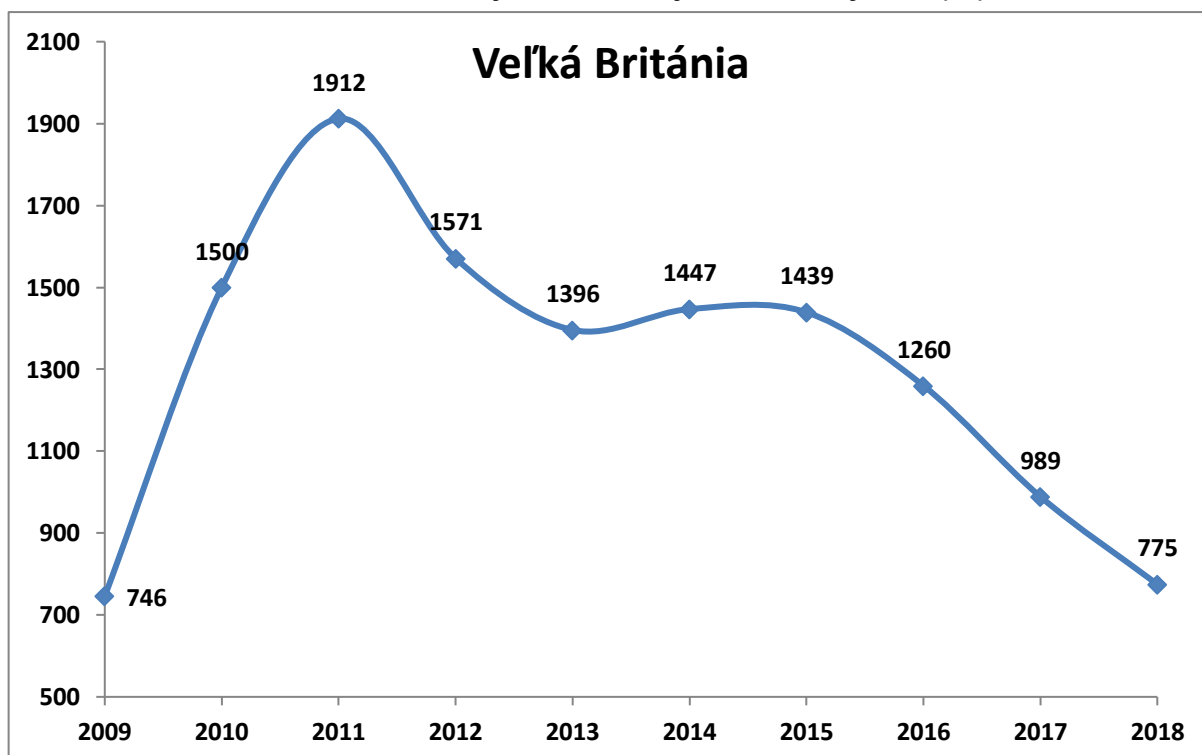
Na záver je dôležité upovedomiť príslušné orgány o podozrení na ožiarenie laserovým lúčom. Po pristátí by mal pilot oznámiť príslušným orgánom takýto incident a poskytnúť k nemu všetky potrebné detaily a vyhľadať čo najskôr zdravotné zariadenie kde podstúpi vyšetrenie zraku. (4)

4. Incidenty a štatistiky vo svete

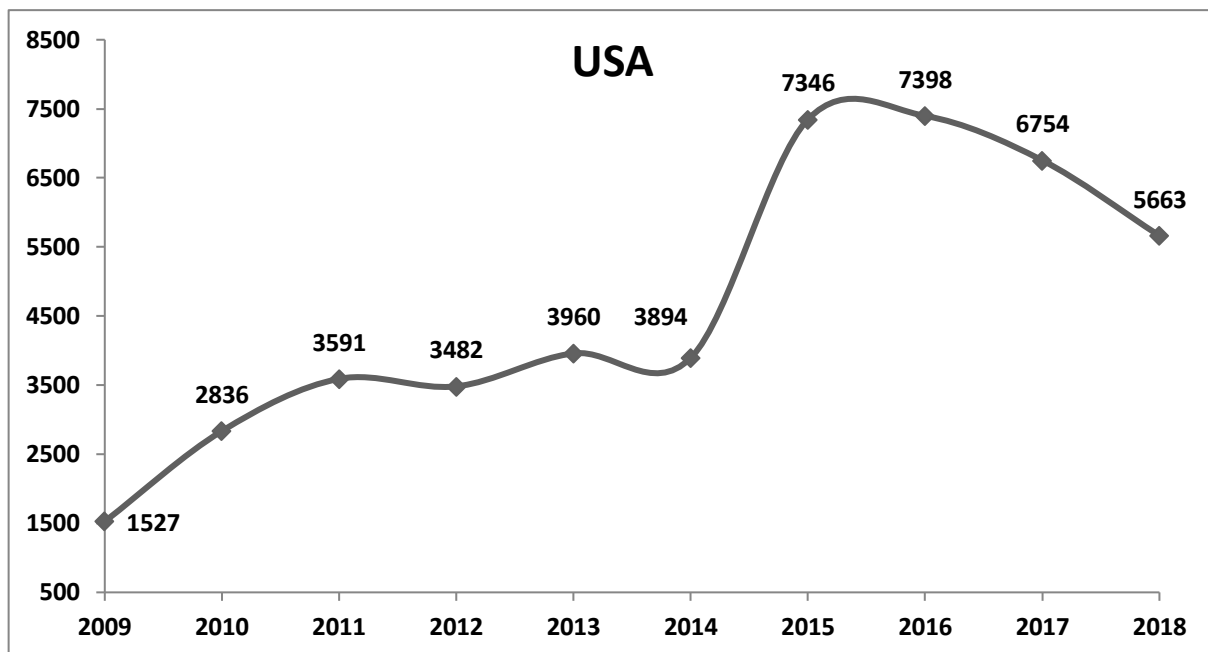
Zatiaľ sa vo svete našťastie nevyskytol ani jeden fatálny incident zapríčinený laserovým ožiarением posádky lietadla.



Graf 1 Počet laserových útokov za jednotlivé roky v ČR (15)



Graf 2 Počet laserových útokov za jednotlivé roky v UK (11)



Graf 3 Počet laserových útokov za jednotlivé roky v USA (7)

Podľa grafov kde na vertikálnej ose je vyznačený počet laserových útokov za posledné roky je zrejmé, že incidenty spojené s laserom sú pomerne časté hlavne v krajinách s veľkou hustotou leteckej prevádzky v ich vzdušných priestoroch. Do štatistik útokov sa započítavajú aj prípady kedy bol letúň alebo vrtuľník zasiahnutý vo výške 8000 stôp. (7)

5. Experimenty

Hlavná myšlienka vykonaných meraní je identifikovať podmienky, pri ktorých predstavujú ľahko dostupné nízkoenergetické lasery najväčšie ohrozenie pre letovú prevádzku. Z toho vyplýva zmerať schopnosť zasiahnuť cieľ v tomto prípade určitý druh senzoru umiestnený vo výške očí pilota v lietadle pri väčších vzdialenostiach a z rôznych polôh.

5.1 Predstava

Na počiatku bolo nutné navrhnuť konkrétne merania a ich priebeh. Začal som s rôznymi myšlienkami, ktoré boli na koniec nasledovné:

Lietadlo by bolo umiestnené v určitej špecifikovanej horizontálnej vzdialenosti. Senzor by bol umiestnený vo výške očí pilota a zaznamenával by dáta pri priamom dopade lúča na lietadlo pri jeho nulovom vybočení. Následne by sa lietadlo otáčalo okolo osi v rozmedzí od 30 až po 90 stupňov. Merania by boli ďalej modifikované použitím umelého osvetlenia kabíny a použitím dioptrických okuliarov čo má predstavovať najjednoduchšie prvky ochrany pre škodlivým laserovým žiarením. Tieto pokusy by sa vykonávali vo vzdialenostiach 1800 m, 1200 m, 600 m a 300 metrov. Zdroj laserového žiarenia by bol umiestnený v priamej horizontálnej vzdialenosti alebo by laser dopadal z výšky nad úrovňou lietadla.

5.2 Potrebné vybavenie

Pre úspešné vykonanie meraní bolo okrem iného potrebné zabezpečiť nasledujúce vybavenie.

Lasery s rôznym sfarbením laserového lúča a rôznymi výstupnými výkonmi. Senzor so schopnosťou zaznamenávať laserové žiarenie, ktoré patrí do viditeľného svetla v elektromagnetickom spektre. A vhodný podstavec pre stabilizovanie a ľahšie zasiahnutie cieľa lasermi.

5.2.1 Lasery

Použitie lasery pri meraní boli zakúpené z internetového obchodu wish.com.

Prvý laser má podľa údajov uvedených pri produkte má jeden z laserov 5mW. Tento slabší laser vydáva stále svetlo červenej farby o vlnovej dĺžke 650 nm. Má tvar podobný peru a rozmery tohto zdroja laseru sú nasledovné dĺžka 15,6 cm a priemer 1,4 cm. Jeho dosah sa

nepredpokladá väčší ako 1000 metrov pri ideálnych podmienkach. Jeho zdrojom energie sú dve 1,5 V AAA batérie. (8)

Priemer lúča je približne 1,5 mm čo spĺňa uvádzanú hodnotu, ktorá by mala byť podľa publikovaných parametrov menej ako 2,5 mm. (8) Vyžiarený výkon tohto laseru na plochu je s týmito vlastnosťami 283 mW/cm² čo presahuje najmenej obmedzujúcu hodnotu publikovanú ICAO 2830-krát. Jeho cena vrátane prepravy bola 99 Kč.



Obrázok 11 Červené laserové ukazovadlo s výkonom 5 mW (8)

Druhý zdroj laserového svetla má publikovaný výkon menej ako 1000 mW, čo v skutočnosti predstavuje výkon o hodnote blízkej 50mW. Vydáva stály zdroj zeleného laserového svetla s vlnovou dĺžkou 532 nm. Je to už väčšie zariadenie ale stále sa príjemne drží v ruke. Rozmery tela sú 16 cm na dĺžku a priemer je 2,4 cm. Zverejnený dosah pri popise tohto produktu je viacej ako 3000 metrov. Je napájaný 3,7 V Lítiovo iónovou batériou. (9)

Priemer jeho lúča je približne 1 mm čo opäť spĺňa udávanú hodnotu výrobcom, ktorá má byť menej ako 2,5 mm. (9) Intenzita žiarenia tohto laseru je 6370 mW/cm². Najmenej obmedzujúcu hodnotu stanovenú ICAO pre priestor okolo letiska presahuje až o 63 700-krát viac. Cena tohto laseru bola vrátane dopravy a batérie 397 Kč.



Obrázok 12 Zelené laserové ukazovadlo s výkonom 50 mW (9)

Aby bolo zasiahanutie cieľa a udržanie laserového svetla na cieľi jednoduchšie oba lasery som prichytil pomocou elektrickej pásky na statív od fotoaparátu.

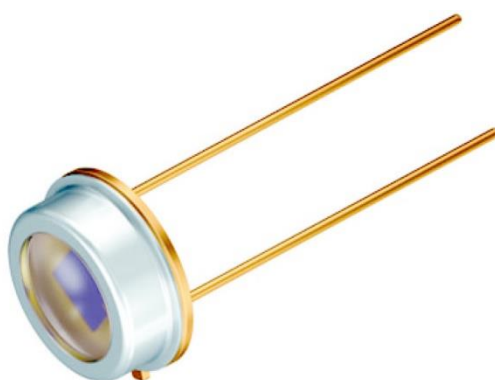


Obrázok 13 Prichytenie laserov k statívu (Autor)

5.2.2 Senzor a zdrojový kód

Pre zabezpečenie zachytenia prítomnosti laserového svetla boli použité fotodiódy zapojené do mini prenosného počítača Arduino UNO.

Technické parametre fotodiód s označením BWR21 od výrobcu OSRAM uvádzajú, že sú schopné zachytiť svetlo s vlnovou dĺžka v rozsahu 350 až 820 nm a dosahujú maximálnu citlivosť pri hodnote 550 nm. Táto vlnová dĺžka odpovedá zelenej farbe svetla. Ďalej deklaruje horizontálnu aj vertikálnu citlivosť v uhle 55° na pravú aj ľavú stranu od osi. Plocha schopná detegovať má tvar štvorca o rozmeroch 2,73 x 2,73 mm. Po osvetlení tejto plochy dióda premieňa svetlo na napätie s maximálnou hodnotou 5V. (10)

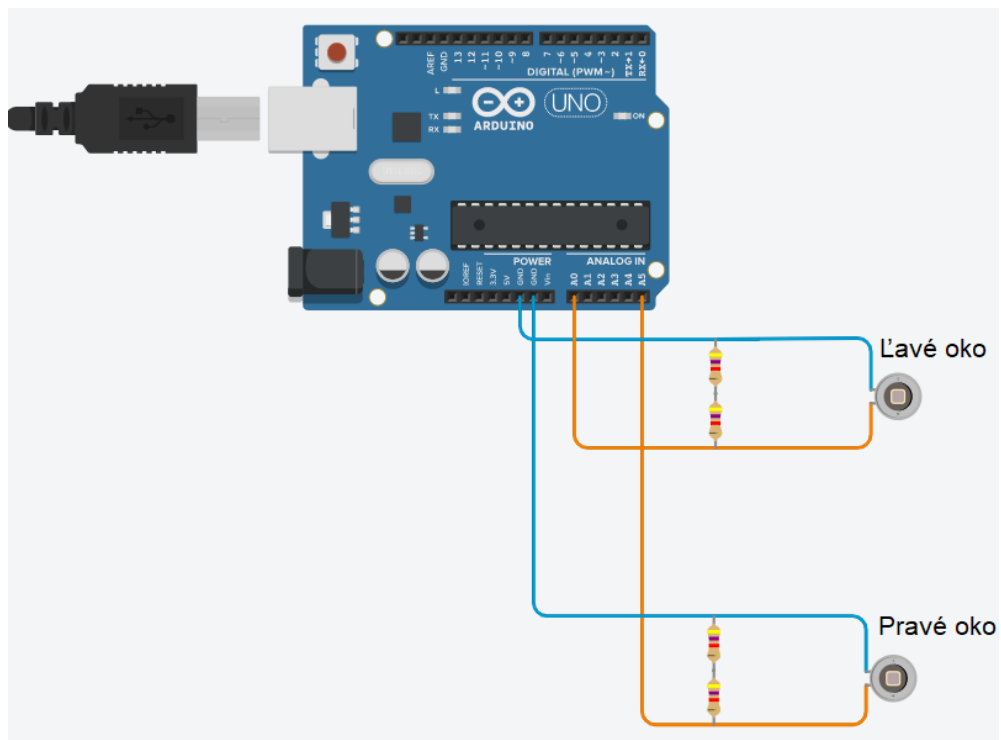


Obrázok 14 Fotodióda BWR21 (10)

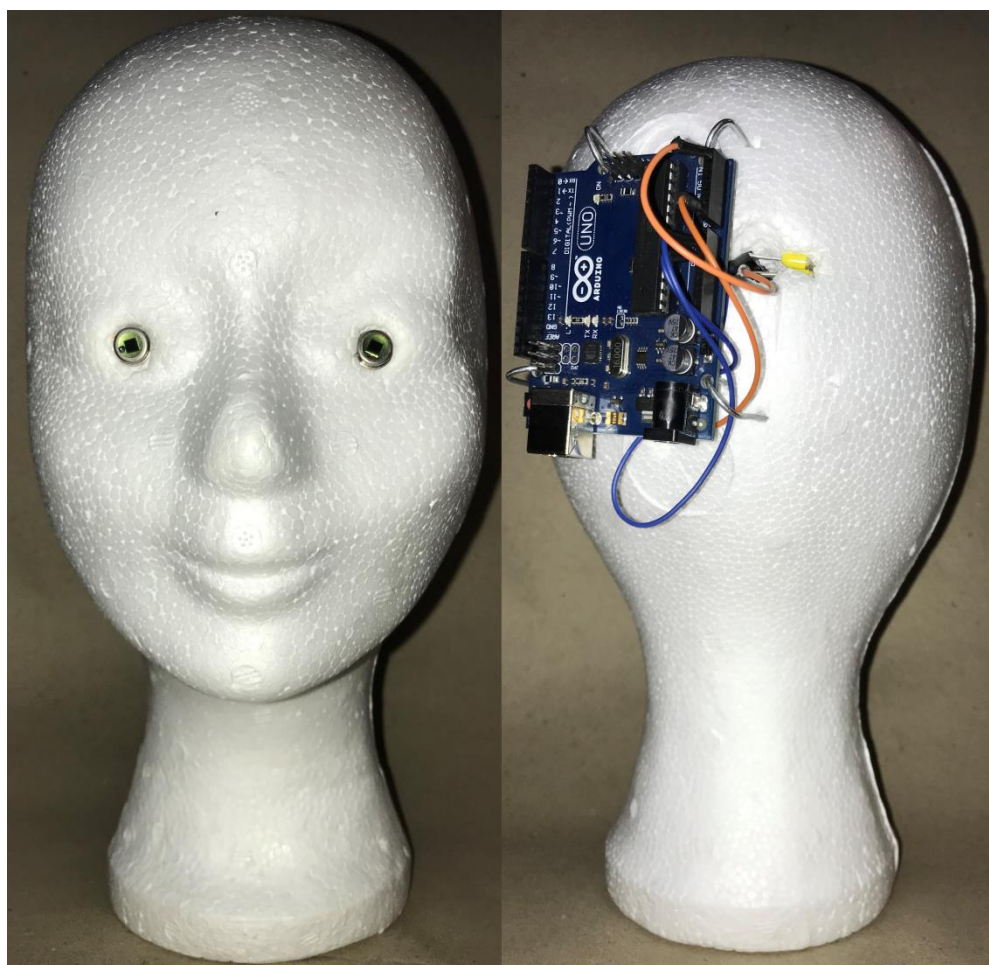
Na obrázku 14 je možné vidieť schému zapojenia fotodiód k minipočítaču Arduino UNO. Ku každej fotodióde sú paralelne pripojené dva rezistory každý s hodnotou 4,7 k Ω . Kladný pól fotodiódy nazývaný aj dióda je pripojený k analógovému vstupu pre dodanie vstupných dát Arduino. Záporný pól alebo katóda je pripojený do zeme. Toto zapojenie je rovnaké pre fotodiódu predstavujúcu pravé a aj ľavé oko s tým rozdielom, že ľavá fotodióda je pripojená do analógového vstupu A0 a pravá do vstupu A5.

Po dodaní potrebných súčiastok mi toto zapojenie vyhotovil s dobrou vôľou a ochotou pán docent Socha z laboratória ľudského faktoru a automatizácie v letectve a následne ho uložil do polyesterovej hlavy.

Ďalej vytvoril zdrojový kód pre spracovanie vstupných údajov z fotodiód a ich výstup. Použil program Arduino IDE pre napísanie kódu a jeho jednoduché nahratie a uloženie do pamäte Arduina UNO. Je napísaný v jazyku C++.



Obrázok 15 Schéma zapojenia fotodiód a Arduina UNO (Autor)



Obrázok 16 Osadenia Arduina s fotodiódami v polyesterovej hlave (Autor)

```

unsigned long myTime;
//Určenie premennej myTime ako dátového typu schopného uložiť väčšie
číselné hodnoty (20)

#define inPin0 0
//Premenovanie záznamov inPin0 ako 0 pre ušetrenie pamäte v Arduino čipe
(20)

#define inPin5 5
//Premenovanie záznamov inPin5 ako 5 pre ušetrenie pamäte v Arduino čipe
(20)
void setup(void) {
//Zadefinovanie časti programu, ktorá sa má vykonávať ihneď po zapnutí
(20)

    Serial.begin(9600);
//Otvorenie seriálového portu pre komunikáciu s rýchlosťou prenosu dát
9600 bitov za sekundu (20)

    Serial.println();
//Funkcia pre vypísanie nového záznamu v čitateľných znakoch a na ďalší
riadok (20)
}

void loop(void) {
//Počiatok funkcie, ktorá sa bude opakovať až po ukončenie
programu/vypnutie Arduina (20)

    myTime = millis();
//Funkcia vracajúca čas v milisekundách od zapnutia Arduina (20)

    int pinRead0 = analogRead(inPin0);
//Vytvorenie celočíselnej premennej pinRead0, do ktorej sa ukladajú
hodnoty z analógového pinu cez funkciu analogRead v bytoch (20)

    int pinRead5 = analogRead(inPin5);
//Vytvorenie celočíselnej premennej pinRead5, do ktorej sa ukladajú
hodnoty z analógového pinu cez funkciu analogRead v bytoch (20)
}

```

Zdrojový kód 1 Prvá časť zdrojového kódu s popisom (Autor)

```

float pVolt0 = pinRead0 / 1024.0 * 10.0;
//Vytvorenie desatinného čísla pVolt0 vydelením bytovej hodnoty
pinRead0 1024 a vynásobená 10 (20)

float pVolt5 = pinRead5 / 1024.0 * 10.0;
//Vytvorenie desatinného čísla pVolt5 vydelením bytovej hodnoty
pinRead0 1024 a vynásobená 10 (20)

Serial.print(myTime);
//Vypísanie záznamu času v milisekundách na obrazovku (20)

Serial.print(',');
//Vypísanie čiarky za časom pre krajší formát textu (20)

Serial.print(pVolt0);
//Vypísanie hodnoty pVolt0 (20)

Serial.print(',');
//Vypísanie čiarky za hodnotou pVolt0 pre krajší formát textu (20)

Serial.print(pVolt5);
//Vypísanie hodnoty pVolt5 (20)

Serial.println();
//Funkcia pre vypísanie nového záznamu v čitateľných znakoch a na
ďalší riadok (20)

delay(100);
//Funkcia pre vypísanie ďalšieho záznamu až po 100 milisekundách (20)

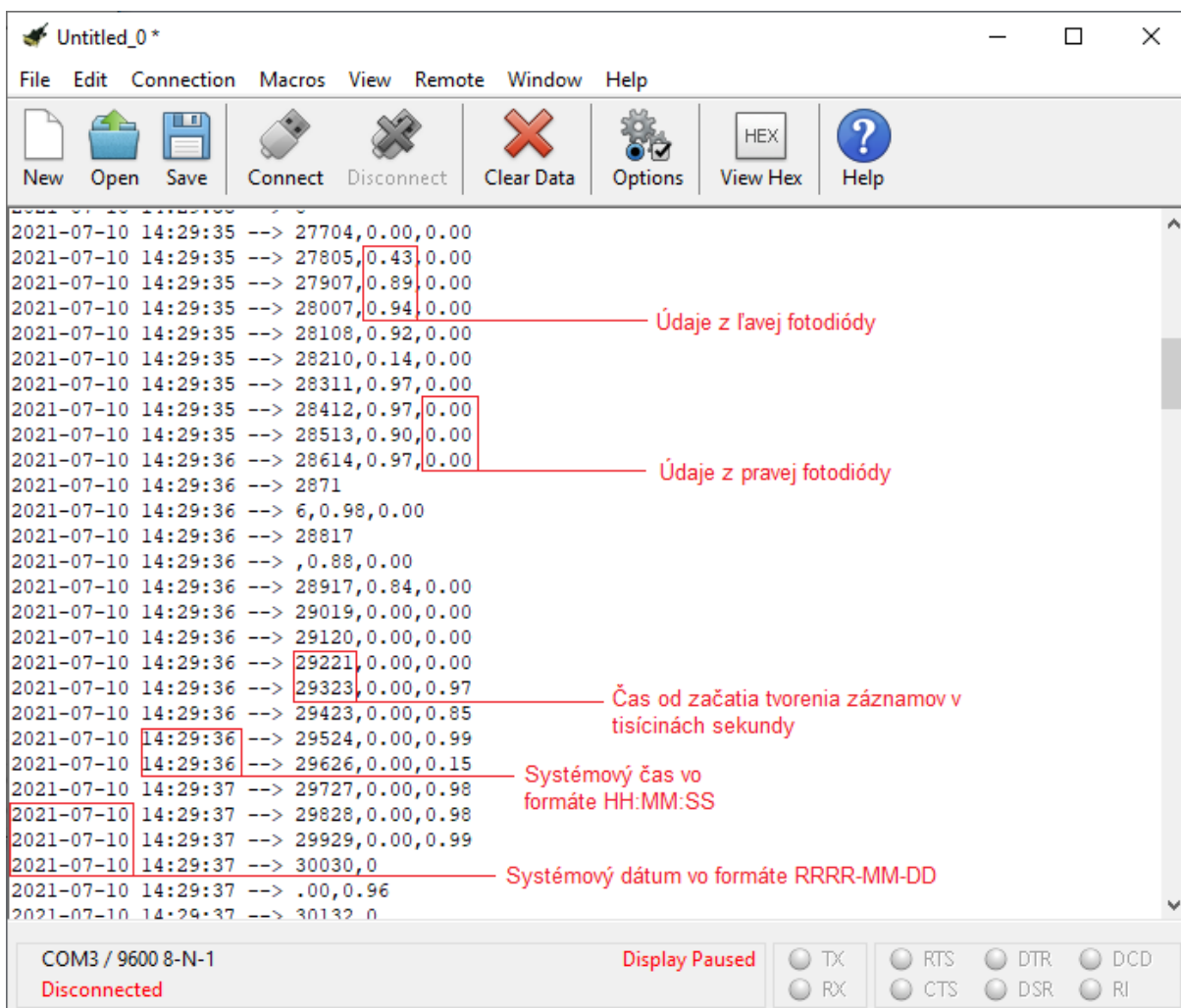
}

```

Zdrojový kód 2 Druhá časť zdrojového kódu s popisom (Autor)

5.2.3 Program pre záznam dát CoolTerm

Program použitý pre zaznamenávanie dát z fotodiód po ožiarení laserom bol vybratý pánom docentom Sochom. Je voľne šíriteľný a je určený pre výmenu dát medzi elektronickými zariadeniami komunikujúcich cez sériové porty. Jeho grafické rozhranie je jednoduché a intuitívne. Na nasledujúcom obrázku je vidieť aké údaje sú zaznamenávané po úspešnom spojení medzi Arduino a mojim osobným počítačom.



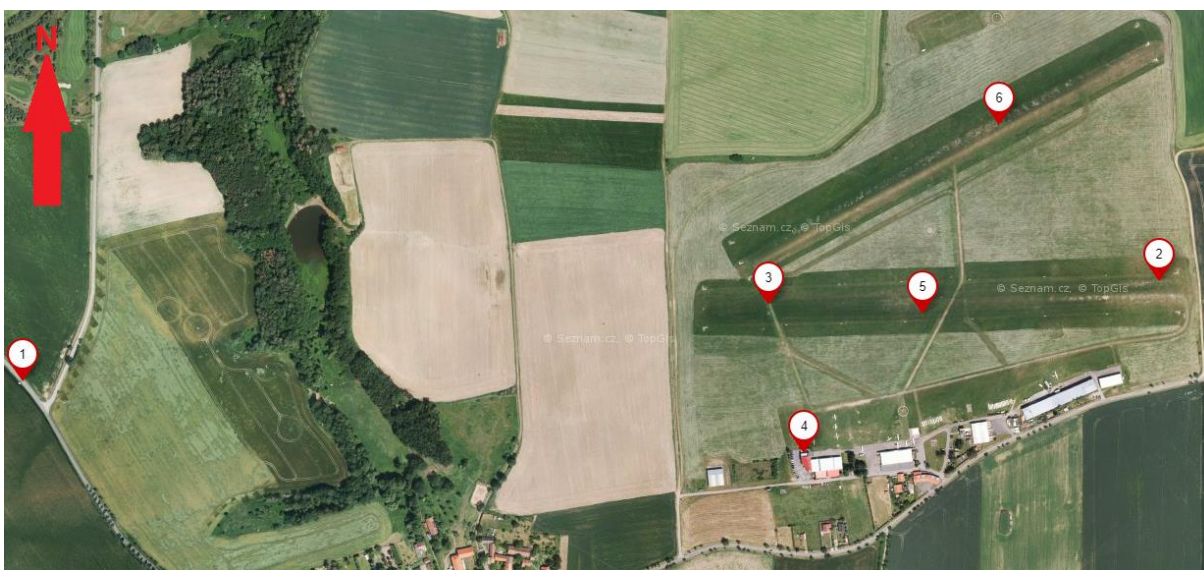
Obrázok 17 Grafické rozhranie program CoolTerm (Autor)

5.3 Vlastné merania

Merania sa uskutočnili na verejnom vnútroštátnom letisku/neverejnom medzinárodnom letisku Benešov nachádzajúceho sa pri obci Bystřice. Prebiehali v noci z 2.7.2021 do skorých ranných hodín soboty 3.7.2021.

Meteorologické podmienky počas meraní neboli náročné. Bolo prevažne zamračené, bezvetrie a teplota sa pohybovala okolo 15°C. Občiansky súmrak začínal o 2200 miestneho času a občianske svitanie nastalo 0415 miestneho času 3.7.2021. (11)

Po preskúmaní terénu a okolia letiska som zvolil štyri miesta pre umiestnenie lietadla a dve miesta z kadiaľ laser bude ožarovať cieľ. Vzďialenosti pre merania boli zmerané na on-line dostupných mapách na stránkach www.mapy.cz. Pre presné umiestnenie lietadla do zvolenej vzdialenosti sa miesto zvolilo na mape a jeho geografické koordináty sa nahráli navigácie lietadla, ktoré sa umiestnilo na vytvorené body.



Obrázok 18 Rozmiestnenie laserov a lietadla počas meraní (21)

Pre merania na vzdialenosť 1800 m a 1200 m boli zdroje laserového žiarenia umiestnené západne od letiska na autobusovú zastávku Bysřice, Tvorřovice, roc. II z kadiaľ je priamy výhľad na letisko. Vhodné miesto pre umiestnenie laserov pre meranie na kratšie vzdialenosti 300 m a 600 m bol zvolený balkón v budove leteckej školy F-Air. Bod 1 na obrázku 15 predstavuje polohu laserov pri meraní na vzdialenosť 1800 a 1200 m a bod 4 na vzdialenosti 300 a 600 m. Bod 6 polohu lietadla pri meraní na 600 m. Bod 2 polohu lietadla pri meraní na 1800 m. Bod 5 pri meraní na vzdialenosť 300 m a bod 3 na 1200 m.

Polyesterová hlava s fotodiódami bola upevnená v lietadle typu Tecnam P2006T v predpokladanej výške očí pilota na operadle sedačky. Nasledujúce hodnoty, ktoré sú v tabuľkách vytvorených z dát zachytených počas merania popisujú ako veľmi bol senzor zasiahnutý od hodnoty 0 až 1. Je to bezrozmerné číslo.



Obrázok 19 Umiestnenie senzoru v lietadle Tecnam P2006T (Autor)

5.3.1 Meranie na vzdialenosť 1800 m

Meranie na túto vzdialenosť prebehlo podľa plánovaného scenáru a lietadlo bolo niekoľkonásobne zasiahnuté zeleným laserom. Avšak rýchlo som prišiel na to, že pokiaľ plochy fotodiód nie sú zasiahnuté cielenie, žiadne dáta zaznamenané nebudú aj pokiaľ by spôsobili podľa môjho hodnotenia určite aspoň odvrátenie od zdroja laserového svetla.

Tabuľka 4 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 1800 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	0	0
Min. hodnota	0,00	0,00
Max. hodnota	0,00	0,00
Priemerná hodnota	žiadna	žiadna
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:02:32

Ako vidieť z tabuľky 4 žiadne zasiahnutia cieľa neboli zaznamenané. Osvietenie fotodiód červeným laserom nebolo ani vykonané s prihliadnutím na jeho oveľa menší výkon. Čas dĺžky meranie je jemne skreslený z dôvodu presunu medzi miestom v bezpečnej vzdialenosti a počítačom, ktorý zbieral dáta umiestneným v lietadle.

5.3.2 Meranie na vzdialenosť 1200 m

Nasledujúca verzia experimentu bola naplánovaná na vzdialenosť 1200 m. Meranie bolo opäť vykonané podľa plánu a prebehlo v poriadku. No ani na túto vzdialenosť neboli zaznamenané žiadne dáta z ožiarenia lietadla a fotodiód. Ožarovanie červeným laserom nebolo vykonané.

Tabuľka 5 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 1200 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	0	0
Min. hodnota	0,00	0,00
Max. hodnota	0,00	0,00
Priemerná hodnota	žiadna	žiadna
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:04:35

V tabuľke číslo 5 opäť jasne vidieť, že neboli zaznamenané žiadne dáta. Čas merania bol dlhší aby som si bol istý, že priestor pre záznam dát bol dostatočne veľký.

5.3.3 Zmena

Po kontrole zachytených dát v reálnom čase som sa rozhodol nepokračovať v meraniach na vzdialenosti 300 m a 600 m. Namiesto toho sme lietadlo presunuli bližšie k budovám letiska, kde som začal s novými meraniami.

5.3.4 Meranie v ose lietadla

Začal som s meraniami v ose lietadla vo vzdialenosti 5 m a pokračoval som do vzdialenosti až 50 m, ktorá bola hraničná z pohľadu schopnosti bez väčšej námahy zasiahnuť cieľ a z pohľadu stále určitého zaznamenávania ožiarenia fotodiód. Do vzdialenosti 50 m sa oddľalovalo po 5m prídavkoch meraných pomocou meracieho pásma pri verzii bez zakrytia senzorov dioptrickými okuliarmi. Na 10 m sa začalo a pokračovalo po 10 m prídavkoch vo verzii merania s osadenými dioptrickými okuliarmi na polyesterovej hlave. Pri každom míľniku merania sa ožiarilo lietadlo so zeleným aj červeným laserom.

V tabuľkách 1 až 10 v prílohe 1 vidieť jasný postupný klesajúci trend schopnosti laserového svetla ožiarit' a zasiahnuť fotodiód čo bolo spôsobené hlavne s narastajúcou vzdialenosťou.

V tabuľkách 1 až 5 v prílohe 1 je zrejмый rozdiel pri maximálnej aj priemernej hodnote medzi zeleným a červeným laserovým svetlom spôsobeného rozdielnymi výkonmi laserových zariadení. Hranica 25 m bola kritická pre červený laser v tejto konfigurácii a na väčšie vzdialenosti už neboli zaznamenané dáta o zasiahnutí fotodiód. Časové rozdiely pri dĺžke merania medzi jednotlivými farbami laserov boli spôsobené hlavne presunom do bezpečnej vzdialenosti od lietadla a malo prestávkou medzi koncom ožarovania zeleným laserom a začatím ožarovania laserom červeným.

5.3.5 Meranie v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi

Verzia ožarovania lietadla s dioptrickými okuliarmi bola vykonaná z dôvodu uvádzaného v podkapitole 3.3.2 kde sa spomína, že obyčajné okuliare, či už dioptrické alebo ochranné, by mohli zmierniť intenzitu dopadajúceho svetla.

Pri porovnaní tabuliek 2 z prílohy 1 a tabuľky 1 nachádzajúcej sa v prílohe 2 z merania na vzdialenosť 10 m je vidno badateľný rozdiel medzi maximálnou aj priemernou nameranou hodnotou oslnenia fotodiódy. Tento rozdiel je zreteľnejší pri zelenom laserovom svetle. No zmenu vidno aj pri ožarovaní červeným laserovým svetlom hlavne pri porovnaní na vzdialenosť 10 m.

5.3.6 Meranie 45° od osy lietadla vpravo v smere z kabíny

Tieto merania prebiehali vo vzdialenosti od 5 do 50 m v prídavkoch po 5 metroch.

Pri týchto meraniach opäť nebolo možné od vzdialenosti 25 m zaznamenať červené laserové svetlo čo bolo spôsobené menším výkonom zariadenia. Pravé oko bolo oveľa častejšie zasahované vid'. Tabuľky 1,3,5 a 9 v prílohe 3 no nebolo to vždy pravidlom. Bolo to spôsobené hlavne vlastným zakrytím ľavej fotodiódy polyesterovou hlavou.

5.3.7 Meranie 45° od osy lietadla vľavo v smere z kabíny

Toto meranie bolo iba na vzdialenosti 5 a 10 m z toho dôvodu, že konštrukcia kabíny, konkrétne rám dverí bol v ceste laserového lúča a nebolo možné zasiahnúť fotodiódy. Na väčšie vzdialenosti.

Tabuľka 6 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 5 m s 45° vybočením vľavo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	0	108
Min. hodnota	0,00	0,01
Max. hodnota	0,00	1,17
Priemerná hodnota	žiadna	0,35
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:32

Tabuľka 7 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 10 m s 45° vybočením vľavo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	0	0
Min. hodnota	0,00	0,00
Max. hodnota	0,00	0,00
Priemerná hodnota	žiadna	žiadna
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:02:07	

5.4 Chyba merania

Pre zistenie chýb a odlišností pri meraniach som sa rozhodol merania zopakovať s inými podmienkami. Fotodiódy som umiestnil voľne do otvoreného priestranstva a vykonal som rovnaké alebo podobné experimenty.

Tieto merania prebehli v noci 17.7.2021 v obci Ľubotín na Slovensku. Občiansky súmrak nastal o 21:15 miestneho času a svitanie nastalo o 04:10 miestneho času. Teplota bola 20°C počas celého merania. Meteorologické podmienky boli prívětivé s jasnou až polojasnou oblohou.

5.4.1 Chyba merania pre meranie v ose lietadla

Meranie prebehlo na vzdialenosti 5 až 50 m po 5 metrových prídavkoch.

Údaje v tabuľkách 1 až 10 z prílohy 4 sa zhodujú alebo približne zhodujú s príslušnými meraniami na každú vzdialenosť. Vyskytujúce sa odchýlky medzi meraním laseru v kabíne lietadla a mimo kabíny sú zapríčinené nasledujúcimi príčinami:

5.4.2 Chyba merania pre meranie v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi

Tabuľka 8 Dáta pre zistenie chyby merania na 10 m v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	157	115	Počet zásahov	30	33
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.16	1.14	Max. hodnota	0.88	0.89
Priemerná hodnota	0.21	0.23	Priemerná hodnota	0.23	0.42
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:11		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:15	

Tabuľka 9 Dáta pre zistenie chyby merania na 30 m v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	57	38	Počet zásahov	29	25
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.04	1.06	Max. hodnota	0.15	0.15
Priemerná hodnota	0.32	0.35	Priemerná hodnota	0.06	0.06
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:36		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:43	

Pri porovnaní s meraním v prílohe 4 tieto dáta neukazujú taký klesajúci trend ako pri porovnaní meraní na letisku Benešov. V týchto dátach vidieť, že červený laser bol zachytený aj na vzdialenosť 30 m.

5.4.3 Chyba merania pre meranie 45° vpravo v smere z kabíny

Tabuľky 1 až 10 nachádzajúce sa v prílohe 5 ukazujú namerané dáta. Po ich porovnaní s meraniami vykonanými na letisku Benešov vidieť, že čísla sa odchyľujú len mierne. Kritická hranica pre zachytenie červeného laseru bola pri tomto meraní 40 m.

5.4.4 Chyba z vplyvu prostredia

Vlastnosti fotodiód popisované v ich technickej dokumentácii sú zaručené výrobcom pri teplote 25°C. (10) Pri meraní na letisku bola teplota vzduchu 15°C čo má určitý vplyv na schopnosti fotodiód. Teplota pri otvorenom meraní bola vyššia a to 20°C čo mohlo spôsobiť lepšiu citlivosť fotodiód.

Ďalší vplyv prostredia, ktorý ovplyvnil merania bola vlhkosť tvoriaca sa na povrchu lietadla vrátane skla kabíny. Snažil som sa túto chybu kompenzovať častým utieraním skla zvnútra ako aj zvonku.

5.4.5 Náhodná chyba merania

Jedným z dôvodov rozdielných hodnôt je chyba v cielení laserové svetla na senzor s fotodiódami. Presne zasiahnuť plochu fotodiód je náročné so statickým upevnením laserov a samozrejme ešte náročnejšie voľnou rukou. Nedostatočné zasiahnutie fotodiód, rýchle prebehnutie cez ich povrch veľmi prispieva k náhodným chybám.

5.4.6 Samotné sklo kabíny lietadla

Jeho hrúbka a sklon mení vlastnosti dopadajúceho laserového žiarenia a spôsobuje nameranie rôznych dát v porovnaní s meraním v otvorenom priestore.

6. Diskusia

Z vykonaných experimentov jednoznačne vidieť nebezpečenstvo laserového žiarenia, ktoré predstavuje pre pilotnú posádku. Preto si myslím, že by bolo vhodné vytvoriť lepšiu informačnú kampaň pre verejnosť, ktorá by oboznámila ľudí s nebezpečenstvom, ktoré vytvárajú pre posádku a cestujúcich prítomných na palube lietadiel. Hlavne ak tieto laserové útoky spôsobujú ľuďa s nevedomosťou aké môžu byť následky ich činnosti. Jednou cestou by bolo upovedomiť predajcov ľahko dostupných laserových zariadení aby informovali svojich zákazníkov o možných následkoch ich nebezpečných činov. Tá druhá by mohla byť vo forme informovania verejnosti pomocou médií ako sú správy v televízií alebo rádiu a tak prinášať správy z ožiarenia lietadiel a následkov s tým spojených.

Český zákon č.407/2010 Sb., podľa ktorého sa vymedzuje výška finančného trestu po narušení priestoru so zákazom laserových zariadení je podľa môjho názoru dostatočný. Ak by sa aj sprísnil a aplikoval trest odňatia slobody, ľudia ktorí tento zákaz porušujú určite o ňom nemajú žiadnu znalosť a teda by trest pred vykonaním takéhoto činu určite nebrali do úvahy. Treba skôr zabezpečiť lepšiu kontrolu priestorov okolo letiska službou ochrany letiska alebo monitorovať letisko infračervenými, termálnymi alebo kamerami s nočným videním.

Postupy ako by sa mala posádka zachovať v prípade ožiarenia laserom uvedené v publikácií ICAO z roku 2003 sú dostačujúce a navrhol by som ich implementovať do prevádzkových príručiek leteckých spoločností a rovnako aj do výcviku pilotov aspoň z teoretického hľadiska.

Ďalej pre ochranu posádky by som navrhol mať na palube ochranné laserové okuliare určené pre zamedzenie žiarenia vlnových dĺžok pohybujúcich sa okolo zelenej farby, ktorých cena sa na internet pohybuje okolo 250 Kč. Mali by ich k dispozícií na letoch do destinácií, ktoré sú známe laserovou aktivitou. Aspoň pokiaľ sa plne nevyvinie technológia ochranného skla kabíny, ktorá aplikuje tekuté kryštály medzi jednotlivé dosky skla, ktoré by reagovali vytvorením nepriehľadného filmu pri ich zasiahnutí laserovým lúčom. (12) Ďalší variant ochrany by bola aplikácia priehľadného ochranného filmu zvnútra skiel kabíny znižujúceho intenzitu laserového svetla. (13)

Väčšiu pozornosť by mohli tejto téme venovať letecké úrady, ktoré tvoria kritériá pre výrobné parametre lietadiel a mohli by teda zaviesť požiadavku pre osadenie nových lietadiel ochranným sklom chrániacim pred laserovým žiarením.

Jedno z ďalších možných riešení by bol úplný zákaz predaja laserových ukazovadiel alebo až nezmyselné navýšenie cien týchto zariadení.

Vykonané experimenty ožarovania lietadla a dáta z nich získané ukazujú očakávané výsledky v daných podmienkach a parametroch. So zväčšujúcou vzdialenosťou klesá schopnosť a narastá vyžadovaná zručnosť zasiahnuť správne objekt záujmu. Oslepenie laserovým žiarením dokáže byť spôsobené z viacerých smerov a pozícií s použitím bežne dostupných laserových zdrojov vo forme laserových ukazovadiel.

Bohužiaľ vykonanie lepších experimentov pri získaní väčšieho a kvalitnejšieho množstva dát bolo negatívne ovplyvnené COVID dobou. Nebyť tejto situácie mal by som prístup k lepším meracím zariadeniam, lepším podmienkam pre vykonanie praktických experimentov a tak by som mohol k tejto téme poskytnúť väčší prínos.

V rámci možností a prostriedkov pre zmeranie a zaznamenanie dát pomocou senzoru tvoreného z dvoch fotodiód s nie veľmi vysokou citlivosťou som s touto prácou spokojný. Namerané dáta pro ožarovaní zeleným laserom ako aj červeným ukazujú rozdiel v ich vyžiarených výkonoch a rozdiel medzi sfarbením laserového lúča. Overenie hypotézy, ktorá uvádza, že nosenie dioptrických okuliarov, ktoré som použil počas experimentu, dokáže zapríčiniť zoslabenie laserového lúča sa podľa môjho názoru ukázala ako pravdivá.

Záver

Narastajúci trend v počte laserových útokov so zvyšovaním leteckej dopravy, expanzie letísk a stavania nových obydľí v blízkosti letísk bude podľa môjho názoru stále pokračovať. Pravdepodobne od leteckej odbornej verejnosti ešte nenastal alebo tu nie je priestor pre vážnejšie riešenie tohto problému.

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zrealizovať a vykonať experimenty pozostávajúce z ožarovania lietadla na zemi s bežne dostupnými zdrojmi laserového žiarenia pri rôznych podmienkach a ukázať aké predstavujú nebezpečenstvo pre zrak a činnosť pilota. Z dát týchto experimentov vytvoriť prehľadné tabuľky a ukázať potrebu ochrany lietadla pred týmito zdrojmi viditeľného elektromagnetického žiarenia.

Súčasťou príloh sú mnou vytvorené a vypracované tabuľky pre lepší prehľad nameraných údajov a ich vzájomné porovnanie.

Táto bakalárska práca by mala slúžiť ako súbor všeobecných informácií spojených s problematikou ožarovania lietadiel laserom a možných spôsobov ochrán. Rovnako môže slúžiť ako návod pre zostrojenie jednoduchého meracieho zariadenia pre zaznamenávanie laserového žiarenia.

Verím, že bude prínosom skupine ľudí, ktorí sa o túto problematiku takisto zaujímajú a majú lepšie finančné prostriedky alebo zázemie pre vykonanie rozsiahlejších experimentov a záznam dát.

Citované diela

1. **Kimura, Wayne D.** *Electromagnetic Waves and Lasers (IOP Concise Physics)*. s.l. : IOP Concise Physics, 2017. ISBN 1681746123.
2. **Hans Joachim Eichler, Jurgen Eichler, Oliver Lux.** *Lasers*. s.l. : Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-99895-4.
3. **Administration Occupational Safety and Health.** OSHA. [Online] 8 5, 1991. [Cited: November 13, 2020.]
https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_id=1705&p_table=DIRECTIVES.
4. **International Civil Aviation Organization.** *Manual on Laser Emitters and Flight Safety*. s.l. : Secretary General, 2003.
5. **Ministerstvo dopravy České republiky.** AIM Letecká informační služba. [Online] November 2009. [Citace: 22. Február 2021.] <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
6. —. Ministerstvo dopravy. [Online] 6. Marec 1997. [Citace: 3. Marec 2021.] <https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Letecka-doprava/Pravni-predpisy/Konsolidovane-zneni-zakona-c-49-1997-Sb?returl=/Dokumenty/Letecka-doprava/Pravni-predpisy>.
7. **Federal Aviation Administration.** [Online] [Dátum: 20. Január 2021.] <https://www.faa.gov/about/initiatives/lasers/laws/>.
8. Cool Laser Pointers. [Online] [Dátum: 8. Júl 2021.] <https://www.coollaserpointers.com/5mw-650nm-red-laser-pointer-pen-shape-black.html>.
9. Cool Laser Pointers. [Online] [Dátum: 8. Júl 2021.] <https://www.coollaserpointers.com/g303-50mw-532nm-green-burning-laser-pointer.html>.
10. **OSRAM Opto Semiconductors GmbH.** Osram. [Online] [Dátum: 9. Júl 2021.] https://www.osram.com/ecat/Metal%20Can%20AE%20TO39%20Ambient%20Light%20Sensor%20BPW%2021/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2219533/.
11. **ŘLP ČR, s.p.** Letecká informačná príručka. [Online] [Dátum: 12. Júl 2021.] https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/g2-7.pdf.

12. LaserPointerSafety. [Online] 02. Apríl 2019. [Dátum: 07. Júl 2021.] https://www.laserpointersafety.com/news/news/other-news_files/ea2b53e47984c612eff0cc0bdd7cd6e1-617.php#on.
13. LaserPointerSafety. [Online] Patrick Murphy. [Dátum: 23. Júl 2021.] <https://www.laserpointersafety.com/windscreen.html>.
14. **Šaldy, Gymnázium F.X.** *Elektromagnetické spektrum*. s.l. : Gymnázium F.X. Šaldy, 2006.
15. **Ministerstvo dopravy, pôšt a telekomunikácií Slovenskej republiky.** Letecká informačná služba Slovenskej Republiky. [Online] December 2006. [Dátum: 10. December 2020.] <https://aim.lps.sk/web/index.php?fn=206&lng=sk&sess=ZGu4ZLcJSGz4CzozhecRCcam0qrqLJd9DJDBDHFB>.
16. **University, Oregon State.** Oregon State University, Enviromental and Health Safety. [Online] [Dátum: 25. Jún 2021.] <https://ehs.oregonstate.edu/laser/training/laser-hazards>.
17. **ŘLP ČR, s.p.** [Online] Marec 2019. [Citace: 19. Január 2021.] http://www.rlp.cz/KnihovnaMaterialu/STRIP/Zpravodaj%20Strip_b%C5%99ezen%202019.pdf.
18. **UK CAA.** Civil Aviation Authority. [Online] [Dátum: 20. December 2020.] <https://www.caa.co.uk/Data-and-analysis/Safety-and-security/Datasets/Laser-incidents/>.
19. Wish. [Online] [Dátum: 28. Jún 2021.] <https://www.wish.com/search/laser%20pointers>.
20. **Arduino.** Arduino. [Online] 2021. [Dátum: 6. Júl 2021.] <https://www.arduino.cc/reference/en/>.
21. **seznam.cz.** mapy.cz. [Online] [Dátum: 7. Júl 2021.] <https://mapy.cz/zakladni?x=14.6422217&y=49.7405999&z=16&l=0&base=ophoto>.
22. **SME.** SME Primár. [Online] 26. Február 2004. [Dátum: 13. Marec 2021.] <https://primar.sme.sk/c/4117013/stavba-a-funkcia-oka.html>.
23. **Řízení letového provozu České republiky, s.p.** [Online] 1. Marec 2019. [Dátum: 7. Marec 2021.] http://www.rlp.cz/KnihovnaMaterialu/STRIP/Zpravodaj%20Strip_b%C5%99ezen%202019.pdf.

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Grafické zobrazenie elektromagnetickej vlny (1)	11
Obrázok 2 Elektromagnetické spektrum (14)	12
Obrázok 3 Stavba pevnolátkového laseru (4)	14
Obrázok 10 Ponuka bežných laserových zariadení na webovej stránke wish.com (19)	17
Obrázok 4 Letová zóna bez laserového žiarenia (15)	19
Obrázok 5 Ochranné letové zóny (15)	19
Obrázok 6 Ochranné zóny so znázorenými úrovňami (intenzitou) laserového žiarenia (15)	20
Obrázok 7 Znázornenie ochranného pásma so zákazom laserových zariadení (5)	21
Obrázok 8 Stavba ľudského oka (22)	24
Obrázok 9 Typy poškodenia zraku (4)	26
Obrázok 11 Červené laserové ukazovadlo s výkonom 5 mW (8)	34
Obrázok 12 Zelené laserové ukazovadlo s výkonom 50 mW (9)	35
Obrázok 13 Prichytenie laserov k statívu (Autor)	35
Obrázok 14 Fotodióda BWR21 (10)	36
Obrázok 15 Schéma zapojenia fotodiód a Arduina UNO (Autor)	37
Obrázok 16 Osadenia Arduina s fotodiódami v polyesterovej hlave (Autor)	37
Obrázok 17 Grafické rozhranie program CoolTerm (Autor)	40
Obrázok 18 Rozmiestnenie laserov a lietadla počas meraní (21)	41
Obrázok 19 Umiestnenie senzoru v lietadle Tecnam P2006T (Autor)	42

Zoznam grafov

Graf 1 Počet laserových útokov za jednotlivé roky v ČR (15)	31
Graf 2 Počet laserových útokov za jednotlivé roky v UK (11)	31
Graf 3 Počet laserových útokov za jednotlivé roky v USA (7)	32

Zoznam zdrojových kódov

Zdrojový kód 1 Prvá časť zdrojového kódu s popisom (Autor)	38
Zdrojový kód 2 Druhá časť zdrojového kódu s popisom (Autor)	39

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Účinky ultrafialového žiarenia	27
Tabuľka 2 Účinky viditeľného žiarenia	28
Tabuľka 3 Účinky infračerveného žiarenia	28
Tabuľka 4 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 1800 m v ose lietadla (Autor)	42
Tabuľka 5 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 1200 m v ose lietadla (Autor)	43
Tabuľka 6 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 5 m s 45° vybočením vľavo (Autor)	44
Tabuľka 7 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 10 m s 45° vybočením vľavo (Autor)	45
Tabuľka 8 Dáta pre zistenie chyby merania na 10 m v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi (Autor)	45
Tabuľka 9 Dáta pre zistenie chyby merania na 30 m v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi (Autor)	46

Zoznam príloh

Príloha 1: Tabuľky s nameranými hodnotami v ose lietadla

Príloha 2: Tabuľky s nameranými hodnotami v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi

Príloha 3: Tabuľky s nameranými hodnotami so 45° vybočením vpravo

Príloha 4: Tabuľky pre zistenie chyby merania v ose lietadla

Príloha 5: Tabuľky pre zistenie chyby merania 45° od osy lietadla vpravo

Príloha 1: Tabuľky s nameranými hodnotami v ose lietadla

Tabuľka 1 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 5 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	47	55	Počet zásahov	34	26
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	1,07	1,03	Max. hodnota	0,51	0,74
Priemerná hodnota	0,41	0,31	Priemerná hodnota	0,16	0,28
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:42		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:38	

Tabuľka 2 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 10 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	55	38	Počet zásahov	10	13
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,02	0,04
Max. hodnota	1,10	1,13	Max. hodnota	0,15	0,29
Priemerná hodnota	0,25	0,23	Priemerná hodnota	0,07	0,13
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:56		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:32	

Tabuľka 3 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 15 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	47	43	Počet zásahov	28	32
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	1,01	0,73	Max. hodnota	0,10	0,09
Priemerná hodnota	0,10	0,06	Priemerná hodnota	0,04	0,04
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:09		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:39	

Tabuľka 4 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 20 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	48	61	Počet zásahov	4	2
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,95	0,95	Max. hodnota	0,04	0,02
Priemerná hodnota	0,16	0,18	Priemerná hodnota	0,03	0,02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:06		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:38	

Tabuľka 5 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 25 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	27	58	Počet zásahov	0	1
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,00	0,01
Max. hodnota	0,24	0,88	Max. hodnota	0,00	0,01
Priemerná hodnota	0,04	0,18	Priemerná hodnota	žiadna	0,01
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:33		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:25	

Tabuľka 6 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 30 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	14	5
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,02	0,02
Priemerná hodnota	0,01	0,01
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:00:49

Tabuľka 7 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 35 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	41	40
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,25	0,37
Priemerná hodnota	0,09	0,08
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:03:09

Tabuľka 8 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 40 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	18	10
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,11	0,04
Priemerná hodnota	0,03	0,02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:37

Tabuľka 9 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 45 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	34	1
Min. hodnota	0,01	0,02
Max. hodnota	0,08	0,02
Priemerná hodnota	0,03	0,02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:07

Tabuľka 10 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 50 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	27	0
Min. hodnota	0,01	0,00
Max. hodnota	0,02	0,00
Priemerná hodnota	0,01	žiadna
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:10

Príloha 2: Tabuľky s nameranými hodnotami v ose lietadla s dioptrickými okuliarmi

Tabuľka 1 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 10 m s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	118	99	Počet zásahov	70	27
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,97	0,22	Max. hodnota	0,13	0,03
Priemerná hodnota	0,05	0,04	Priemerná hodnota	0,05	0,02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:15		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:44	

Tabuľka 2 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 20 m s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	92	0	Počet zásahov	1	0
Min. hodnota	0,01	0,00	Min. hodnota	0,01	0,00
Max. hodnota	0,94	0,00	Max. hodnota	0,01	0,00
Priemerná hodnota	0,12	žiadna	Priemerná hodnota	0,01	žiadna
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:02		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:41	

Tabuľka 3 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 30 m s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	33	71
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,80	0,14
Priemerná hodnota	0,25	0,03
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:02:29	

Tabuľka 4 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 40 m s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	84	15
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,09	0,04
Priemerná hodnota	0,03	0,02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:03:11	

Tabuľka 5 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 50 m s dioptrickými okuliarmi (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	11	10
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,04	0,04
Priemerná hodnota	0,02	0,02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:15	

Príloha 3: Tabuľky s nameranými hodnotami so 45° vybočením vpravo

Tabuľka 1 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 5 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	56	108	Počet zásahov	30	61
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,99	1,12	Max. hodnota	0,46	0,63
Priemerná hodnota	0,13	0,36	Priemerná hodnota	0,21	0,27
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:29	Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:00:31

Tabuľka 2 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 10 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	51	46	Počet zásahov	9	33
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	1,08	0,83	Max. hodnota	0,13	0,37
Priemerná hodnota	0,14	0,18	Priemerná hodnota	0,09	0,09
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:07	Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:00:50

Tabuľka 3 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 15 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	5	51	Počet zásahov	7	42
Min. hodnota	0,02	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,25	1,08	Max. hodnota	0,08	0,21
Priemerná hodnota	0,10	0,13	Priemerná hodnota	0,04	0,07
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:35	Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:00

Tabuľka 4 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 20 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	66	67	Počet zásahov	35	26
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,97	0,98	Max. hodnota	0,03	0,06
Priemerná hodnota	0,36	0,34	Priemerná hodnota	0,02	0,03
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:16	Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:00:30

Tabuľka 5 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 25 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	29	124	Počet zásahov	2	7
Min. hodnota	0,01	0,01	Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,83	0,96	Max. hodnota	0,01	0,02
Priemerná hodnota	0,14	0,14	Priemerná hodnota	0,01	0,01
Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:01:28	Dĺžka merania (hh:mm:ss)		0:00:41

Tabuľka 6 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 30 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	136	140
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,92	0,84
Priemerná hodnota	0,09	0,09
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:36	

Tabuľka 7 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 35 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	246	168
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,84	0,80
Priemerná hodnota	0,09	0,04
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:06	

Tabuľka 8 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 40 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	134	90
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,54	0,59
Priemerná hodnota	0,12	0,08
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:16	

Tabuľka 9 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 45 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	63	106
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,24	0,43
Priemerná hodnota	0,07	0,06
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:14	

Tabuľka 10 Spracované dáta z merania na vzdialenosť 50 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	178	150
Min. hodnota	0,01	0,01
Max. hodnota	0,83	0,56
Priemerná hodnota	0,06	0,05
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:57	

Príloha 4: Tabuľky pre zistenie chyby merania v ose lietadla

Tabuľka 1 Dáta pre zistenie chyby merania na 5 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	36	36	Počet zásahov	10	11
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.02
Max. hodnota	1.20	1.19	Max. hodnota	0.99	0.95
Priemerná hodnota	0.44	0.26	Priemerná hodnota	0.30	0.39
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:59		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:08	

Tabuľka 2 Dáta pre zistenie chyby merania na 10 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	21	16	Počet zásahov	10	5
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.02	0.11
Max. hodnota	1.09	0.16	Max. hodnota	0.84	0.44
Priemerná hodnota	0.20	0.05	Priemerná hodnota	0.25	0.22
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:05		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:13	

Tabuľka 3 Dáta pre zistenie chyby merania na 15 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	18	24	Počet zásahov	17	8
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.75	1.04	Max. hodnota	0.53	0.52
Priemerná hodnota	0.15	0.21	Priemerná hodnota	0.13	0.12
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:53		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:57	

Tabuľka 4 Dáta pre zistenie chyby merania na 20 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	20	20	Počet zásahov	8	9
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.07	0.01
Max. hodnota	1.07	1.03	Max. hodnota	0.29	0.15
Priemerná hodnota	0.41	0.21	Priemerná hodnota	0.18	0.07
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:54		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:36	

Tabuľka 5 Dáta pre zistenie chyby merania na 25 m v ose lietadla (Autor)

Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	11	12
Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.10	0.07
Priemerná hodnota	0.05	0.03
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:03	

Tabuľka 6 Dáta pre zistenie chyby merania na 30 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	7	6	Počet zásahov	3	5
Min. hodnota	0.02	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.86	0.97	Max. hodnota	0.05	0.04
Priemerná hodnota	0.19	0.21	Priemerná hodnota	0.04	0.02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:09		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:10	

Tabuľka 7 Dáta pre zistenie chyby merania na 35 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	15	12	Počet zásahov	5	30
Min. hodnota	0.01	0.02	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.04	1.06	Max. hodnota	0.05	0.11
Priemerná hodnota	0.44	0.61	Priemerná hodnota	0.04	0.04
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:45		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:02:45	

Tabuľka 8 Dáta pre zistenie chyby merania na 40 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	25	46	Počet zásahov	21	28
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.96	1.04	Max. hodnota	0.09	0.07
Priemerná hodnota	0.25	0.37	Priemerná hodnota	0.03	0.03
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:43		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:48	

Tabuľka 9 Dáta pre zistenie chyby merania na 45 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	25	33	Počet zásahov	11	11
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.03	1.03	Max. hodnota	0.03	0.03
Priemerná hodnota	0.49	0.38	Priemerná hodnota	0.02	0.02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:03		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:02	

Tabuľka 10 Dáta pre zistenie chyby merania na 50 m v ose lietadla (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	25	21	Počet zásahov	19	12
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.99	1.02	Max. hodnota	0.03	0.02
Priemerná hodnota	0.47	0.42	Priemerná hodnota	0.02	0.02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:58		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:39	

Príloha 5: Tabuľky pre zistenie chyby merania 45° od osy lietadla vpravo

Tabuľka 1 Dáta pre zistenie chyby merania na 5 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	8	61	Počet zásahov	13	19
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.06	0.01
Max. hodnota	0.93	1.17	Max. hodnota	0.93	0.91
Priemerná hodnota	0.15	0.33	Priemerná hodnota	0.49	0.32
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:42		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:40	

Tabuľka 2 Dáta pre zistenie chyby merania na 10 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	9	53	Počet zásahov	4	13
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.39	1.11	Max. hodnota	0.24	0.30
Priemerná hodnota	0.10	0.29	Priemerná hodnota	0.12	0.11
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:45		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:53	

Tabuľka 3 Dáta pre zistenie chyby merania na 15 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	14	37	Počet zásahov	4	20
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.02
Max. hodnota	1.05	1.09	Max. hodnota	0.35	0.22
Priemerná hodnota	0.41	0.28	Priemerná hodnota	0.12	0.09
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:58		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:59	

Tabuľka 4 Dáta pre zistenie chyby merania na 20 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	12	34	Počet zásahov	7	28
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.01	1.07	Max. hodnota	0.18	0.19
Priemerná hodnota	0.33	0.30	Priemerná hodnota	0.08	0.07
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:00:54		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:14	

Tabuľka 5 Dáta pre zistenie chyby merania na 25 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	5	25	Počet zásahov	5	23
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.82	1.02	Max. hodnota	0.06	0.08
Priemerná hodnota	0.40	0.43	Priemerná hodnota	0.03	0.04
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:05		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:12	

Tabuľka 6 Dáta pre zistenie chyby merania na 30 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	4	17	Počet zásahov	7	11
Min. hodnota	0.09	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.97	0.98	Max. hodnota	0.04	0.06
Priemerná hodnota	0.52	0.37	Priemerná hodnota	0.02	0.03
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:07		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:26	

Tabuľka 7 Dáta pre zistenie chyby merania na 35 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	31	46	Počet zásahov	4	18
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.01	1.04	Max. hodnota	0.03	0.04
Priemerná hodnota	0.55	0.37	Priemerná hodnota	0.02	0.02
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:36		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:37	

Tabuľka 8 Dáta pre zistenie chyby merania na 40 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko	Červený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	21	40	Počet zásahov	7	6
Min. hodnota	0.01	0.01	Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	1.00	1.00	Max. hodnota	0.02	0.02
Priemerná hodnota	0.52	0.39	Priemerná hodnota	0.01	0.01
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:33		Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:28	

Tabuľka 9 Dáta pre zistenie chyby merania na 45 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	13	39
Min. hodnota	0.02	0.01
Max. hodnota	0.99	0.99
Priemerná hodnota	0.45	0.32
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:45	

Tabuľka 10 Dáta pre zistenie chyby merania na 50 m s 45° vybočením vpravo (Autor)

Zelený laser	Ľavé oko	Pravé oko
Počet zásahov	18	27
Min. hodnota	0.01	0.01
Max. hodnota	0.91	0.97
Priemerná hodnota	0.39	0.41
Dĺžka merania (hh:mm:ss)	0:01:46	