

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta



Přírodovědecká
fakulta

Univerzita Palackého
v Olomouci

**Parametry MKZJO a jejich vliv na detekční schopnost
noktovizoru MUM 14**

Diplomová práce

Vypracovala: Bc. Nikol Coufalová

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Datum odevzdání: 03. 05. 2017

Olomouc 2017

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Bc. Nikol Coufalová
Instituce:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Pracoviště:	Katedra optiky
Studijní obor:	Digitální a přístrojová optika
Název práce:	Parametry MKZJO a jejich vliv na detekční schopnost noktovizoru MUM 14
Vedoucí práce:	Mgr. Filip Chlup
Počet stran:	64

Klíčová slova: Noktovizor, mikrokanálový zesilovač jasu obrazu (MKZJO), FOM, dosah, Johnsonovo kritérium.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je objasnit základní parametry noktovizorů a mikrokanálového zesilovače jasu obrazu. V teoretické části jsou představeny měřené přístroje a popsány základní parametry, měřicí sestavy a postupy jednotlivých měření. Praktická část je rozdělena na dva oddíly. V prvním oddílu je uvedeno vlastní měření základních parametrů ve dvou optických laboratořích. Ve druhém oddílu je zdokumentované a vyhodnocené měření v terénu. Závěrem jsou srovnány výsledky z jednotlivých měření a vyhodnocení testovaných kusů.

Bibliographical identification

Autor's first name and surname:	Bc. Nikol Coufalová
School:	Palacky University in Olomouc Faculty of Science 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc
Department:	Department of optics
Program:	Digital and instrumental optics
Title of thesis:	Parameters of Image Intensifier tubes and their effects to detection of night vision systems MUM 14
Thesis consultant:	Mgr. Filip Chlup
Number of pages:	64
Keywords:	Night vision systems, image intensifier tube (IIT), FOM, detection, Johnson's criteria,

Abstract: The aim of this Master thesis is to describe basic parameters of night vision systems and IIT. The theoretical part presents the available measuring instruments, testing night vision systems and basic parameters. The practical part is divided into two parts. The first part describes the realisation of measurement in two laboratories. The second part consists of documentation of field measurements. The final part compares the results obtained from the laboratory measurements and the field measurements and evaluates each measurement.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem práci napsala samostatně s použitím uvedené literatury a za pomoci vedoucího této diplomové práce Mgr. Filipa Chlupa.

V Olomouci dne 03. 05. 2017

.....

Ráda bych poděkovala Mgr. Filipu Chlupovi za odborné rady při měření a zapůjčení odborných materiálů. Dále chci poděkovat za velkou pomoc RNDr. Ivaně Grebeňové, při testování MKZJO na nové měřicí lavici společnosti Meopta – optika s.r.o. a společnosti Pramacom – HT, spol. s.r.o. za poskytnutí laboratoře. V neposlední řadě své měřicí skupině, která mi ochotně asistovala při měření v terénu – Vojtěchovi Zálešákovi a studentům 3. ročníku oboru Digitální a přístrojové optiky, katedra optiky, PŘF.

Obsah

Úvod	8
2. Technologie přístrojů nočního vidění	9
3. Generace noktovizorů a historický vývoj	10
4. Funkce mikrokanálového zesilovače jasu obrazu	12
4.1. Fotokatoda	12
4.2. Mikrokanálová destička (MCP – microchannel plate).....	14
4.3. Stínítko	15
5. Noktovizor MUM 14.....	16
5.1. Instalace MKZJO do těla noktovizoru	17
6. Testované MKZJO	18
7. Základní parametry	19
7.1. Středové rozlišení.....	20
7.2. SNR (Signal to Noise Ratio).....	20
7.3. FOM – figure of merit	21
7.4. Jasový zisk	21
7.5. EBI (Equivalent background illumination)	22
7.6. MTF (Modulation transfer function).....	23
7.7. MRC (Minimal resolvable contrast)	23
7.8. Výpočet dosahu MKZJO	24
8. Měřicí přístroje.....	25
8.1. Měřicí lavice	25
8.2. NVT stanice	26
8.2.1. Osvětlovací soustava	26
8.2.2. Kolimátor a karusel s testovými obrazy	27
8.2.3. Základní deska	27
8.2.4. NV kamera.....	28
8.2.5. Spektrální kalibrace.....	28
9. Měření.....	29
9.1. Nečistoty.....	30
9.2. Velikost zorného pole.....	31
9.3. Zvětšení	32
9.4. Jasový zisk	33

9.5.	Středové rozlišení a MRC křivka	34
9.6.	SNR	39
9.6.1.	SNR změřené na NVT stanici	40
9.6.2.	SNR měřené na měřicí lavici	40
9.6.3.	Porovnání výsledků hodnot SNR	41
9.7.	MTF	46
9.7.1.	MTF měřena na NVT stanici	46
9.7.2.	MTF měřena na měřicí lavici	47
9.8.	EBI	48
9.9.	Halo efekt	48
10.	Měření v terénu	50
10.1.	Měření č. 1	51
10.2.	Měření č. 2	54
11.	Závěr	56
	Citovaná literatura	58
	Seznam obrázků	60
	Seznam grafů	62
	Seznam tabulek	63

Úvod

V poslední době dochází k velkému rozšíření aplikací přístrojů nočního vidění. Jejich použití samozřejmě odpovídá jejich vlastnostem a parametrům. Termokamery se využívají k hlídání průmyslových objektů, v záchranných službách, ale i ke kontrole elektronických součástek. Noktovizory na druhou stranu našly využití v armádě, u policejních sborů a v myslivosti. Každý výrobce dodává ke svým systémům protokol o změřených parametrech odpovídajících kvalitě daného přístroje. Pro laickou společnost, která není obeznámená s principy zobrazování jednotlivých systémů, mohou být tato data velmi matoucí a nejasná. Tedy, co konkrétně každý parametr znamená a jaký má význam pro danou aplikaci?

Cílem této diplomové práce je změřit a objasnit základní parametry noktovizoru MUM 14 s různými typy mikrokanálových zesilovačů jasu obrazu a porovnat jejich vlastnosti při pozorování v terénu. Pro určení základních parametrů a jejich porovnání bylo k dispozici pět shodných těl (kitů), v každém byl mikrokanálový zesilovač jasu obrazu (dále jen MKZJO) o různých parametrech. V následujících kapitolách bude čtenář postupně seznámen se základním principem, postupem měření a jednotlivými parametry.

V úvodu je přehled technologií přístrojů nočního vidění a základní historické rozdělení generací mikrokanálového zesilovače jasu obrazu. V teoretické části jsou objasněny základní parametry noktovizoru a mikrokanálového zesilovače jasu obrazu. Dále jsou popsány měřicí sestavy, na kterých probíhalo testování a postupy měření jednotlivých parametrů. Poslední praktická část je rozdělena na měření v laboratoři a na měření v terénu. Měření v laboratoři probíhalo na dvou pracovištích. V první laboratoři společnosti Pramacom – HT, spol. s.r.o. bylo možné na testovací stanici pro noční vidění měřit celý přístroj MUM 14 s vloženým mikrokanálovým zesilovačem jasu obrazu daného typu. V druhé laboratoři společnosti Meopta – optika, s.r.o. bylo možné měřit základní parametry samotného mikrokanálového zesilovače jasu obrazu na měřicí lavici, která je stále v testovací fázi. Měření v terénu umožní subjektivní hodnocení noktovizoru MUM 14 s daným typem mikrokanálového zesilovače jasu obrazu a u každého je určen dosah dle Johnsonova kritéria. V závěru jsou porovnány všechny naměřené výsledky s hodnotami dodanými od výrobce mikrokanálových zesilovačů jasu obrazu a s měřením v terénu.

2. Technologie přístrojů nočního vidění

U přístrojů nočního vidění je možné rozlišovat dva základní principy zobrazování. První princip je založen na snímání scény v infračervené oblasti s využitím termokamer. V infračervené oblasti se uplatňují termokamery, které snímají oblast ve vlnových délkách 1 μm až 13 μm .

Při pozorování noční scény jsou využívány termokamery pro oblast LWIR, které snímají oblast ve vlnových délkách 7 - 13 μm . Nejrozšířenějším detektorem je matice mikrobolometrů z amorfního křemíku (a - Si), který v závislosti na změně teploty mění el. odpor. Změna el. odporu je měřena a digitálně zpracována do výsledného obrazu. Výsledný obraz je tedy záznam teplotního rozložení scény. Tyto přístroje mají velké využití v místech, kde není zbytkové světlo a kde je potřeba zobrazit teplotní informaci o pozorovaném objektu. V záchranných službách termokamery využívají hasiči nebo vojáci při nasazení v terénu, v průmyslových oblastech jsou využívány ke kontrole elektronických součástek, bezdotykovému měření teploty nebo hlídání průmyslových objektů.

Druhý princip je založen na zesílení zbytkového světla. Optoelektronické systémy využívající zesílení jasu scény se nazývají noktovizory. Tyto přístroje tedy vždy potřebují alespoň svit hvězd nebo externí přísvit, který jim osvětlí scénu. Detektorem takových přístrojů je mikrokanálový zesilovač jasu obrazu (MKZJO), který zajistí až desetitisíci násobné zesílení jasu pozorované scény. Spektrální citlivost noktovizorů je od viditelné oblasti vlnových délek až do blízké infračervené (380 nm – 1000 nm). Tyto přístroje jsou využívány ve vojenství, myslivosti a v některých luxusních automobilech k detekci chodců na vozovce. Dnes je možné u některých přístrojů zapnout externí infračervený přísvit scény, který není okem viditelný, ale zasahuje do spektrální citlivosti noktovizoru. S tímto přísvitem je možné se pohybovat i v oblastech bez zbytkového světla. Na obrázku 1 je zaznamenána scéna termokamerou pro oblast LWIR ve srovnání s obrázkem 2, kde je scéna zaznamenána noktovizorem MUM 14.



Obrázek 1: Záznam obrazu z termokamery v oblasti LWIR



Obrázek 2: Záznam obrazu z noktovizoru

3. Generace noktovizorů a historický vývoj

Noktovizory se dělí do čtyř kategorií na základě historického vývoje a kvality mikrokanálových zesilovačů jasu obrazu.

0. generace

Během 2. světové války se začalo přehlížet k technickému vybavení jednotlivých vojenských jednotek a byly vyvinuty první optoelektronické přístroje, které využívaly převádění infračerveného záření do viditelné oblasti spektra. Jako zesilovače jasu, v tomto případě spíše převaděče, se využívalo elektro-optického převaděče (EOP). Katoda EOP je tvořena sloučením oxidů stříbra a cesia, chemický vzorec materiálu fotokatody je AgOCs. Taková fotokatoda má největší spektrální citlivost v modro-zelené oblasti spektra. Velkou nevýhodou při zobrazování je soudkovité zkreslení výsledného obrazu. K formování a zesílení elektronů je využíváno elektrostatické pole.

1. generace

V 50. letech 20. století se objevily zesilovače jasu obrazu 1. generace. Na rozdíl od 0. generace mají širší pásmo spektrální citlivosti, ovšem stále se projevuje velké zkreslení obrazu. V aplikacích, kde bylo třeba vysokého zesílení jasu, se konstruovaly noktovizory, do kterých se vkládalo několik zesilovačů jasu obrazu za sebe. K formování a zesílení elektronů je opět využíváno elektrostatické pole.

2. generace

V 80. letech 20. století byl elektro-optický převaděč nahrazen mikrokanálovým zesilovačem jasu obrazu (MKZJO). 2. generace se vyznačovala rozšířením spektrální citlivosti do červené oblasti a vykorigovaným zkreslením obrazu. MKZJO mají vysoký výkon i při velmi nízkých úrovních jasu.

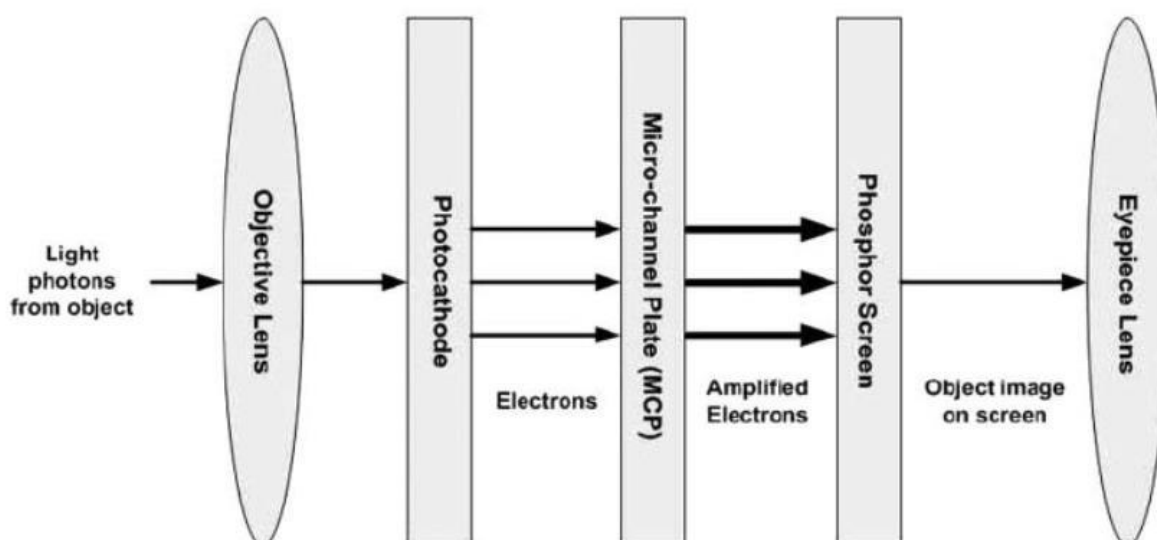
3. generace

U 3. generace mikrokanálových zesilovačů jasu obrazu je materiálem fotokatody galium arsen – GaAs, který zvýšil spektrální citlivost až do blízké infračervené oblasti. Americké zesilovače jasu obrazu mají navíc iontovou bariéru, která umožňuje odstranění šumu a zabraňuje zničení MKZJO. Někdy je uváděná i 4. generace, která ovšem nebyla uznána organizací NVESD (Night Vision and Electronic Sensors Directorate). Vývoj je zatím ukončen 3. generací.

Pojem „generace“ byl zaveden americkou vládou v rámci velkých amerických kontraktů. Mikrokanálové zesilovače jasu obrazu, které nebyly vyrobeny americkými výrobci, mají odlišné konstrukce, a proto se nedají přímočaře srovnat a určit jednotlivé generace. V současnosti s daleko větším počtem variant a výrobců mikrokanálových zesilovačů jasu obrazu pojem „generace“ již zcela ztrácí na významu kvalitativního kritéria, určuje pouze technologii konstrukce mikrokanálového zesilovače jasu obrazu. Objektivnějšími kritérii jsou nové parametry, které budou diskutovány dále. [1] [2]

4. Funkce mikrokanálového zesilovače jasu obrazu

Mikrokanálový zesilovač jasu obrazu, zkráceně MKZJO, je hlavní součástí všech noktovizorů. MKZJO má tři základní části: fotokatodu, která určuje spektrální citlivost, mikrokanálovou destičku (MCP), ve které dojde k zesílení proudu elektronů a stínítko, které přemění dopadající elektrony na výsledný obraz. Jednotlivé části jsou popsány v bodech 4.1. až 4.3. Noktovizor je potom optoelektronický systém, který objektivem fokusuje světlo na fotokatodu a okulárem jako lupou umožňuje pozorovat obraz na stínítku MKZJO.



Obrázek 3: Mikrokanálový zesilovač jasu obraz (MKZJO) [3]

4.1. Fotokatoda

Na fotokatodě dojde, na základě principu vnějšího fotoefektu, k přeměně fotonů odpovídajících obrazu na proud elektronů. Vnější fotoefekt z hlediska kvantové fyziky byl objasněn Albertem Einsteinem roku 1905. Základní princip je popsán níže.

Elektromagnetické záření má povahu, jak vlnovou, tak částicovou. Světlo je tedy soubor kvant, které nazýváme fotony s energií rovnou

$$E = h \cdot f \quad [\text{J}] \quad (1),$$

kde je

f frekvence záření [Hz],

h Planckova konstanta $h = 6,626075 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Každý kov (včetně kovů, ze kterých je vyrobena fotokatoda) má mezní frekvenci f_0 dopadajícího záření. Pokud dopadající záření je rovno f_0 nebo překročí tuto mezní frekvenci, dojde k uvolnění elektronů s kinetickou energií odpovídající frekvenci dopadajícího záření a počet uvolněných elektronů je roven intenzitě dopadajícího záření dle vzorce (2).

$$h \cdot f = W_v + E_k \quad (2),$$

kde je

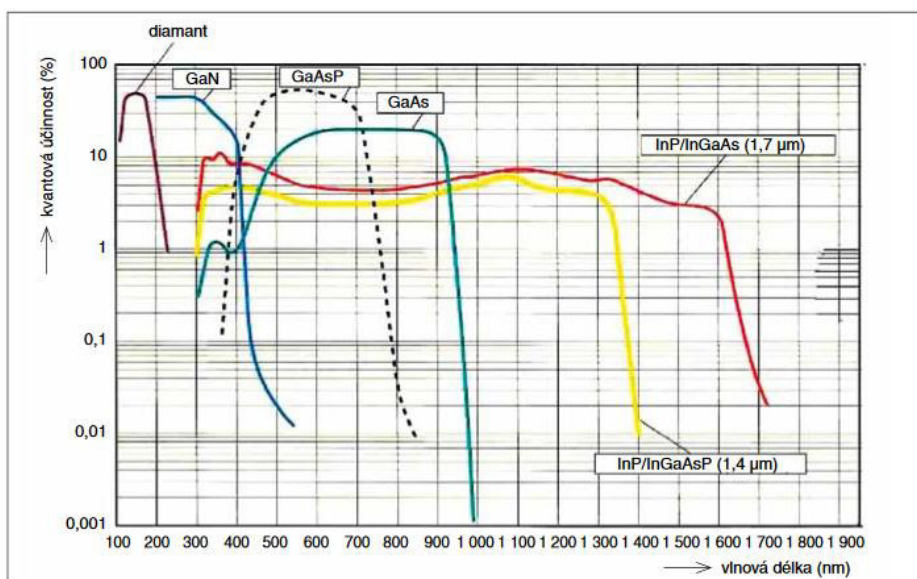
W_v výstupní práce,

E_k kinetická energie elektronu.

Na fotokatodě dochází k vnějšímu fotoefektu, kdy jsou elektrony uvolňovány ven z kovu. Z principu vnějšího fotoefektu vyplývá, že spektrální citlivost závisí na materiálu fotokatody. Mezní frekvence použitých kovů musí být v rozmezí 300 THz – 780 THz. Spektrální citlivost je pak poměr:

$$S(\lambda) = \frac{di}{d\phi_e} \quad [\text{A/W}] \quad (3),$$

kde spektrální zářivý tok $d\phi_e$ na intervalu vlnových délek λ , $\lambda+d\lambda$ vyvolá proud di . V grafu níže je zobrazena spektrální citlivost používaných materiálů. [4] [5]

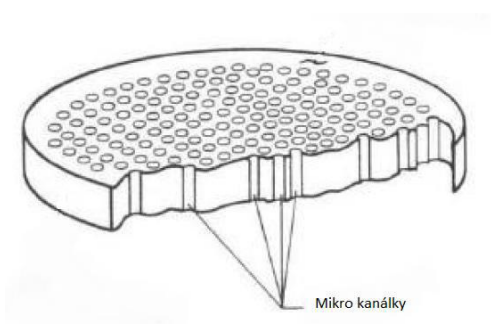


Obrázek 4: Spektrální citlivost různých materiálů fotokatody [5]

4.2. Mikrokanálová destička (MCP – microchannel plate)

Na destičce je integrováno velké množství (až 10^6) kanálků paralelně vedle sebe. Celá struktura pak v průřezu vypadá jako včelí plástev. Každý kanálek představuje miniaturní fotonásobič.

Emitované elektrony z fotokatody prochází kanálky, kde je několik dynod. Každá dynoda v řadě má větší kladný potenciál, než předchozí. Na jednotlivých dynodách dojde k sekundární emisi elektronů a tím k jejich zesílení. MKZJO 3. generace obsahují iontovou bariéru, která je aplikovaná na vnitřní straně MCP. Jde o film ze speciální chemické sloučeniny, který snižuje šum a reguluje jasový zisk tak, aby nedošlo k poškození MKZJO. [6]



Obrázek 5: Mikrokanálová destička (MCP) [7]

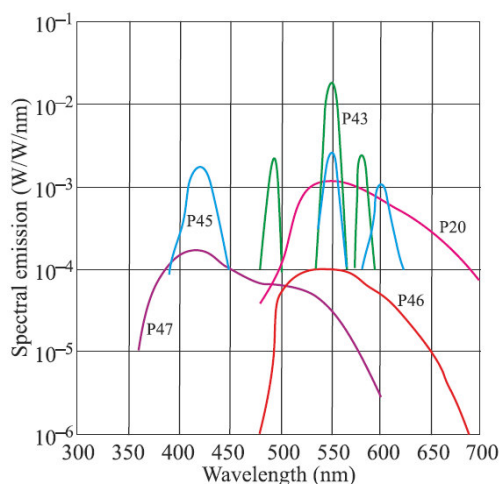
4.3. Stínítko

Stínítko je typicky tvořeno optickými vlákny, luminoforem a vnější vrstvou hliníku. Zesílené elektrony, které přicházejí z MCP jsou zde přeměněny na obraz viditelný lidským okem. Hliníková vrstva slouží jako elektrický kontakt s vrstvou luminoforu a zvyšuje světelnou účinnost téměř na 100 %. Luminofor je tvořen oxidy vzácných zemin nebo halogenidů (gadolinium, lanthan, yttrium, ...). Vrstvy luminoforu jsou značeny písmenem P a číslem odpovídajícím typu luminoforu. Jednotlivé materiály se vyznačují různými vlastnostmi a určují barvu výsledného obrazu. V tabulce níže jsou uvedeny některé typy luminoforu a jejich parametry.

Typ luminoforu	barva obrazu	Časové zpoždění [ms]
P20	žluto - zelená	60,0000
P22	žluto - zelená	0,8000
P43	žluto - zelená	3,0000
P45	bílá	5,0000
P46	zelená	0,0030
P47	modrá	0,0004

Tabulka 1: Různé typy luminoforu

Časové zpoždění je čas, za který klesne jas stínítka na přibližně 1 % po vypnutí zdroje záření. Nejčastěji se používá fosfor typu P22 nebo P43. Oko má dva světlo čivné receptory – tyčinky a čípky. Za fotopického (denního) vidění využívá oko čípky, které slouží k barevnému a ostrému vidění. Jsou umístěny hlavně ve žluté skvrně a jejich počet je okolo 7 milionů. Při skotopickém (nočním) vidění oko využívá tyčinky. Jejich počet je okolo 120 milionů a vyskytují se v okolí žluté skvrny. Tyčinky poskytují pouze mohochromatické vidění. Proto byl vytvořen fosfor typu P45, který zobrazuje obraz v šedé škále a může být oku příjemnější. V grafu níže je uvedena spektrální emise v závislosti na vlnové délce pro různé typy fosforu. [2] [8]



Graf 1: Spektrální emise vybraných typů fosforu [2]

5. Noktovizor MUM 14

Noktovizor MUM 14 je určen pro vojenské jednotky. Vyznačuje se svými malými rozměry a hmotností do 300g. Je voděodolný a testovaný v klimatické komoře v rozsahu operačních teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je možné ho používat jak nasazený na přilbě, jeden přístroj nebo dva v duálním úchytu, tak i na zbrani. Z hlediska optických parametrů jde o afokální systém se zvětšením 1x a velikostí zorného pole 40° . Přístroj je kompatibilní s několika druhy mikrokanálových zesilovačů jasu obrazu, proto je ideální pro následující testování. Samotné tělo přístroje je v dalším textu označováno jako kit.



Obrázek 6: MUM 14



Obrázek 7: MUM 14 v duálním úchytu

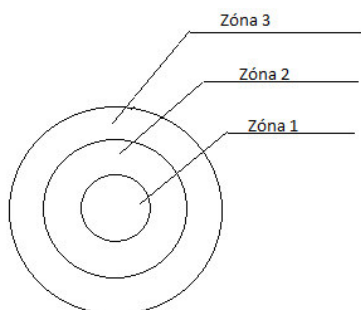
5.1. Instalace MKZJO do těla noktovizoru

Nejdříve proběhla montáž MKZJO do daného kitu. V průběhu měření nebyl kit vyměněn. Při montáži je důležité velmi dobře načistit vnitřní optické plochy objektivu a okuláru, fotokatodu a stínítko MKZJO. Jako čisticí látka je používána směs diethyletheru, která je klasifikovaná standartními větami o bezpečnosti H224, H302 a H336.



Obrázek 8: Montáž MUM 14

Pokud by na některé části ulpěl prach nebo nečistota, mohou být při zobrazování vidět černé skvrny, které mohou být rušivé a při některých aplikacích nežádoucí. Některé vzniklé černé tečky na stínítku jsou dané i technologií výroby stínítka a jsou neodstranitelné. Proto byly určeny maximální povolené velikosti nečistot tak, aby přístroj vyhovoval při použití v terénu. Zorné pole je rozděleno mezikružím do tří zón. V každé zóně jsou dány maximální povolené velikosti nečistot.



Obrázek 9: Rozdělení zorného pole

Maximální povolené velikosti nečistot pro MUM 14:

Zóna 1, kružnice o poloměru 5,6 mm: 1 x 75 – 150 μm

Zóna 2, kružnice o poloměru 14,7 mm: 2 x 75 – 150 μm , 1 x 150 – 230 μm

Zóna 3, kružnice o poloměru 17,5 mm: 3 x 75 – 150 μm , 2 x 150 – 230 μm , 1 x 230 – 300 μm

Velikost nečistot se kontroluje na NVT stanici, kde je k dispozici testový obrazec pro dané velikosti skvrn a uvedeno rozdělení mezikruží. Měření bude podrobněji popsáno v dalších kapitolách. V tabulce níže jsou uvedena spárovaná sériová čísla MKZJO a kitu.

Název	SN KIT	SN MKZJO
Bílý fosfor	034773	6260838
Intens	034965	L490457
XD - 4	034747	5210564
XR5	037508	5050530
Ruský	034788	16574

Tabulka 2: Seznam spárovaných SN

6. Testované MKZJO

Jak už bylo zmíněno do noktovizoru MUM 14 je možné vložit několik druhů MKZJO. MKZJO je ve tvaru válce o výšce 36 mm, průměru 30 mm s plošnými napájecími kontakty a velikost fotokatody je 17,5 mm. Pro testování byly použity 4 MKZJO od holandské společnosti Photonis a jeden MKZJO od ruské společnosti KATOD. K MKZJO dodaných společností Photonis jsou k dispozici měřicí protokoly naměřených parametrů použitého MKZJO. Pro MKZJO od společnosti KATOD jsou pouze uvedeny katalogové parametry, nalezeny na webových stránkách společnosti. V tomto případě jde tedy pouze o obvyklé hodnoty daného typu MKZJO a ne o přímo naměřené parametry použitého MKZJO. V následujících tabulkách jsou uvedena sériová čísla, jednotlivé parametry a základní značení. V příloze diplomové práce jsou pak uvedeny samotné měřicí protokoly od společnosti Photonis. Všechny měřené MKZJO mají funkci autogatingu, tedy automatickou regulaci jasového zisku. Tato funkce slouží k ochraně MKZJO při vysokém osvětlení fotokatody.

Typ MKZJO	SN	Pracovní název	Typ fosforu	Barva	Výrobce
XX2040ZT	5210564	XD-4	P22	Žluto-zelená	Photonis
XX2540BU	5050530	XR5	P22	Žluto-zelená	Photonis
XX3040GF	L490457	Intens	P22	Žluto-zelená	Photonis
XW3040R	6260838	bílý fosfor	P45	Bílá	Photonis
EPM101G-01-11	16574	Ruský	P43	Žluto-zelená	KATOD

Parametry deklarované výrobcem					
Typ MKZJO	SN	Pracovní název	FOM	Jasový zisk	Středové rozlišení [čar/mm]
XX2040ZT	5210564	XD-4	1687	12480	65
XX2540BU	5050530	XR5	1741	13680	69
XX3040GF	L490457	Intens	2124	17357	70
XW3040R	6260838	Bílý fosfor	2049	8740	69
EPM101G-01-11	16574	Ruský	-	-	64

Tabulka 3: Seznam měřených MKZJO a jejich parametry

Základní parametry MKZJO vloženého do přístroje MUM 14 byly změřeny v laboratoři společnosti Pramacom – HT. Parametry pro samotný MKZJO byly změřeny v laboratoři společnosti Meopta – optika. V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé parametry a postupy měření. V dnešní době je zvykem uvádět parametr FOM (figure of merit) jako hlavní parametr udávající kvalitu MKZJO, vyšší hodnota FOM značí lepší kvalitu. Pro námi testované MKZJO je tato hodnota nejvyšší pro Intens a naopak nejnižší pro XD-4. Tento parametr bude dále diskutován.

7. Základní parametry

Pro určení základních parametrů je důležité nejprve určit měřicí podmínky. Tyto podmínky by měly být dodrženy pro všechna další měření. Pro všechna měření, ve kterých je

rozhodující osvětlení fotokatody, bylo zvoleno na základě požadavků armády České republiky osvětlení 3 mlx. V následujících bodech 7.1. až 7.8. jsou objasněny základní parametry a postup jejich měření.

7.1. Středové rozlišení

Středové rozlišení je dáno maximální rozlišitelnou prostorovou frekvencí ve středu zorného pole optického systému. Testovým obrazcem je čárový test typu USAF 1951, kde jsou testy s rostoucí prostorovou frekvencí. Výsledná hodnota se udává v jednotkách čáry na miliradián [čar/mrad] nebo v čáry na milimetr [čar/mm]. Aby bylo možné překonat limity oka, je vždy testový obrazec pozorován přes měřicí mikroskop nebo dalekohled.

7.2. SNR (Signal to Noise Ratio)

SNR je bezrozměrná veličina, která udává poměr signálu ke střední hodnotě šumu. Čím vyšší hodnota SNR, tím je detektor nebo optický systém kvalitnější. SNR je měřeno na kruhové cloně o velikosti v řádech stovek mikrometrů. Při měření musí dojít ke správnému nasycení MKZJO, které je většinou zajištěno samotným měřicím přístrojem v ovládní expozice. Výpočet SNR pro MKZJO je popsán vzorcem (4).

$$SNR_{MKZJO} = \frac{S_0 - S_{bkd}}{K \sqrt{N_0^2 - N_{bkd}^2}} \quad (4),$$

kde je

S_0 digitální hodnota signálu při osvětlení fotokatody,

S_{bkd} digitální hodnota pozadí signálu, bez osvětlení fotokatody,

K korekční faktor daného fosforu,

N_0 signál šumu,

N_{bkd} šum pozadí.

Výrobci měří samotný MKZJO při hodnotě osvětlení halogenovým zdrojem 108 μlx . Hodnota SNR pro celý optický systém je definována jako

$$SNR_{NVD} = SNR_{MKZJO} \sqrt{\frac{\tau_{obj}}{4F^2 + 1}} \quad (5),$$

kde je

τ_{obj} propustnost objektivu,
F clonové číslo objektivu.

[2] [9].

7.3. FOM – figure of merit

Středové rozlišení a SNR jsou natolik důležité parametry, že se začaly udávat v jedné veličině, rozhodující o kvalitě celého MKZJO. Tato veličina se nazývá FOM a je to tedy součin SNR a středového rozlišení v čarách na milimetr.

$$FOM = SNR \cdot \text{středové rozlišení} \quad (6).$$

Hodnota parametru FOM byla zvolena jako rozhodující pro určení výkonosti daného MKZJO, případně celého přístroje. Vzhledem k této hodnotě je i vztažena hranice pro noktovizory určené pro vojenské a civilní účely a hranice pro povolení importu a exportu MKZJO.

$$FOM \geq 1250 \text{ vojenský materiály}$$

7.4. Jasový zisk

Jasový zisk udává hodnotu zesílení jasu MKZJO nebo zesílení jasu pro celý optický systém. Jasový zisk je poměrové měření mezi jasnem stínítka (výstupní signál) a osvětlení fotokatodou (vstupní signál). Teoretický výpočet pro celý systém je dán

$$LG = \frac{LG_{MKZJO} \cdot \tau_{obj} \cdot \tau_{ok}}{4F^2 + 1} \quad (7),$$

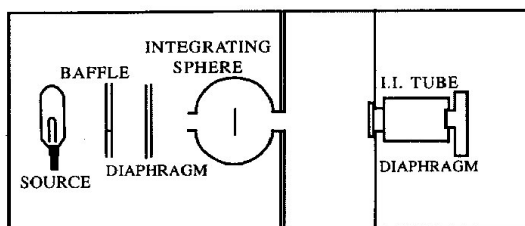
kde je

LG_{MKZJO} jasový zisk MKZJO,
 τ_{obj} propustnost objektivu,
 τ_{ok} propustnost okuláru,
 F clonové číslo objektivu.

Výsledná hodnota bude v řádu tisíců a jednotka jasového zisku je $\left[\frac{cd \cdot m^{-2}}{lx} \right]$. Při měření je obzvláště důležité určit hladinu osvětlení fotokatody. MKZJO, které mají funkci autogatigu začnou při určitých hodnotách automaticky regulovat zisk, a proto hodnoty jasového zisku při různém osvětlení nebudou nikdy stejné. [2]

7.5. EBI (Equivalent background illumination)

V hodnotě EBI je obsažen šum pozadí, který je způsoben teplotní emisí na fotokatodě. EBI odpovídá osvětlení fotokatody, které vyvolá stejný signál na stínítku jako šum pozadí. Vstupní osvětlení je voleno 20 μlx . Měří se čtyři základní hodnoty v následujícím uspořádání.



Obrázek 10: Uspořádání měření pro hodnotu EBI

Hodnota temného proudu I_1 je změřena, při vypnutém zdroji záření a odpojeným napájením MKZJO. Proud odpovídající signálu pozadí I_2 je změřen při vypnutém zdroji záření a zapnutém MKZJO. Proud odpovídající analytickému signálu I_3 je změřen při zapnutém zdroji záření a zapnutém MKZJO a proud I_4 odpovídá zapnutému zdroji záření a vypnutému MKZJO. Výsledná hodnota EBI je

$$EBI = \frac{I_2 - I_1}{I_3 - I_4} \cdot E_{in} \quad [\mu\text{lx}] \quad (8),$$

kde je

E_{in} vstupní osvětlení.

[12]

7.6. MTF (Modulation transfer function)

Funkce přenosu kontrastu (dále jen MTF) je další kvalitativní parametr, který určuje kvalitu zobrazení jednotlivých částí nebo celého optického systému. Tento parametr udává, s jakým kontrastem přenesou daný systém určité prostorové frekvence. Výsledkem MTF je graf závislosti kontrastu na prostorových frekvencích. MTF celého systému získáme pro násobení dílčích hodnot MTF viz. vzorec (9).

$$MTF(\nu) = MTF_{obj}(\nu) \cdot MTF_{MKZJO}(\nu) \cdot MTF_{ok}(\nu) \quad (9).$$

MTF pro celý systém bylo možné změřit na NVT stanici ve společnosti Pramacom - HT. Testovým obrazcem byl čtverec, na jehož hranách probíhala analýza MTF měřeného systému. Pro samotný MKZJO byla hodnota MTF změřena v laboratoři společnosti Meopta – optika. [2]

7.7. MRC (Minimal resolvable contrast)

Minimálně rozlišitelný kontrast je subjektivní hodnocení přístroje, které je měřeno na čárových testech o různých hodnotách kontrastu a prostorových frekvencích. Podmínky měření a parametry testu určuje STANAG 4351. Při různých úrovních osvětlení je určena nejvyšší rozlišitelná prostorová frekvence u daného kontrastu.

Některé podmínky měření podle STANAG 4351:

- Zdroj záření má definovanou barevnou teplotu 2856 ± 50 K.

- Čárový test je umístěn v bílém poli, s pevně daným a neměnným kontrastem vůči pozadí.
- Doporučený kontrast pro měření je 2, 5, 10, 20, 50 a 100 %.
- Test je promítán z nekonečna kolimátorem, který má vyšší MTF (modulation transfer function) než měřený přístroj.
- Nejvyšší rozlišitelná prostorová frekvence je pozorována přes měřicí mikroskop nebo dalekohled, aby se předešlo limitům oka.

7.8. Výpočet dosahu MKZJO

Při naměřených hodnotách MRC křivky je možné vypočítat vzdálenost pro dosah jednotlivých přístrojů podle normy STANAG 4348. Dosah systémů je dán Johnsonovým kritériem, kde určujeme tři základní vzdálenosti s pravděpodobností 50 %:

Detekce – 1 pár čar na test, vzdálenost udávána v km

Rozpoznání – 3 páry čar na test, vzdálenost udávána v km

Identifikace – 6 párů čar na test, vzdálenost udávána v km

1 pár čar na test znamená, že na testu budou 2 pruhy jeden černý a druhý bílý. Testový obrazec by měl mít rozměry 2,3 x 2,3 m. a atmosféra je definována propustností:

$$\tau = e^{-\sigma \cdot R} \quad (10),$$

kde je

τ propustnost atmosféry,

R vzdálenost [km],

σ atmosférický útlum, $\sigma = 0,4 \text{ km}^{-1}$ (pro viditelnost 7,5 km).

Hodnoty MRC křivky by měly být naměřené pro různé úrovně osvětlení. Zdroj záření je definován teplotou chromatičnosti $2856 \pm 50 \text{ K}$. Ve společnosti Pramacom - HT je k dispozici program MOVIS, ve kterém jsou naprogramovány veškeré výpočty pro výsledné hodnoty jednotlivých vzdáleností, které se řídí STANAGEM 4348. [10] [11]

8. Měřicí přístroje

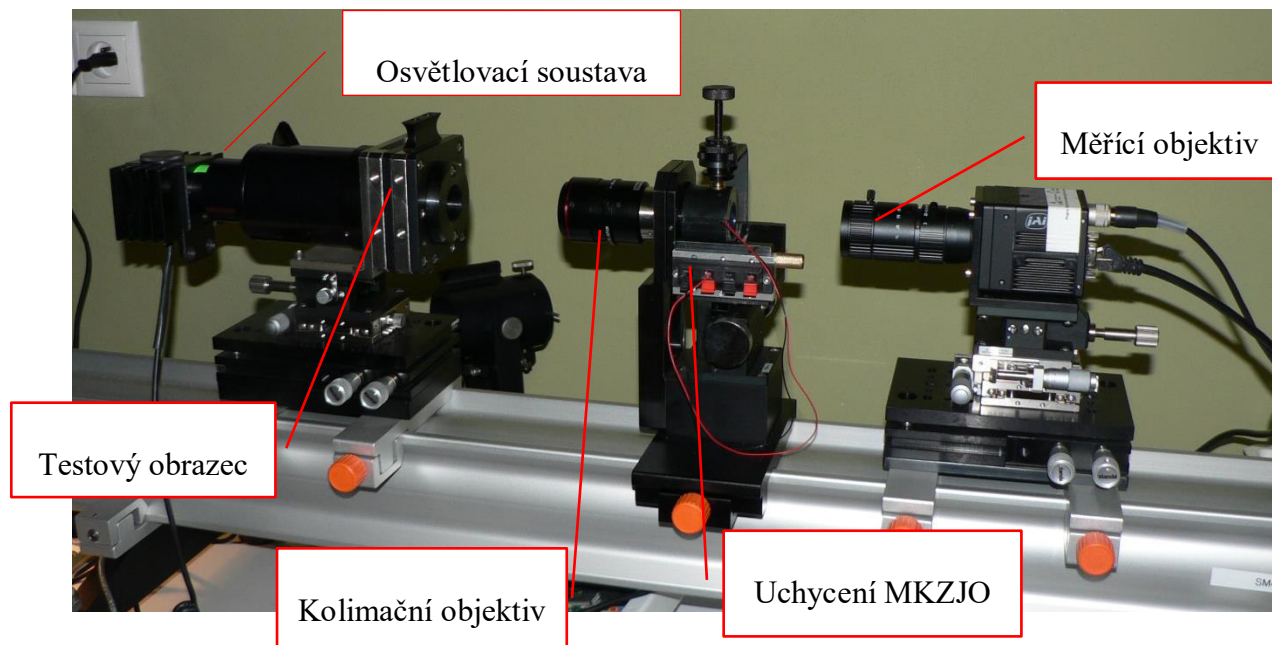
Měření probíhalo ve dvou laboratořích. V první laboratoři společnosti Meopta – optika, s.r.o. byla k dispozici měřicí lavice určená pro měření samotných MKZJO. Tato měřicí lavice byla navržena a zkonstruována v letech 2015–2017. Stále je ve vývoji a testovací fázi. Z tohoto hlediska bude velmi zajímavé pozorovat odchylky od naměřených hodnot společností Photonis, která měří také samotné MKZJO a výsledky naměřené pro stejné kusy v laboratoři společnosti Meopta – optika. Na měřicí lavici byly změřeny hodnoty pro SNR a MTF samotných MKZJO.

Druhá využitá laboratoř je v prostorách společnosti Pramacom – HT, kde byla k dispozici NVT stanice. Na této měřicí aparatuře je možné měření celého systému, tedy MUM 14 s daným typem MKZJO. Pomocí NVT stanice je možné naměřit MRC křivku následně vypočítat dosah noktovizoru dle Johnsonova kritéria. Tento výsledek pak bude zajímavé porovnat s měřením v terénu. Na NVT stanici byly změřeny hodnoty pro jasový zisk, středové rozlišení, MRC křivku, SNR, MTF, velikosti nečistot, velikost zorného pole a zvětšení pro celý systém. V následující kapitole bude popsána jak měřicí lavice, tak NVT stanice a podrobně vysvětlen postup každého měření.

8.1. Měřicí lavice

Měřicí lavice se skládá z několika částí umístěných na kolejnici, a to z osvětlovací soustavy, držáku pro testový obrazec, kolimačního objektivu, stolku pro uchycení MKZJO a měřicí kamery. Jako zdroj záření v osvětlovací soustavě je zvolena halogenová žárovka o výkonu 20 W s teplotou chromatičnosti 2850 K s tolerancí ± 50 K. Halogenový zdroj podléhá časové degradaci, proto je změřena jeho spektrální charakteristika a ta je kontrolována. Stolek pro uchycení je možno použít na různé rozměry MKZJO. MKZJO je napájen externím zdrojem. Pokud má MKZJO napájecí plošné kontakty, je třeba jej umístit do speciálního přípravku. Tento přípravek je prstenec sloužící jako adaptér mezi variantou s plošnými kontakty a variantou s vyvedenými dráty pro napájení. Stínítko takto upevněného MKZJO je snímáno měřicí kamerou a obraz je zobrazen na monitoru připojeného počítače. Nedílnou součástí tohoto měření je tedy i PC s programem určeným pro vyhodnocení měření. Program byl vytvořen týmem Vývoje měřicích metod společnosti Meopta – optika. Tento program je přímo vytvořený na míru měřicí lavici. Umožňuje zajistit správné

nasycení snímací kamery při měření, monitoruje výsledný obraz, zaznamenává naměřená data a provádí matematické operace k vyhodnocení naměřených výsledku. Na lavici je možné měřit charakteristiku MTF, poměr SNR, halo efekt a hodnotit velikosti nečistot.



Obrázek 11: Měřící lavice

8.2. NVT stanice

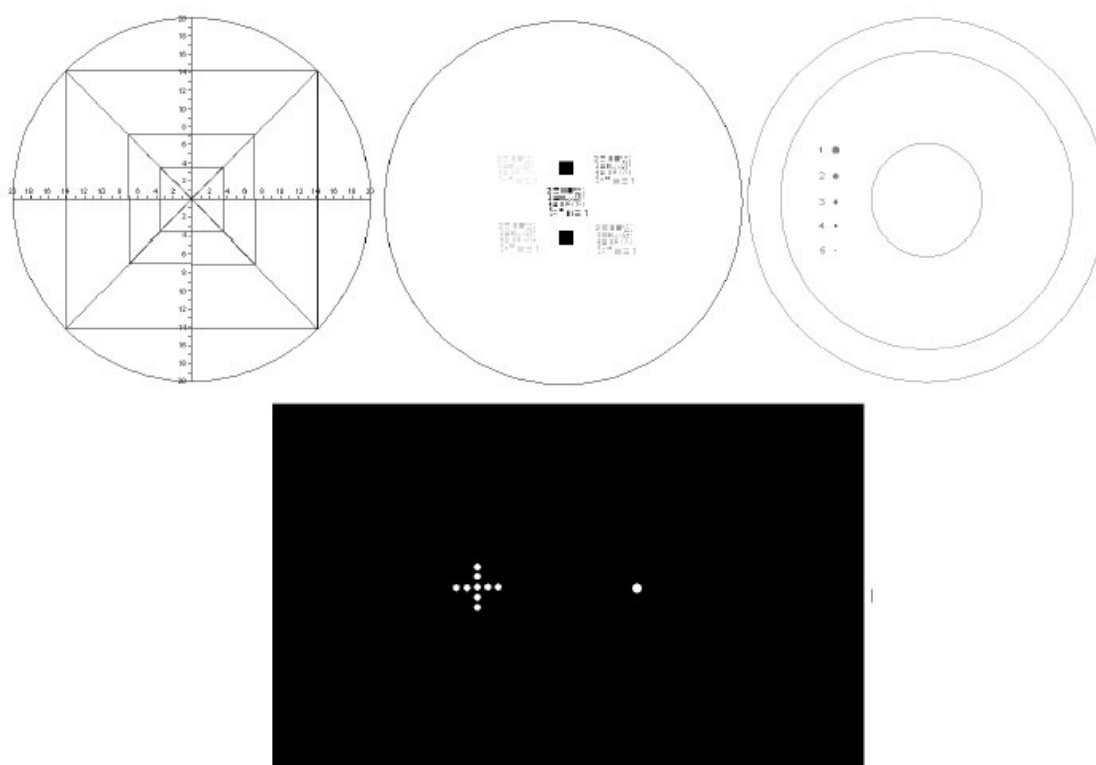
NVT stanice je určena ke komplexnímu měření parametrů noktovizorů. Můžeme měřit jak monokulární optické systémy, tak binokulární. Celá NVT stanice je propojena s počítačem pro výpočet jednotlivých měření. Úroveň osvětlení odečítáme v programu NVT display, který nám umožňuje i využít kalibraci pro LED zdroje záření. Další používaný program s názvem TAS 7 umožňuje zobrazení z NV kamery v reálném čase, provádí nás celým měřením a zaznamenává naměřená data. Stanice má tyto části:

8.2.1. Osvětlovací soustava

Základem jsou jeden halogenový a dva LED zdroje záření, mezi nimiž je možné libovolně přepínat. Ovládání úrovně osvětlení je vyvedeno na základní desce a hodnota je odečítána v programu NVT display. Všechna měření by měla probíhat na halogenovém zdroji záření. Velkou nevýhodou je životnost takového zdroje, proto jsou v NVT stanici zabudované LED zdroje záření, u kterých můžeme určit kalibrační koeficient a používat je náhradou za halogenovou žárovku.

8.2.2. Kolimátor a karusel s testovými obrazy

Testové obrazce jsou umístěny na karuseli v ohniskové rovině kolimátoru (pozorujeme obraz z nekonečna). Základní testy obsahují záměrný kříž pro měření velikosti zorného pole a zvětšení, čárové testy USAF 1951 s různou hodnotou kontrastu, testový obrazec pro určení velikostí nečistot, záměrný kříž pro zjištění kolimační chyby binokulárních přístrojů a kruhovou šterbinu pro určení SNR.



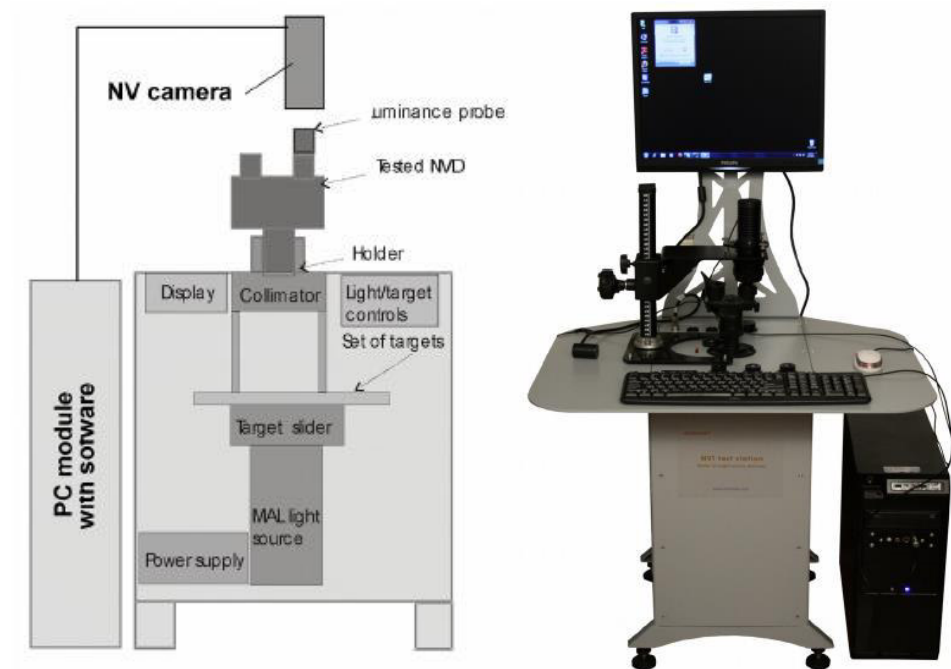
Obrázek 12: Testové obrazce

8.2.3. Základní deska

Na základní desku jsou vyvedena všechna mechanická ovládání, ovládání zdrojů záření. Stanice je upravena, tak aby bylo snadné a pohodlné uchycení měřeného přístroje. Dále je na základní desce vyvedena externí hlavice pro měření jasu a NV kamera, která plní funkci měřicího mikroskopu.

8.2.4. NV kamera

NV kameru tvoří objektiv a CCD detektor, vše je propojeno s PC a obraz je promítán a vyhodnocován na monitoru. Základní měření probíhá při nastaveném clonovém čísle 5,6.



Obrázek 13: NVT Stanice

8.2.5. Spektrální kalibrace

NVT stanice má zabudovaný jeden halogenový zdroj záření a dva LED zdroje záření ($\lambda_1 = 680 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 590 \text{ nm}$). Z důvodu rychlého stárnutí halogenového zdroje se jako náhrada využívá LED zdroj záření. Potom ovšem narážíme na problém s průběhem spektrální odezvy MKZJO a rozdílností teploty chromatičnosti. Proto je třeba vždy pro každý typ MKZJO vytvořit spektrální koeficient, který bude fungovat jako převod mezi halogenovým zdrojem a LED zdrojem záření, pro nastavení správného osvětlení. Správnost spektrálního koeficientu byla ověřena několika měřeními a po čase znovu zopakována.

Přístroj s MKZJO daného typu, pro který chceme určit spektrální koeficient je upevněn do držáku NVT stanice. Halogenový zdroj je nastaven na hodnotu 2,5 mlx, která je zaznamenána v programu NVT display. Tento program slouží k odečítání hodnot osvětlení a jasů. Externí hlavicí je změřena hodnota výstupního jasů v cd/m^2 . Tato hodnota je zaznamenána, jako hodnota H. Po zapnutí LED zdroje je externí hlavice stále ve stejné poloze a regulací osvětlení LED zdroje je nastavena znovu hodnota jasů H. Po nastavení této hodnoty je přepnuto zpět na vnitřní měření osvětlení a zaznamenána nová hodnota, která odpovídá osvětlení LED zdrojem stejnemu jako při osvětlení halogenovým zdrojem 2,5 mlx. Výsledný spektrální koeficient, je pak roven

$$SC = \frac{E_{Led}}{E_{Halogen}} \quad (11),$$

kde je

SC spektrální koeficient,

E_{led} hodnota osvětlení LED zdrojem záření [lx],

$E_{halogen}$ hodnota osvětlení halogenovým zdrojem záření [lx].

Typ	Spektrální koeficient
Bílý fosfor	1,33
Intens	1,36
XD - 4	1,31
XR5	1,30
Ruský	1,33

Tabulka 4: Spektrální koeficient

Tyto spektrální koeficienty jsou pak používány při každém měření.

9. Měření

V následujících kapitolách budou podrobně popsána jednotlivá měření a uvedeny výsledné hodnoty. Pro všechna měření bude provedeno srovnání výsledků s hodnotami od výrobce a případné srovnání mezi NVT stanicí a měřicí lavicí. Vždy při každém vyhodnocení budou uváděny pracovní názvy pro lepší přehlednost, v tabulce č. 2 jsou uvedena

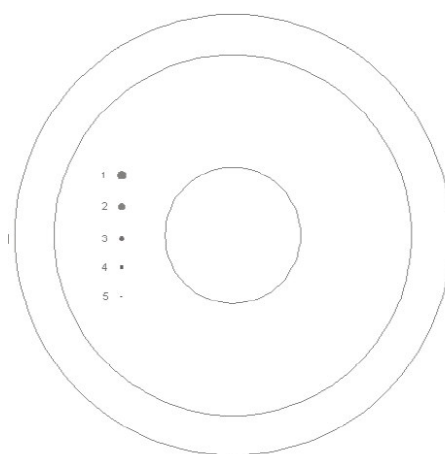
spárovaná sériová čísla a typy MKZJO. Všechna měření jsem prováděla samostatně v daných laboratořích s případnou asistencí odpovědného pracovníka.

9.1. Nečistoty

Velikost nečistot se určuje na NVT stanici pro celý přístroj MUM 14 s daným typem MKZJO. Jako testový obrazec je použit test s mezikružím pro kontrolu nečistot. Na okraji testového obrazce jsou zobrazeny černé tečky s přesnými rozměry pro porovnání a určení, tak velikosti nečistot. Tečky jsou označeny číslicemi 1 – 5, kde hodnota 5 značí nejmenší velikost do 75 μ m a hodnota 1 značí největší velikost do 300 μ m. Maximální velikost nečistot a jejich hodnota pro NVT stanici je uvedena v tabulce č. 5.

Max. povolená velikost v jednotlivých zónách					Rozměry
Zóna 1	max 1x4	a menší			1x 75 - 150 μ m
Zóna 2	max 1x3	2x4	a menší		2 x 75 - 150 μ m, 1 x 150-230 μ m
Zóna 3	max 1x2	2x3	3x4	a menší	3 x 75 - 150 μ m, 2 x 150-230 μ m, 1 x 230-300 μ m

Tabulka 5: Povolené velikosti nečistot



Obrázek 14: Testový obrazec pro kontrolu nečistot

Pro kontrolu nečistot je voleno osvětlení fotokatody tak, aby obraz byl dostatečně kontrastní a bylo snadné rozlišit i nejmenší tečky. Není potřeba nastavit přesnou hodnotu osvětlení fotokatody. U některých specializovaných aplikací, například noktovizní zaměřovače pro odstřelovače, je důležité více hlídat čistotu středu zorného pole. Pro takové úče-

ly musí být zóna 1 zcela čistá. Postup provedeného měření a výsledky pro testované kusy jsou uvedeny níže.

Noktovizor je umístěn do držáku NVT stanice a je nastaveno potřebné osvětlení. Obraz je pozorován okem v okuláru MUM 14. Postupně jsou porovnávány velikosti nečistot z každé zóny, jsou zaznamenány výsledky s označením umístění nečistot pro případnou opravu nebo kontrolu. Pokud se do zorného pole dostane chlup nebo vlas je nutné MKZJO znovu přechistit. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce.

Zóna	Bílý fosfor	Intens	XD-4	XR5	Ruský
1	0	1x5	0	1x5	1x5
2	1x5	2x5	1x5	0	2x5
3	0	1x4,2x5	1x4,1x5	0	0

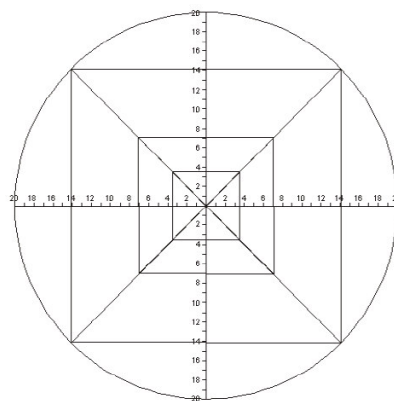
Tabulka 6: Kontrola nečistot

Z tabulky je vidět, že všechny přístroje jsou v povolených mezích. Větší nečistoty se vyskytují pouze v kraji zorného pole, kde již nejsou pro pozorovatele rušivé.

9.2. Velikost zorného pole

U noktovizoru MUM 14 je katalogová velikost zorného pole 40°. Na NVT stanici je možné provést kontrolu této hodnoty. Postup a výsledky provedeného měření jsou zobrazeny níže.

Pro měření je nastaven test pro měření velikosti zorného pole, kde jsou hodnoty na osách škálovány přímo ve stupních. Obraz je pozorován okem v okuláru. Odečítá se maximálně přehlédnutá hodnota na stupnici.



Obrázek 15: Test pro určení velikosti zorného pole

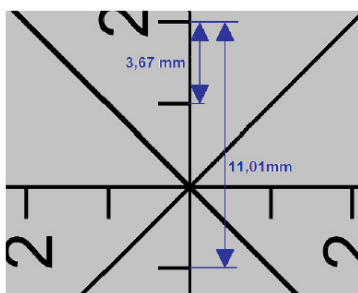
Typ	Velikost ZP
Bílý fosfor	40°
Intens	40°
XD - 4	40°
XR5	40°
Ruský	40°

Tabulka 7: Velikost ZP

Pro všechny testované noktovizory byla rozlišena velikost zorného pole 40° a potvrzena hodnota katalogových parametrů.

9.3. Zvětšení

Zvětšení všech přístrojů, které se používají jako brýle nočního vidění, musí být rovno 1. Dodržet toto zvětšení je důležité obzvláště pro orientaci v terénu, odhad vzdáleností a velikostí předmětů. Zvětšení noktovizoru MUM 14 je měřeno na NVT stanici. MUM 14 je umístěn do držáku a NV kamera je nastavena na střed zorného pole. Celé měření probíhá v programu TAS7, který provede uživatele jednotlivými kroky měření. Velikost zvětšení je určována testem pro měření velikosti zorného pole. Na tomto testu jsou známy rozměry stupnice. Do programu TAS7 je zadána reálná velikost testu a rozměry pixelů. Při měření je zobrazen obraz z NV kamery, kde na záznamu označíme měřenou velikost. Program následně ze znalosti velikosti pixelů a reálné velikosti testu dopočítá zvětšení. Výsledky jsou uvedeny v tabulce níže.



Obrázek 16: Reálná velikost stupnice

Typ	Zvětšení
Bílý fosfor	0,99
Intens	0,98
XD – 4	1,01
XR5	1,00
Ruský	1,01

Tabulka 8: Hodnota zvětšení

Z tabulky je zřetelné, že zvětšení kolísá do odchylky $\pm 0,02$. Při měření je vždy důležité správně umístit měřenou úsečku. Na záznamu z NV kamery nejsou vždy hrany přesně ohraničené, a tudíž je velmi obtížné označit začátek a konec úsečky. Vzhledem k postupu měření můžeme tuto odchylku považovat, v rámci chyby měření, za zanedbatelnou.

9.4. Jasový zisk

Hodnocení jasového zisku proběhlo při halogenovém zdroji záření, aby nedošlo k znevýhodnění MKZJO, kterým zasahuje spektrální citlivost více do blízké infračervené oblasti. Halogenový zdroj byl nastaven na hodnotu 2,5 mlx. MUM 14 s daným MKZJO byl upevněn v držáku. V programu NVT display byla zaznamenána hodnota vstupního osvětlení. Následně bylo přepnuto na měření s externí hlavici a zaznamenána hodnota výstupního jasů. Program NVT display dopočítal výsledný poměr a zobrazil hodnotu jasového zisku.

Typ	Jasový zisk		Koeficient	
	Pramacom 2,5 mlx	Photonis (20 μ lx)	Pramacom/ Photonis	Odchylka od průměrné hodnoty [%]
Ruský	7693	-	-	-
Intens	6554	17357	0,38	-6,86
XR5	5586	13680	0,41	0,73
XD - 4	4904	12480	0,39	-3,07
Bílý fosfor	3869	8740	0,44	9,20
		Průměrná hodnota:	0,41	

Tabulka 9: Hodnoty jasového zisku

V tabulce jsou srovnané MKZJO dle hodnoty jasového zisku od nejmenší po největší. MUM 14 s MKZJO Bílým fosforem má nejmenší hodnotu jasového zisku. Výroba stínítka

s luminoforem typu P45 je velmi obtížná a takové MKZJO nedosahují vysokého jasového zisku. MUM 14 s Ruským MKZJO vykazuje nejvyšší jasový zisk. V tabulce jsou srovnány naměřené hodnoty na NVT stanici a hodnoty z měřicího protokolu od výrobce. Ze vztahu (7) vyplývá

$$\frac{LG}{LG_{MKZJO}} = \frac{\tau_{obj} \cdot \tau_{ok}}{4F^2 + 1} = K \quad (12),$$

kde K je koeficient uvedený v tabulce č. 9. Koeficient K byl určen podílem hodnoty jasového zisku z měření na NVT stanici v Pramacomu - HT a hodnoty jasového zisku z měřicího protokolu od Photonisu. Vypočítáním průměrné hodnoty tohoto koeficientu byla vytvořena vztažná hodnota k určení odchylky měření. Tato odchylka slouží pro srovnání správnosti výsledků měření a určení vlivu použitého kitu na jasový zisk samotného MKZJO. Při měření na NVT stanici získáme hodnoty, které jsou 0,41 x menší než hodnoty z měřicího protokolu s odchylkou $\pm 10\%$. Koeficient K je ovlivněn nejen parametry použité optiky (propustností objektivu, okuláru, clonovým číslem), ale i měřicími podmínkami a funkcí autogatingu.

9.5. Středové rozlišení a MRC křivka

Středové rozlišení a MRC křivka je měřeno na testech USAF 1951 s různými hodnotami kontrastu. Obě měření spolu velmi úzce souvisí. Pokud je vyhodnocována MRC křivka pro střed zorného pole, jako v tomto měření, je středové rozlišení dáno hodnotou prostorové frekvence pro kontrast 1. Osvětlení fotokatody je voleno tak, aby byly vyhodnoceny základní scény, které mohou nastat v noci, definované společností Photonis viz. tabulka č. 10.

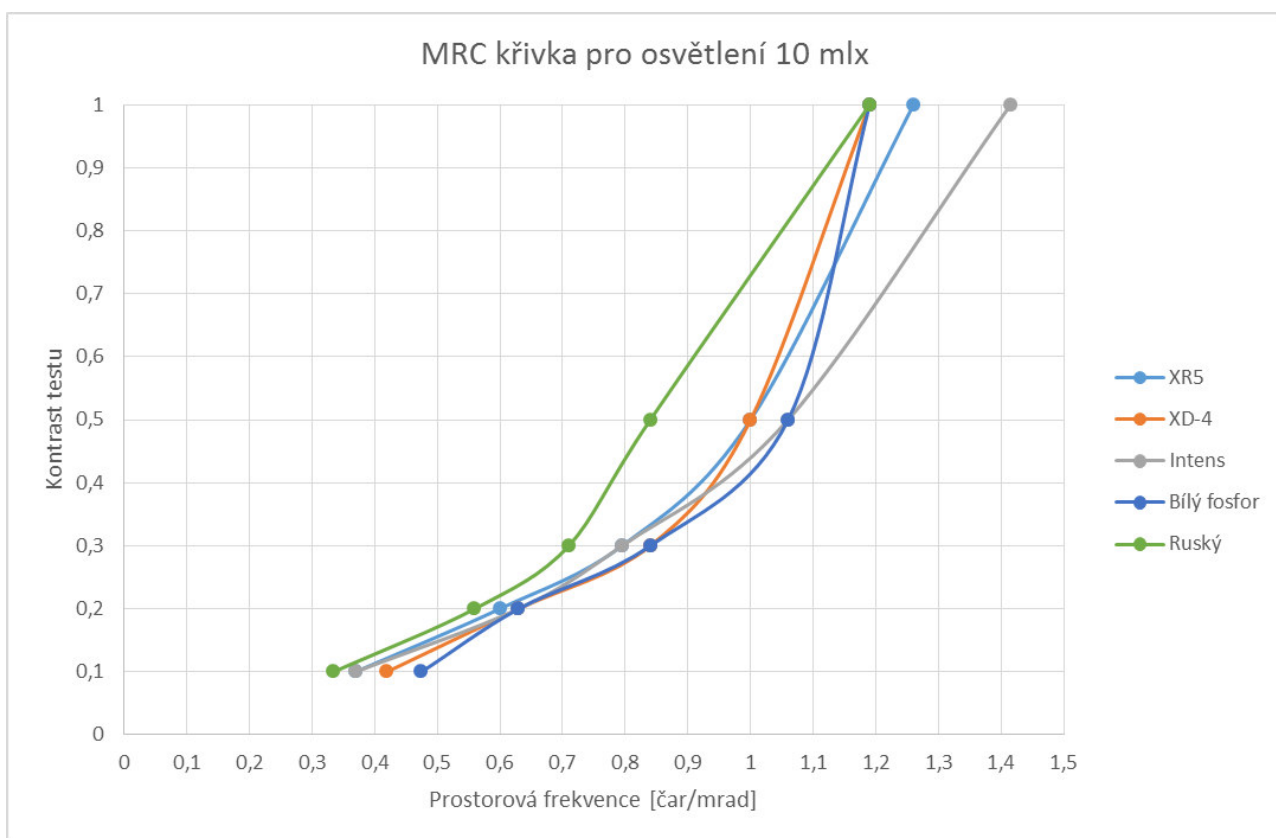
Scéna	Osvětlení
Denní obloha, jasno	$\geq 1\text{lx}$
Noční obloha, úplněk, jasno	max.: 1000 mlx
Noční obloha, úplněk, polojasno	max.: 40 mlx
Noční obloha, poslední čtvrt měsíce, polojasno	max.: 10 mlx
Noční obloha, NOV, jasno	max.: 2 mlx
Noční obloha, NOV, zataženo	max.: 0,7 mlx

Tabulka 10: Osvětlení v noci

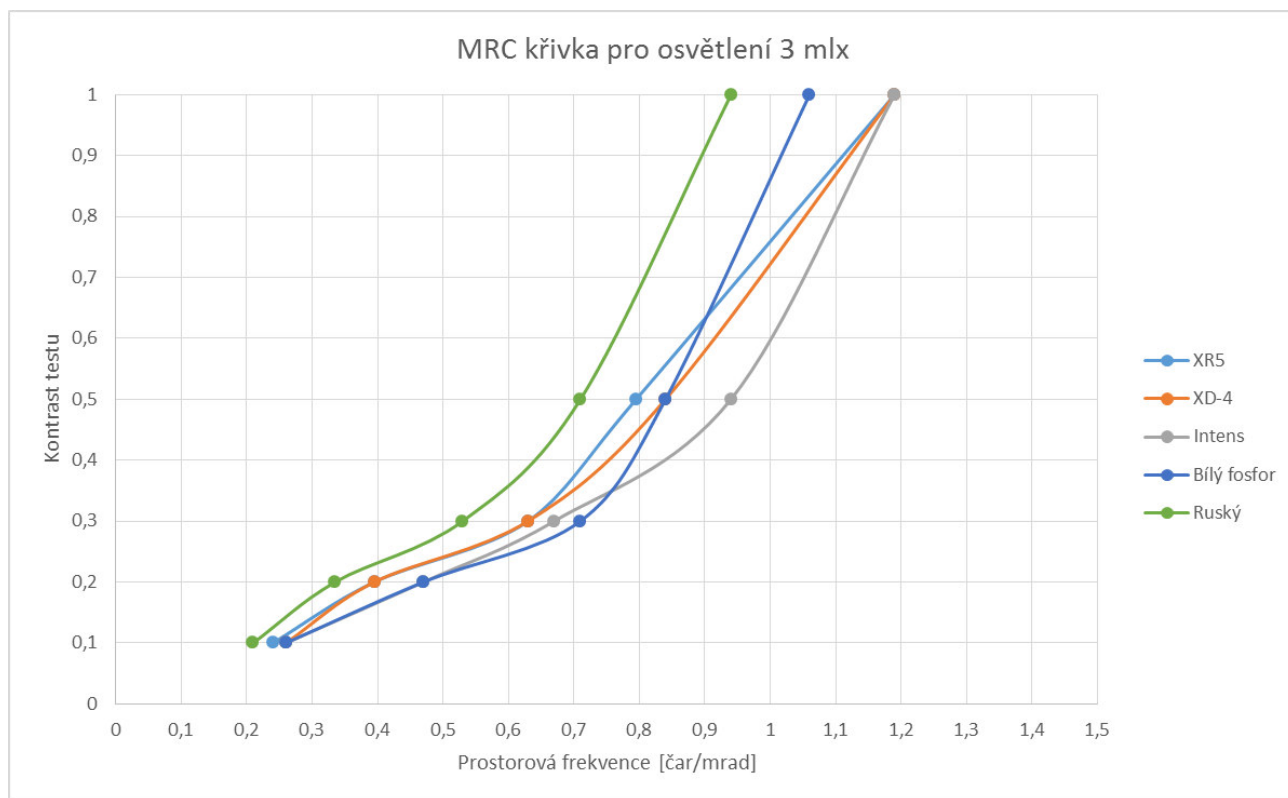
Na NVT stanici je navolen čárový test. MUM 14 je umístěn do držáku NVT stanice a výsledný obraz je pozorován na monitoru PC přes NV kameru s clonovým číslem 5,6. Kontrasty testu jsou 1, 0,5, 0,3, 0,2, 0,1. Úroveň osvětlení a správná spektrální kalibrace je nastavena v programu NVT display. MRC křivka byla změřena pro osvětlení 40 mlx, 10 mlx, 3 mlx a 0,2 mlx. Celé měření probíhalo v programu TAS7, který uživatele postupně provede všemi kroky. Na monitoru je zobrazeno video snímané NV kamerou. Pro toto měření je obzvláště důležité správně zaostřit MUM 14, NV kameru na čárový test a zvolit správnou spektrální kalibraci. Postupně jsou vyhodnocovány čárové testy. Protože jde o subjektivní metodu, testy byly vyhodnocovány dvěma pozorovateli a jejich výsledky byly zprůměrovány. Níže jsou uvedeny grafy, které srovnávají MRC křivky pro jednotlivé MKZJO při daném osvětlení.



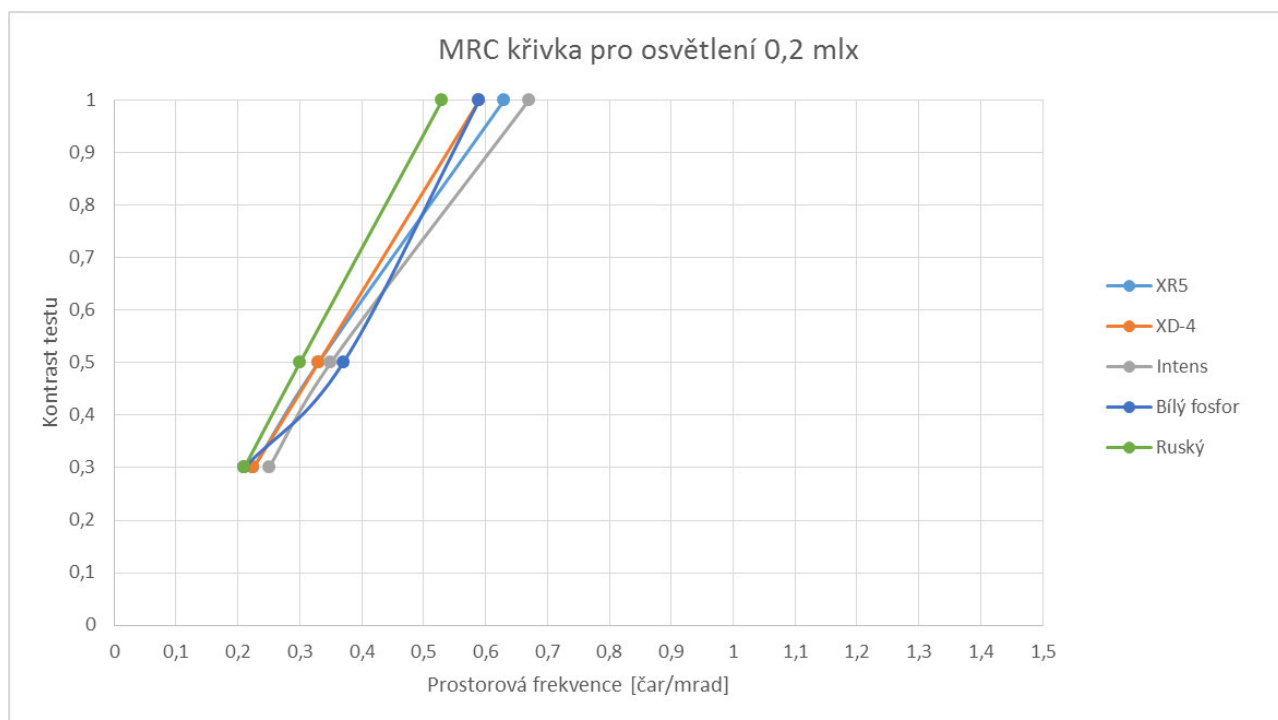
Graf 2: MRC křivka pro osvětlení 40 mlx



Graf 3: MRC křivka pro osvětlení 10 mlx



Graf 4: MRC křivka pro osvětlení 3 mlx



Graf 5: MRC křivka pro osvětlení 0,2 mlx

Z naměřených hodnot MRC křivky je možné vypočítat dosah noktovizoru podle Johnsonova kritéria. Dnes veškeré výpočty probíhají pomocí PC v programu MOVIS, kde je možné vybírat z různých typů atmosférických podmínek a pozorovaných cílů. Výpočet byl proveden pro standardizovaný test typu člověk s kontrastem 1 při standardní atmosféře. Standardní NATO atmosféra je definovaná koeficientem útlumu $\sigma = 0,5$ a hodnotou luminance ratio, což je poměr jasu oblohy k jasu země rovnému 1. Test typu člověk je test o velikosti 1,8 x 0,5 m s kontrastem 1.

Test: MAN ACR, kontrast 1 Atmosférické podmínky: NATO standart atmosphere					
Přístroj	Typ kanálku	Osvětlení [mlx]	Detekce [m]	Rozpoznání [m]	Identifikace [m]
MUM-14	XR5	40	1 160	430	220
MUM-14	XD-4	40	1 110	410	210
MUM-14	Intens	40	1 160	440	230
MUM-14	Bílý fosfor	40	1 040	380	190
MUM-14	Ruský	40	950	350	180
MUM-14	XR5	10	1 000	370	190
MUM-14	XD-4	10	990	360	180
MUM-14	Intens	10	1 070	410	210
MUM-14	Bílý fosfor	10	1 030	360	180
MUM-14	Ruský	10	890	340	180
MUM-14	XR5	3	870	340	180
MUM-14	XD-4	3	890	340	180
MUM-14	Intens	3	950	350	180
MUM-14	Bílý fosfor	3	860	310	160
MUM-14	Ruský	3	750	280	140
MUM-14	XR5	0,2	480	180	100
MUM-14	XD-4	0,2	460	170	90
MUM-14	Intens	0,2	500	190	100
MUM-14	Bílý fosfor	0,2	470	170	90
MUM-14	Ruský	0,2	420	160	80

Tabulka 11: Srovnání dosahu dle Johnsonova kritéria pro kontrast 1

Podle grafů MRC křivky i podle tabulky 11, jsou charakteristiky MKZJO od společnosti Photonis velmi podobné. Avšak MKZJO typu Intens má ve většině charakteristik o trochu lepší výsledky, což se projevilo i při výpočtu dosahu noktovizoru. Na druhou stranu MKZJO od společnosti KATOD rozlišíme při stejných podmínkách nižší prostorové frekvence, a i při porovnání dosahu je na posledním místě. Toto jsou ovšem laboratorní výsledky. V praxi se nesetkáváme s přesně standardizovanou atmosférou, ani s objekty o kontrastu 1. Při pozorování v terénu by se mohly projevit větší odchylky jednotlivých

typů, obzvláště při velmi špatných atmosférických podmínkách a nízkém osvětlení. Vliv kontrastu testu na výpočet dosahu je vidět v tabulce č. 12, kde se výrazně sníží hodnoty pro všechny tři vzdálenosti.

Test: MAN ACR, kontrast 0,4 Atmosférické podmínky: NATO standart atmosphere					
Přístroj	Typ kanálku	Osvětlení [mlx]	Detekce [m]	Rozpoznání [m]	Identifikace [m]
MUM-14	XR5	40	880	330	170
MUM-14	XD-4	40	850	310	160
MUM-14	Intens	40	840	330	170
MUM-14	Bílý fosfor	40	840	310	160
MUM-14	Ruský	40	720	260	130
MUM-14	XR5	10	720	270	140
MUM-14	XD-4	10	750	280	140
MUM-14	Intens	10	720	270	140
MUM-14	Bílý fosfor	10	750	280	150
MUM-14	Ruský	10	660	240	120
MUM-14	XR5	3	590	210	110
MUM-14	XD-4	3	590	220	110
MUM-14	Intens	3	620	240	120
MUM-14	Bílý fosfor	3	650	240	120
MUM-14	Ruský	3	510	190	100
MUM-14	XR5	0,2	240	90	40
MUM-14	XD-4	0,2	240	90	40
MUM-14	Intens	0,2	260	90	50
MUM-14	Bílý fosfor	0,2	240	90	40
MUM-14	Ruský	0,2	220	80	40

Tabulka 12: Dosah noktovizoru dle Johnsonova kritéria pro kontrast 0,4

9.6. SNR

Měření SNR bylo možné provést jak na NVT stanici, tak na měřicí lavici společnosti Meopta – optika. Na NVT stanici probíhalo měření pro celý přístroj MUM 14 s daným typem MKZJO a na měřicí lavici bylo možné ověřit výsledky pro samotný MKZJO. Výsledky měření jsou pak porovnány mezi sebou a s katalogovými parametry Photonisu. V kapitole 9.6.1. je popsáno provedené měření celého přístroje MUM 14 v laboratoři společnosti Pramacom - HT. V další kapitole 9.6.2. je popsáno provedené měření v laboratoři společnosti Meopta – optika. Následně jsou uvedeny výsledky a měření je porovnáváno.

9.6.1. SNR změřené na NVT stanici

Měření SNR probíhá na testu s kruhovou clonou a s halogenovým zdrojem nastaveným na 2 mlx. Výsledné osvětlení je 1,64x menší kvůli útlumu na kruhové cloně. Tento útlum je potřeba zadat do výpočtu, pro správné určení osvětlení. Výstupní obraz z přístroje MUM 14 je pozorován přes NV kameru na monitoru. V programu TAS 7 je zadáno měření SNR. Signál je měřen v oblasti červeného rámečku, kde se v pravém rohu zobrazují digitální jednotky, které zajišťují správné nasycení kanálku. Hodnota by měla být mezi 60 a 120 digitálními jednotkami. Změnou clonového čísla na objektivu NV kamery je zajištěno měření v rozsahu povolených hodnot. Na kruhovém otvoru proběhne měření v minimálně pěti opakování (volitelné), poté je test přesunut na černé pozadí a pokračuje se ve snímání pozadí. Program následně vyhodnotí naměřené hodnoty a zobrazí nám výsledek. Pro každý přístroj bylo provedeno 25 měření a výsledky zprůměrovány.

9.6.2. SNR měřené na měřicí lavici

Samotný MKZJO byl uchycen do nástavce pro napájení. Na halogenovém zdroji bylo nastaveno osvětlení 108 μ lx. Měření probíhá na kruhové cloně, na kterou je důležité dobře zaostřit, jinak dochází k velkým odchylkám v měření. Celé měření probíhá v zcela zatemněné laboratoři. Nejprve je zajištěno nastavením expozice měřicí kamery, správné nasycení obrazu a následně je provedeno měření osvětlené kruhové clony a pozadí, které slouží jako reference. Měřicí kamera je propojena s počítačem a specializovaným programem pro toto měření. V programu proběhne záznam celého měření a výpočet výsledné hodnoty SNR. Pro každý přístroj bylo provedeno jedno měření.

Měřicí lavice není certifikovaný měřicí přístroj. Kvůli ověření správnosti měření bylo provedeno 25 měření různých typů MKZJO. Pro stejných 25 kusů jsou k dispozici výsledky od výrobce, který má certifikované měřicí sestavy. V tabulce níže jsou uvedeny výsledné hodnoty měření SNR a porovnány s hodnotami naměřenými od certifikovaného výrobce.

Výrobní číslo	SNR - Meopta	SNR Photonis	Meopta/Photonis určení koeficientu	Chyba měření [%]
6060244	64,40	23,56	2,73	6,95
6121302	62,69	22,57	2,78	8,68
5430619	54,96	23,50	2,34	-8,49
5430964	63,80	23,88	2,67	4,53
5431409	62,79	22,43	2,80	9,53
5440452	61,10	24,93	2,45	-4,11
5441167	58,21	22,64	2,57	0,60
5441653	53,72	21,88	2,46	-3,94
5441887	67,00	25,03	2,68	4,73
5441915	58,41	24,68	2,37	-7,40
5442171	57,13	24,39	2,34	-8,35
5450257	63,27	24,30	2,60	1,87
5450773	59,60	24,51	2,43	-4,86
5450856	62,01	22,32	2,78	8,70
5450891	56,67	24,98	2,27	-11,24
5451093	59,66	24,78	2,41	-5,80
5451501	59,57	23,80	2,50	-2,07
5451774	63,87	24,87	2,57	0,48
5470965	58,62	23,40	2,51	-1,98
5470987	60,04	23,89	2,51	-1,67
6260838	76,28	29,70	2,57	0,49
5050530	68,83	25,24	2,73	6,70
L490457	82,70	30,34	2,73	6,65
		Průměr:	2,56	

Tabulka 13: Ověření správnosti měření

Z tabulky je zřejmé, že naměřené hodnoty jsou přes koeficient 2,56 úměrné hodnotám naměřeným výrobcem. Na měřicí lavici je možné měřit samotné MKZJO s chybou měření, která nepřesahuje 12 % v porovnání s certifikovanou měřicí sestavou.

9.6.3. Porovnání výsledků hodnot SNR

Společnost Photonis měří samotné MKZJO při osvětlení 108 μlx , stejně tak i společnost Meopta – optika. Měření MKZJO na NVT stanici lze uskutečnit pouze v přístroji, proto je voleno i jiné osvětlení a postup je dodržován dle návodu dodaného výrobcem měřicí stanice. Výsledná hodnota se proto bude lišit nejen kvůli uložení MKZJO v přístroji, ale i kvůli rozdílným měřicím metodám.

Pokud předpokládáme, že jsou všechny kity rovnocenné a měření probíhá pro každý přístroj stejně, je možné porovnat naměřené hodnoty z NVT stanice s hodnotami výrobce a s naměřenými hodnotami z měřicí lavice. Určíme si tedy z několika měření průměrnou hodnotu koeficientu, o kterou se nám liší hodnoty od dodavatele (poměr MKZJO v kitu/samotný MKZJO) a následně vypočteme odchylku provedeného měření na NVT stanici od měření výrobce – společnosti Photonis. Stejná tabulka je vyhotovena i pro srovnání výsledků naměřených na měřicí lavici.

	Pramacom E = 2 mlx	Photonis E = 108 μlx	Meopta E = 108 μlx	Srovnání Pramacom/Photonis	
Typ MKZJO	Hodnota SNR	Hodnota SNR	Hodnota SNR	Koeficient	Odchylka od průměrné hodnoty [%]
Bílý fosfor	38,20	29,70	76,28	1,29	-8,78
XD-4	37,02	25,95	51,26	1,43	1,18
XR5	38,60	25,24	68,83	1,53	8,46
Intens	44,48	30,34	82,70	1,47	3,98
Ruský	35,70		75,37		
		Průměrná hodnota		1,41	

Tabulka 14: Hodnoty SNR a srovnání Pramacom – Photonis

V tabulce č. 14 jsou uvedeny naměřené hodnoty SNR a srovnání hodnot naměřených na NVT stanici v Pramacomu – HT (MKZJO vložen v MUM 14) a naměřených hodnot od výrobce (samotný MKZJO). Dle hodnot koeficientu, měříme na NVT stanici hodnotu SNR přibližně 1,41x větší, než udává výrobce. Větší hodnota SNR je naměřena z důvodu odlišných měřicích podmínek.

Chyba měření byla ověřena i při měření dalších kusů. V tabulce č. 15 je uvedeno provedené měření dvaceti různých kusů MKZJO vložených do přístroje MUM 14. Hodnoty SNR jsou srovnány s hodnotami naměřenými certifikovaným výrobcem. Úměrně přes vypočítaný koeficient, který způsobuje optika přístroje MUM 14 a jiné měřicí postupy, jsme schopni měřit SNR s chybou měření do ± 11 %.

Typ MKZJO	SN	Hodnota SNR	Hodnota SNR Photonis	Pramacom/Photonis	Chyba měření [%]
XW3040R	6260838	38,20	29,70	1,29	-8,83
XX2040ZT	5210564	37,02	25,95	1,43	1,12
XX2540BU	5050530	38,60	25,24	1,53	8,40
XX3040GF	L490457	44,48	30,34	1,47	3,92
XW3040AW	7050657	46,43	32,34	1,44	1,77
XX2040ZT	6201143	31,90	23,26	1,37	-2,79
XX2040ZT	6201770	34,10	23,24	1,47	4,01
XX2040ZT	6222277	33,10	23,70	1,40	-1,00
XX2040ZT	6241758	34,70	24,55	1,41	0,19
XX2040ZT	6211520	35,90	23,09	1,55	10,21
XX2040ZT	6200082	31,50	23,36	1,35	-4,42
XX2040ZT	6060851	32,30	23,41	1,38	-2,20
XX2040ZT	6231427	34,30	23,96	1,43	1,47
XX2040ZT	6211973	31,80	24,74	1,29	-8,89
XX2040ZT	6220818	32,70	23,58	1,39	-1,70
XX2040ZT	6200714	32,70	23,65	1,38	-1,99
XX2040ZT	6160449	34,90	23,78	1,47	4,03
XX2040ZT	6230337	34,80	23,55	1,48	4,75
XX2040ZT	6061071	29,00	22,50	1,29	-8,64
XX2040ZT	6230382	33,50	23,80	1,41	-0,23
XX2040ZT	6221804	35,50	24,96	1,42	0,82
			Průměrná hodnota:	1,41	

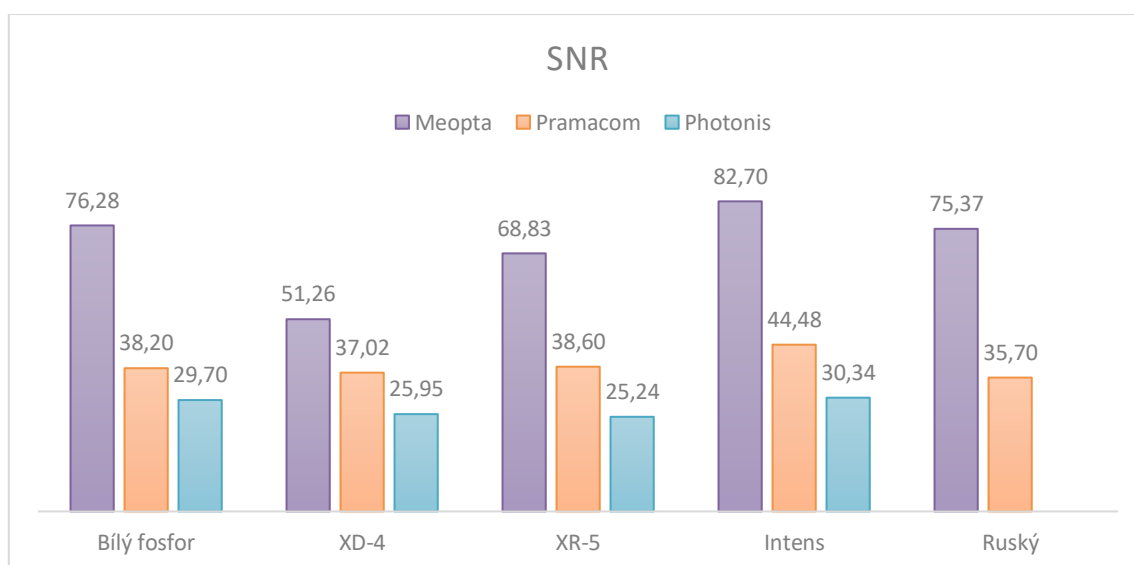
Tabulka 15: Ověření správnosti měření

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty SNR v laboratoři společnosti Meopta – optika.

	Pramacom, E = 2 mlx	Photonis E = 108μlx	Meopta, E = 108μlx	Srovnání Meopta/ Photonis		Srovnání Meopta/ Pramacom	
Typ MKZJO	Hodnota SNR	Hodnota SNR	Hodnota SNR	Koeficient	Odchylka od průměrné hodnoty [%]	Koeficient	Odchylka od průměrné hodnoty [%]
Bílý fosfor	38,20	29,70	76,28	2,57	0,33	2,00	9,30
XD-4	37,02	25,95	51,26	1,98	-22,84	1,38	-24,21
XR5	38,60	25,24	68,83	2,73	6,52	1,78	-2,40
Intens	44,48	30,34	82,70	2,73	6,48	1,86	1,76
Ruský	35,70		75,37			2,11	15,55
		Průměrná hodnota		2,56		1,83	

Tabulka 16: Srovnání SNR Meopta – Photonis, Pramacom - Meopta

V tabulce č. 16 jsou znovu zopakovány naměřené výsledky a srovnány hodnoty naměřené v Meoptě (samotný MKZJO), Photonisu (samotný MKZJO) a v Pramacomu - HT (MKZJO vložen do MUM 14). Při srovnání naměřených hodnot s hodnotami z Meopty je výsledná odchylka okolo 7 %, ale u MKZJO typu XD – 4 je až o 20 % rozdílná. Při justáži MKZJO XD – 4 na měřicí lavici byly potíže s nastavením optimálních měřicích podmínek (saturace snímací kamery). Hodnota SNR u XD – 4 je tedy vnímána s rezervou. Měřicí lavice je stále ve fázi vývoje. I přesto, že bylo změřeno velké množství MKZJO a ověřena velikost chyby je možné, že pro některá měření bude odchylka větší. Proces měření je stále v ověřovací fázi a je možné, že nastala chyba při justáži. Pro lepší přehlednost všech výsledků měření jsou níže uvedeny sloupcové grafy.



Graf 6: Srovnání naměřených hodnot SNR

Čím vyšší poměr SNR, tím je optický přístroj kvalitnější. Podle srovnání má nejvyšší naměřené hodnoty SNR, ve všech laboratořích, MKZJO typu Intens. Podle hodnot Photonisu a naměřených hodnot v Pramacomu - HT je další v pořadí MKZJO Bílý fosfor, pak se pořadí jednotlivých měření začíná lišit.

Parametry, které zásadně ovlivňují hodnotu SNR, jsou – teplota, časový interval měření a rozlišovací schopnost měřicí soustavy. Vzhledem k tomu, že na NVT stanici proběhlo tolik měření, můžeme porovnat rozptyl dílčích hodnot u jednoho přístroje. V tabulce č. 17 je zobrazeno 5 dílčích měření pro MKZJO XR5 vloženém v kitu MUM 14, ze kterých se vyhodnocovala výsledná hodnota SNR.

Číslo měření	Hodnota SNR
1.	40,6
2.	40,5
3.	37,2
4.	36,5
5.	38,2
Průměrná hodnota	38,6

Tabulka 17: Rozptyl hodnot SNR

Pro ilustraci je uveden výpočet hodnoty FOM pro MKZJO XR5, kdy naměříme na NVT stanici minimální hodnotu SNR = 36,5 nebo maximální hodnotu SNR 40,6. Tyto hodnoty normujeme koeficientem 1,53 z tabulky č. 14, který odpovídá MKZJO XR5, aby bylo možné porovnávat hodnoty s hodnotami naměřenými od společnosti Photonis, tedy aby bylo možné odstínit vliv kitu na hodnotu SNR. Následně je vypočtena hodnota FOM pro maximální a minimální hodnotu SNR, která je pronásobena s hodnotou pro středové rozlišení v čarách na milimetr naměřené společností Photonis (pro MKZJO uložen v přístroji není možné určit hodnotu středového rozlišení v čarách na mm). Dále je uveden výpočet hodnoty FOM pro výsledky naměřené ve společnosti Meopta – optika.

XR5	Hodnota SNR	Středové rozlišení [čar/mm]	FOM
Max. SNR Pramacom	26,5	69	1 831
Min. SNR Pramacom	23,9	69	1 646
SNR Photonis	25,2	69	1 742
SNR Meopta	68,8	69	4 749

Tabulka 18: Srovnání parametru FOM

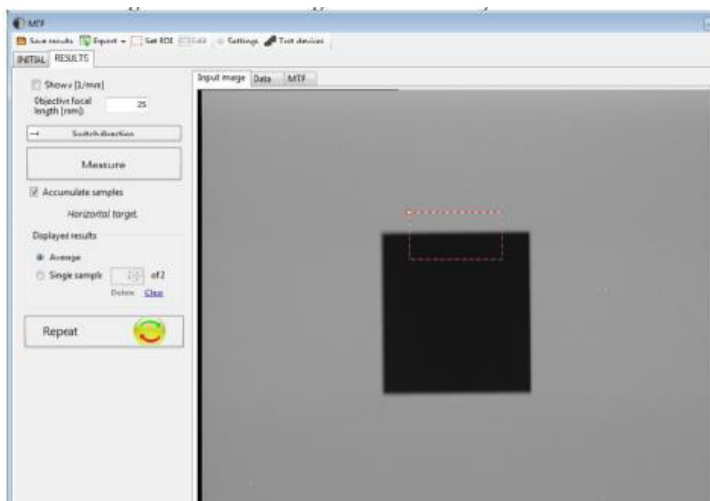
Měření SNR je velmi komplikované a nejednoznačné. Každý výrobce má své vlastní měřicí sestavy, na kterých může hodnota SNR v závislosti na měřicích podmínkách vycházet rozdílně. Tyto hodnoty, ale nejsou nesprávné, pouze odpovídají postupu měření. Jak je vidět v tabulce č. 13 a 15, jsou naměřené hodnoty, v přepočtu přes koeficient, v odchylkách do $\pm 12 \%$. Ovšem různost těchto výsledků zásadně ovlivní výsledek FOM, který je v dnešní době brán jako rozhodující v kvalitě MKZO. Pokud tedy zákazník nezná měřicí podmínky parametru FOM a výsledky jednotlivých měření ve srovnání s ostatními výrobci, není schopen podle parametru FOM vybrat nejlepší MKZO od různých výrobců. Pouze v rámci měření u jednoho výrobce, lze podle parametru FOM hodnotit kvalitu různých typů MKZO.

9.7. MTF

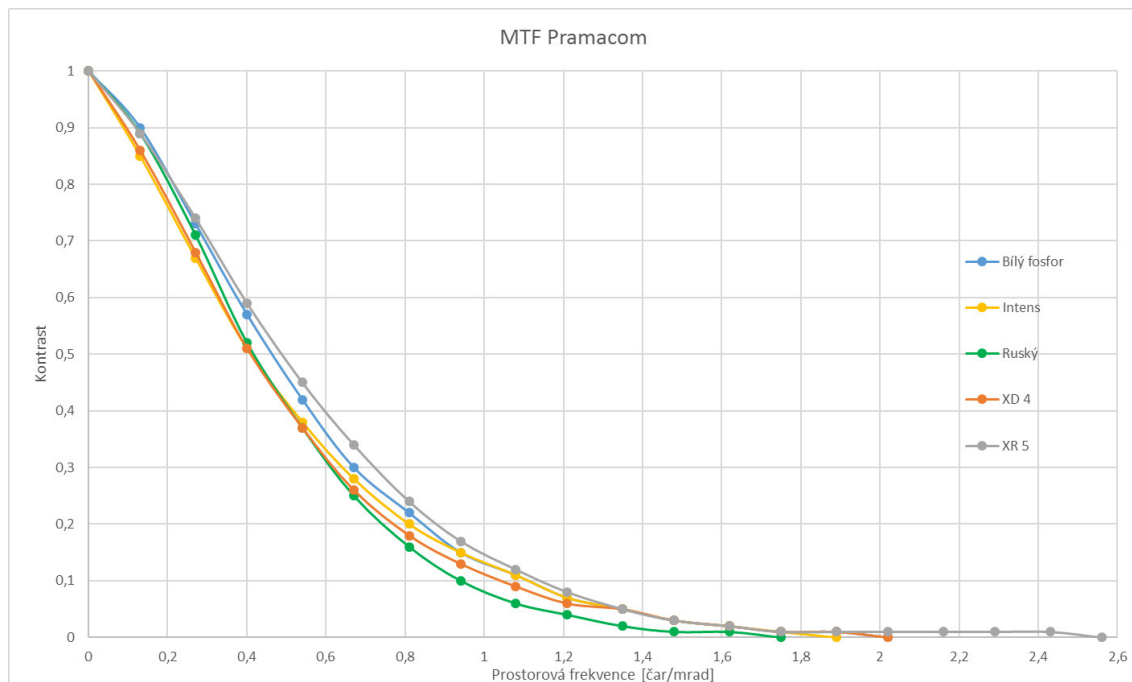
Měření MTF bylo možné provést jak na NVT stanici, tak na měřicí lavici společnosti Meopta – optika. Na NVT stanici probíhalo měření pro celý přístroj MUM 14 s daným typem MKZO a na měřicí lavici bylo možné ověřit výsledky pro samotný MKZO. Výsledky měření jsou uvedeny v grafech.

9.7.1. MTF měřena na NVT stanici

Na NVT stanici je navolen čtvercový test. MUM 14 je umístěn do držáku NVT stanice a výsledný obraz je pozorován na monitoru PC přes NV kameru s clonovým číslem 5,6. Osvětlení fotokatody je nastaveno 3 mlx. V programu TAS7 je zvoleno měření MTF. Je důležité zkontrolovat správné zaostření, aby nedošlo k velké chybě v měření MTF. Na záznamu z NV kamery je označen přechod hrany testu. V ohraničeném obdélníku probíhá matematický výpočet MTF. Obraz je digitálně zaznamenán, poté je nasnímáno pozadí a vypočítána hodnota MTF. Výsledná MTF je dána součinem dílčích hodnot dle vztahu (9). Prostorová frekvence je uvedena v jednotkách [čar/mrad], protože nebyla započítána ohnisková vzdálenost objektivu přístroje.



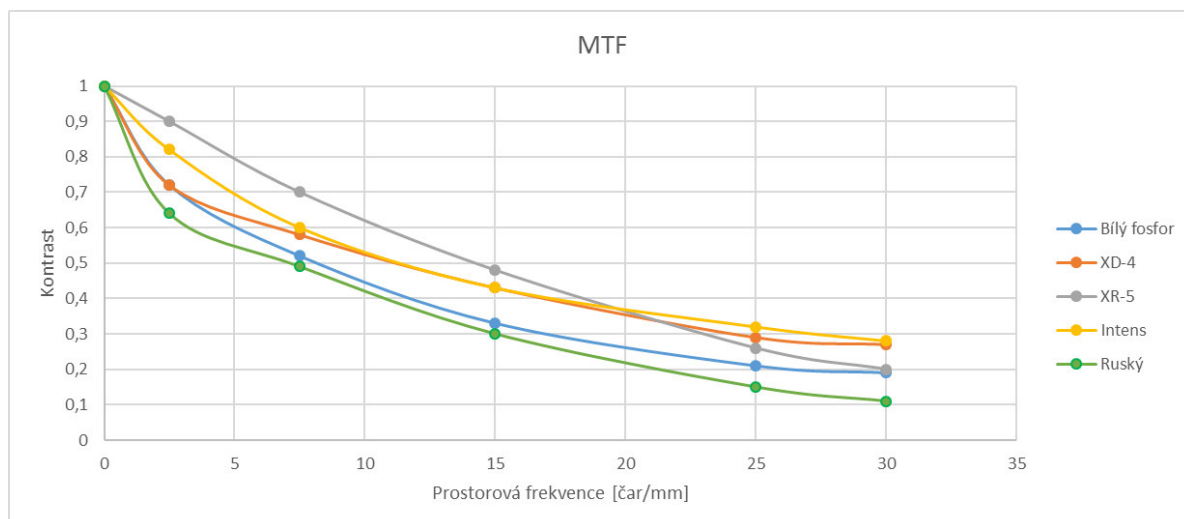
Obrázek 17: Měření MTF, čtvercový test



Graf 7: MTF pro MUM 14 s daným MKZJO – výsledky Pramacom - HT

9.7.2. MTF měřena na měřicí lavici

Samotný MKZJO byl uchycen do nástavce pro napájení. Na halogenovém zdroji bylo nastaveno osvětlení 3,8 mlx. Měření probíhá na obrazu nitkového kříže, na který je důležité dobře zaostřit, jinak dochází k velkým odchylkám v měření. Celé měření probíhá v zcela zatemněné laboratoři. Obraz je snímán měřicí kamerou a vyhodnocen v PC. Vyhodnocení kontrastu probíhá pro prostorovou frekvenci 2,5, 7,5, 15, 25, 30 [čar/mm].



Graf 8: MTF pro samotný MKZJO – výsledky Meopta

Grafy č. 7 a 8 mají rozdílné rozsahy z důvodu jiných jednotek. V grafu č. 7 je změřena hodnota MTF pro celý systém a v grafu č. 8 pouze pro samotný MKZJO.

9.8. EBI

Hodnota EBI nebyla neověřována dalším laboratorním měřením. Níže jsou uvedeny výsledky pro samotné MKZJO z měřicího protokolu od společnosti Photonis. Čím je nižší hodnota EBI, tím je MKZJO kvalitnější tzn., stačí nižší hodnota osvětlení, která bude detekovaná jako signál a ne šum.

Typ	EBI [μx]	Max. povolená [μx]
Bílý fosfor	0,13	0,25
Intens	0,16	0,25
XD - 4	0,17	0,25
XR5	0,19	0,25

Tabulka 19: Hodnoty EBI naměřené společností Photonis

9.9. Halo efekt

Při polním měření bude hodnocen další parametr halo efekt, který ještě nebyl diskutován. Nyní si ho v krátkosti přiblížíme. Halo efekt je aura, která se vyskytuje kolem in-

tenzivního světelného bodového zdroje záření, kdy dojde k přesycení detektoru a přelití energie do vedlejších kanálků. V tabulce níže je uvedena maximální povolená hodnota halo efektu u jednotlivých typů. Halo efekt je výrobcem měřen na bodovém zdroji o velikosti 0,2 – 0,35 mm.

Typ	Halo
	Max. velikost [mm]
Bílý fosfor	0,95
Intens	0,80
XD - 4	0,80
XR5	0,95

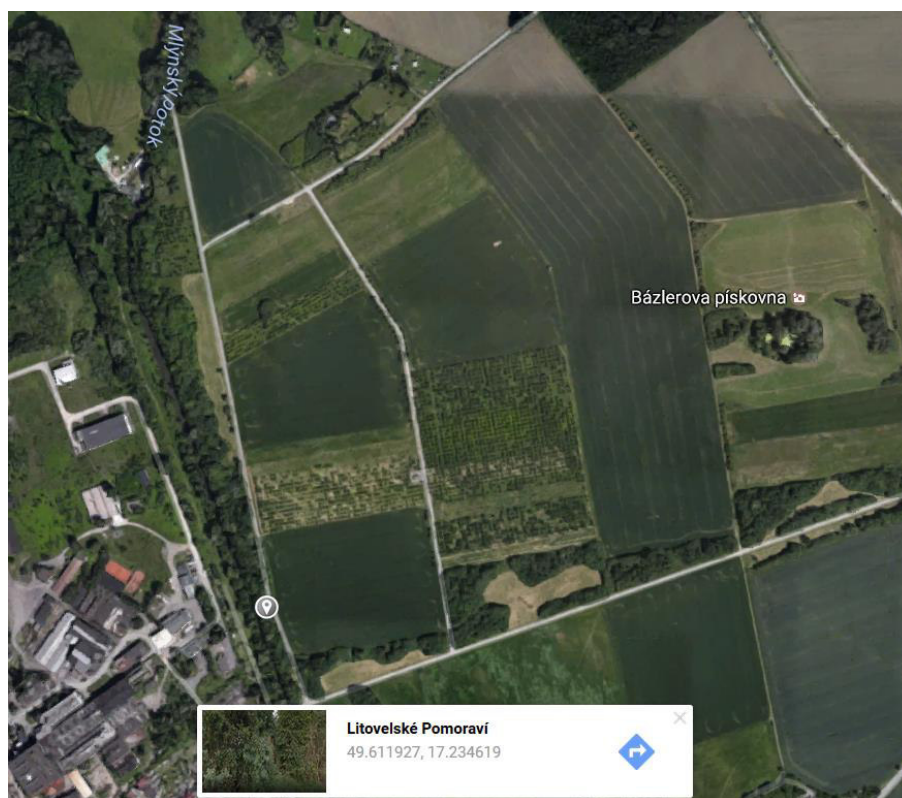
Tabulka 20: Halo efekt



Obrázek 18: Srovnání halo efektu: a) velký halo efekt b) malý halo efekt [2]

10. Měření v terénu

Měření v terénu proběhlo, při různých atmosférických podmínkách celkem 2 x v oblasti Hejčínské cyklostezky, kde je ideální prostředí pro měření detekce.



Obrázek 19: Mapa Hejčínské cyklostezky [12]

Vzdálenost pro detekci byla měřena laserovým dálkoměrem MOSKITO TI od společnosti Vectronix. V tabulce níže jsou uvedeny jeho parametry.

Denní režim	
Zvětšení	6x
Velikost zorného pole	6,25°
Noční režim	
noktovize	
Velikost zorného pole	12°
Laserový dálkoměr	
Třída laseru	1, $\lambda = 1550 \text{ nm}$
Rozsah měření vzdálenosti	10 - 10 000 m
Přesnost	$\pm 2 \text{ m}$

Tabulka 21 : Parametry MOSKITO TI [13]

Každé měření vyhodnocovalo 5-8 pozorovatelů. Testovým objektem byl muž o výšce 180 cm. Testované přístroje MUM 14 byly označeny pouze číslem a pozorovatel nebyl seznámen s kvalitou ani použitými typy MKZJO. Při měření pozorovatel vyplnil dotazník, který měl obsáhnout kvalitativní parametry přístroje. Každá otázka byla bodově ohodnocena, následně byla určena vzdálenost pro detekci. Při určování vzdálenosti pro detekci pozorovatel vyhodnocoval, zda-li rozliší testovaný objekt či ne.

Číslo přístroje:			Bodové hodnocení				
			1	2	3	4	5
šum v obraze							
kontrast obrazu							
halo efekt - aura kolem světelného zdroje							
komfort pozorování (pocit unavených očí,)							
Detekce [m]							
Celkový dojem:							

Tabulka 22: Dotazník

10.1. Měření č.1

Měření č. 1 probíhalo dne 15. 11. 2016, dotazník vyplňovalo 9 pozorovatelů. Pozorovatelé jsou studenti na katedře optiky Univerzity Palackého. Je tedy předpokládáno, že mají s podobným měřením zkušenosti a testovaným přístrojům rozumí.

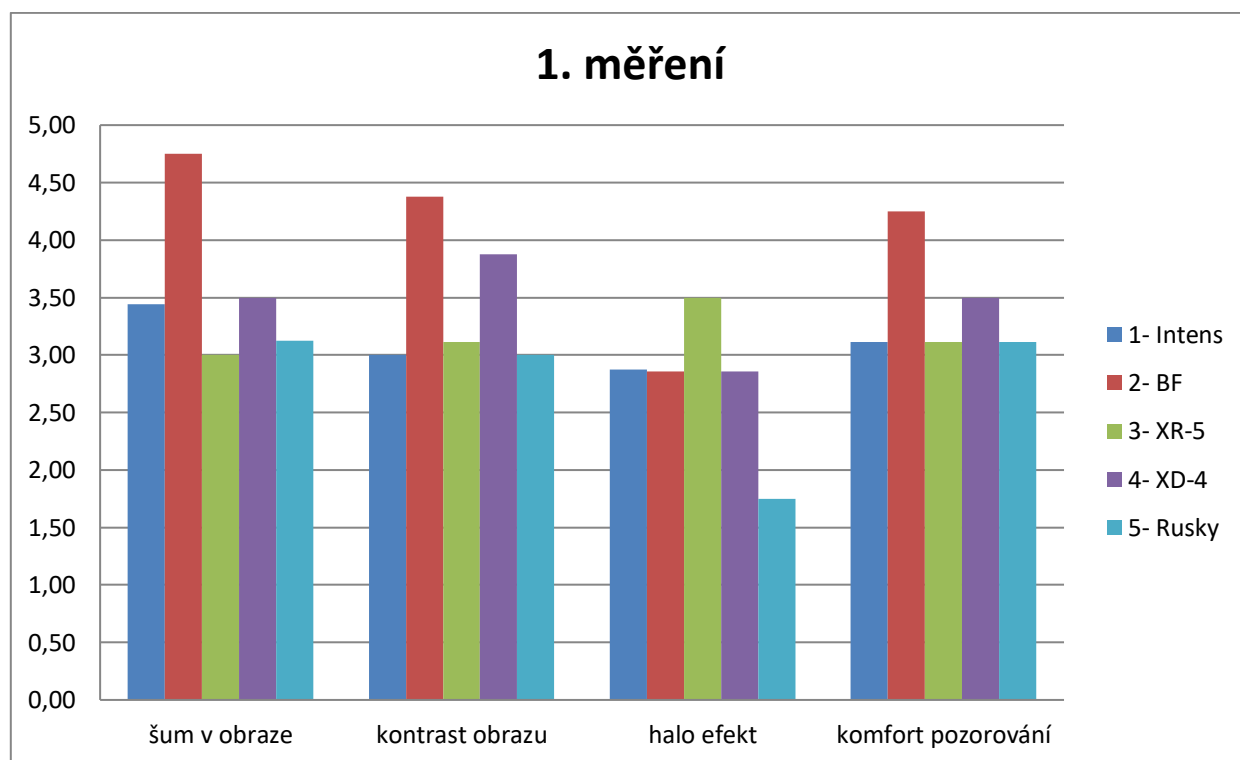
Pozorovací podmínky:

- Měsíc v úplňku, zatažená obloha.
- Viditelnost okem 100 m.
- Začátek měření v 19:00 hodin.
- Konec měření ve 21:00 hodin.

Vzhledem k tomu, že byl úplněk a mraky rozptylovaly záření, nebyla hladina osvětlení příliš nízká. Pro vzdálenost detekce bylo spíše rozhodující kontrastní zobrazení obrazu přístrojem než hodnota jasového zisku. Každý noktovizor byl označen číslicí 1–5. Pozorovatelé nebyli seznámeni s parametry vložených MKZJO.

Typ MKZJO	1- Intens	2-BF	3-XR5	4-XD-4	5-Rusky
šum v obraze	3,44	4,75	3,00	3,50	3,13
kontrast obrazu	3,00	4,38	3,11	3,88	3,00
halo efekt	2,88	2,86	3,50	2,86	1,75
komfort pozorování	3,11	4,25	3,11	3,50	3,11
Detekce [m]	537,44	536,88	527,11	538,50	537,86

Tabulka 23: Výsledky 1. měření



Graf 9: Grafické vyhodnocení 1. měření

Nejlépe byl hodnocen noktovizor MUM 14 s vloženým MKZJO Bílý fosfor. To potvrzují i naměřené laboratorní výsledky – nejvyšší hodnota SNR a dobrý přenos MTF ve srovnání s ostatními MKZJO vloženými v přístroji. Kvalita MUM 14 s MKZJO Intens, XD – 4, XR5 a Ruský vychází skoro ve všech kategoriích srovnatelně. Vzhledem k tomu,

že byla celkem dobrá viditelnost a světlo bylo rozptylováno mraky, nebyl zapotřebí vysoký jasový zisk ani vysoká hodnota SNR. MKZJO Intens má druhou nejvyšší hodnotu jasového zisku a druhou nejvyšší hodnotu SNR. Tyto kvality by se mohly více projevit za horších světelných podmínek.

Halo efekt hodnotíme při pozorování rozsvícené baterky na vzdálenost 30 m. Na tomto zdroji záření pozorovatelé hodnotili velikost aury okolo světelného zdroje. Podle hodnocení má nejmenší halo MUM 14 s MKZJO XR5 a největší halo má MUM 14 s MKZJO Ruský.

Ve vzdálenosti pro detekci nejsou příliš velké rozdíly. To je dáno prostředím, ve kterém měření probíhalo. Při vzdálenosti větší jak 500 m testovaný objekt zašel do stinného místa, kde byly v pozadí stromy. V takovém prostředí rozhodoval kontrast a na pár metrech se pozorovatelům úplně ztratil cíl. Při horších jasových podmínkách je očekáván viditelnější rozestup kvality jednotlivých typů.



Obrázek 20: Hodnocení Johnsonova kritéria v terénu

10.2. Měření č. 2

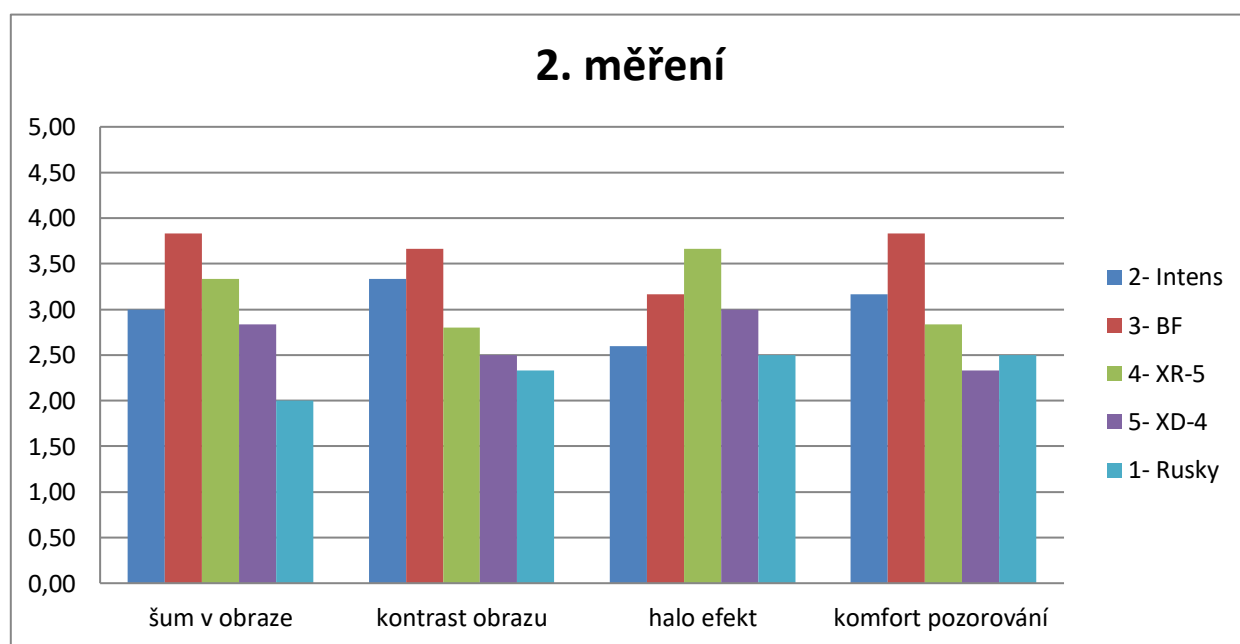
Měření č. 2 probíhalo dne 29. 11. 2016, dotazník vyplňovalo 6 pozorovatelů, kteří jsou studenti na katedře optiky Univerzity Palackého a prováděli i měření č. 1. Čísla, kterými byly přístroje označeny, byla změněna, aby nedošlo k ovlivnění pozorovatelů.

Pozorovací podmínky:

- Měsíc ve fázi NOV, jasná obloha.
- Viditelnost okem 43 m.
- Začátek měření v 19:00 hodin.
- Konec měření ve 21:00 hodin.

Typ MKZJO	2- Intens	3- BF	4- XR5	5- XD-4	1- Rusky
šum v obraze	3,00	3,83	3,33	2,83	2,00
kontrast obrazu	3,33	3,67	2,80	2,50	2,33
halo efekt	2,60	3,17	3,67	3,00	2,50
komfort pozorování	3,17	3,83	2,83	2,33	2,50
Detekce [m]	391,20	379,33	337,60	355,60	363,80

Tabulka 24: Výsledky 2. měření

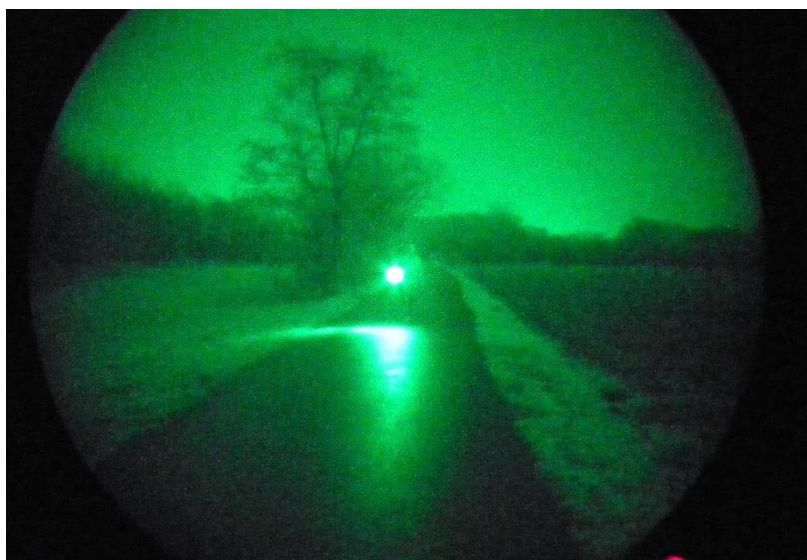


Graf 10: Grafické vyhodnocení 2. měření

Při horších světelných podmínkách se projevil větší rozestup mezi kvalitou jednotlivých kusů. Pro všechny přístroje byly naměřeny menší vzdálenosti pro detekci – maximálně 391 m. V měření č. 1 byla maximální vzdálenost 538 m.

V měření č. 2 byl pozorovateli, ve většině kategoriích, vyhodnocen jako nejlepší MUM 14 s MKZJO Bílý fosfor. Vzdálenost na detekci má přibližně o 10 m menší než MUM 14 s MKZJO Intens, kterým byl cíl detekován nejdále. Oproti očekávání je na 3. místě pro vzdálenost detekce MUM 14 s MKZJO Ruský. V laboratorních testech se ukázal většinou jako nejméně kvalitní ovšem s největším jasovým ziskem. Tento parametr může za nízkého osvětlení hrát velkou roli. I když má MUM 14 s MKZJO Ruský nejhorší subjektivní hodnocení pozorovateli pro šum v obraze a kontrast obrazu, jasový zisk byl dostatečný pro rozlišení i velmi vzdáleného cíle.

Podle hodnocení má opět nejmenší halo MUM 14 s MKZJO XR5 a největší halo má MUM 14 s MKZJO Ruský. Změna atmosférických podmínek neměla velký vliv na tento parametr.



Obrázek 21: Halo MKZJO Intens

11. Závěr

V této diplomové práci byly postupně porovnány parametry jednotlivých MKZJO naměřené v různých laboratořích. Byly uvedeny základní měřicí sestavy a postupy měření. U každého měření jsou podrobně rozepsány výsledky a porovnány mezi sebou. Nyní uvedu ještě krátké resumé.

U MKZJO od Ruské společnosti se ukázalo, že má nejvyšší jasový zisk, ale při měření MRC křivky v laboratoři, při velmi nízkých úrovních osvětlení, se více projevil vliv poměru SNR a daný objekt nebyl rozlišen. I podle vypočítaného Johnsonova kritéria má nejkratší vzdálenost pro detekci. Ovšem při druhém testování v terénu byl oproti očekávání na 3. místě ve vzdálenosti pro detekci. Tento MKZJO je ve všech laboratorních měřeních výrazně oddělen od MKZJO společnosti Photonis. Při subjektivním hodnocení pozorovatelů vychází jako nejméně kvalitní.

MKZJO od společnosti Photonis mají většinu charakteristik naměřených v laboratoři blízko u sebe. MKZJO XD-4 je základní varianta, která nevyniká v žádné z naměřených hodnot. Má definovaný nižší jasový zisk a poměr SNR, ale příliš nezaostává v naměřených charakteristikách za ostatními přístroji.

Typ XR5 a MKZJO s Bílým fosforem mají podobné výsledky. MKZJO s bílým fosforem má sice integrovaný nižší jasový zisk, ale v MRC charakteristice je vidět, že i při nižším jasu dohání typ XR5 a při výpočtu Johnsonova kritéria dosahují podobných hodnot pro detekci. Ovšem MKZJO Bílý fosfor byl při měření v terénu pozorovateli hodnocen jako nejlepší.

MKZJO typu Intens má druhý nejvyšší jasový zisk a hodnotu SNR. Při všech laboratorních měřeních vycházel jako jeden z nejlepších a při testování v terénu dosahoval největší vzdálenosti pro detekci.

Dále byl v této diplomové práci diskutován parametr FOM jako hlavní parametr rozhodující o kvalitě MKZJO. Jak už bylo řečeno je u tohoto parametru problematické určovat na různých měřicích sestavách stejné hodnoty SNR. Každý výrobce dodává své na-

měřené hodnoty, které se mohou od sebe výrazně lišit. To znemožňuje porovnávání různých typů MKZJO od různých výrobců. Výrobce MKZJO Photonis dodává ke každému typu jeden hlavní měřicí protokol, kde jsou zprůměrovány výsledky měření, které jsou obvyklé pro každý kus daného typu. V tomto protokolu se objevuje charakteristika MTF, životnost MKZJO a maximální a minimální hodnoty základních parametrů, které by měl každý kus daného typu dodržet. Pro běžného uživatele – laika by mohlo být přehlednější, kdyby do takového protokolu byla zahrnuta i MRC charakteristika s výpočtem Johnsonova kritéria, která by jasně znázornila kvality jednotlivých typů. V příloze diplomové práce jsou uvedeny měřicí protokoly testovaných MKZJO od společnosti Photonis.



Obrázek 22: Testované MKZJO

Citovaná literatura

- [1] J. Komenda a Baláž, 14 květen 2010. [Online]. Available: <http://www.rucevzhuru.cz/index.php/technika/208-noktovizory-a-jejich-generace.html>. [Přístup získán 02 únor 2017].
- [2] K. CHRZANOWSKI, „Review of night vision technology,“ *OPTO-ELECTRONICS REVIEW*, č. 2, 2013.
- [3] A. Parush, M. Gauthier, L. Arseneau a D. Tang, „The Human Factors of Night Vision Goggles: Perceptual, Cognitive, and Physical factors,“ *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, září 2011.
- [4] J. Reichl a M. Všetická, „Encyklopedie fyziky,“ 2006-2007. [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>. [Přístup získán 19 02 2017].
- [5] C. Ing. Miroslav Jedlička, „Fotonásobiče (2),“ *Světlo*, pp. 50-53, 1 2010.
- [6] J. PAN, J. LV, Z. ZHANG, J. SUN a D. SU, „Ion Feedback Suppression for Microchannel Plate,“ *Chinese Journal of Electronics*, č. 19, 2010.
- [7] J. L. WIZA, „MICROCHANNEL PLATE DETECTORS,“ *Nuclear Instruments and Methods*, č. 162, 1979.

- [8] W. Zhu, Vacuum Microelectronics, John Wiley and sons, 2001.

- [9] L. A. Bosch, „Image intensifier tube performance is what matters,“ Delft Electronic Products B.V., Roden.

- [10] STANAG 4351, Mesurement of the minimum resolvable contrast, 1987.

- [11] STANAG 4348, Definition of nominal static range performance for image intensifier systems, 1988.

- [12] „Google maps,“ Google, 2017. [Online]. Available: <https://www.google.cz/maps/place/Gymn%C3%A1zium+Olomouc-Hej%C4%8D%C3%ADn/@49.6154896,17.2361372,1633m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47124efb3b00d64b:0x4bcd814f2c462260!8m2!3d49.6023573!4d17.2385303>. [Přístup získán 15 01 2017].

- [13] „Vectronix MOSKITO TI,“ 2015. [Online]. Available: <http://moskitoti.vectronix.ch/assets/brochure/en.pdf>. [Přístup získán 15 leden 2017].

Seznam obrázků

Obrázek 1: Záznam obrazu z termokamery v oblasti LWIR	10
Obrázek 2: Záznam obrazu z noktovizoru	10
Obrázek 3: Mikrokanálkový zesilovač jasů obraz (MKZJO) [3]	12
Obrázek 4: Spektrální citlivost různých materiálů fotokatody [5]	14
Obrázek 5: Mikrokanálková destička (MCP) [7]	14
Obrázek 6: MUM 14	17
Obrázek 7: MUM 14 v duálním úchytu	16
Obrázek 8: Montáž MUM 14	17
Obrázek 9: Rozdělení zorného pole	17
Obrázek 10: Uspořádání měření pro hodnotu EBI	22
Obrázek 11: Měřicí lavice	26
Obrázek 12: Testové obrazce	27
Obrázek 13: NVT Stanice	28
Obrázek 14: Testový obrazec pro kontrolu nečistot	30
Obrázek 15: Test pro určení velikosti zorného pole	32
Obrázek 16: Reálná velikost stupnice	33
Obrázek 17: Měření MTF, čtvercový test	47
Obrázek 18: Srovnání halo efektu	49
Obrázek 19: Mapa Hejčínské cyklostezky	50
Obrázek 20: Hodnocení Johnsonova kritéria v terénu	53

Obrázek 21: Halo MKZJO Intens

55

Obrázek 22: Testované MKZJO

57

Seznam grafů

Graf 1: Spektrální emise vybraných typů fosforu [2]	16
Graf 2: MRC křivka pro osvětlení 40 mlx	36
Graf 3: MRC křivka pro osvětlení 10 mlx	36
Graf 4: MRC křivka pro osvětlení 3 mlx	37
Graf 5: MRC křivka pro osvětlení 0,2 mlx	37
Graf 6: Srovnání naměřených hodnot SNR	44
Graf 7: MTF pro MUM 14 s daným MKZJO – výsledky Pramacom - HT	47
Graf 8: MTF pro samotný MKZJO – výsledky Meopta	48
Graf 9: Grafické vyhodnocení 1. měření	52
Graf 10: Grafické vyhodnocení 2. měření	54

Seznam tabulek

Tabulka 1: Různé typy luminoforu	15
Tabulka 2: Seznam spárovaných SN	18
Tabulka 3: Seznam měřených MKZJO a jejich parametry	19
Tabulka 4: Spektrální koeficient	29
Tabulka 5: Povolené velikosti nečistot	30
Tabulka 6: Kontrola nečistot	31
Tabulka 7: Velikost ZP	32
Tabulka 8: Hodnota zvětšení	33
Tabulka 9: Hodnoty jasového zisku	33
Tabulka 10: Osvětlení v noci	35
Tabulka 11: Srovnání dosahu dle Johnsonova kritéria pro kontrast 1	38
Tabulka 12: Dosah noktovizoru dle Johnsonova kritéria pro kontrast 0,4	39
Tabulka 13: Ověření správnosti měření	41
Tabulka 14: Hodnoty SNR a srovnání Pramacom – Photonis	42
Tabulka 15: Ověření správnosti měření	43
Tabulka 16: Srovnání SNR Meopta – Photonis, Pramacom - Meopta	44
Tabulka 17: Rozptyl hodnot SNR	45
Tabulka 18: Srovnání parametru FOM	45
Tabulka 19: Hodnoty EBI naměřené společností Photonis	48
Tabulka 20: Halo efekt	49

Tabulka 21 : Parametry MOSKITO TI	50
Tabulka 22: Dotazník	51
Tabulka 23: Výsledky 1. měření	52
Tabulka 24: Výsledky 2. měření	54

Image Intensifier specification
18 millimetre micro-channel wafer
XD-4™ Technology
XX2040ZT



184-5980A0

Page 1 of 3

Description

The Image Intensifier Assembly, 18 millimetres micro-channel wafer, shall have a minimum useful photocathode and phosphor screen diameter of 17.5 millimetres (mm). The assembly shall employ a micro-channel electron multiplier plate with proximity focus on the input and output. The assembly shall include the high voltage multiplier and oscillator and shall be encapsulated within a hard surface insulating sleeve or boot and assembled in a hard plastic housing. The tube is equipped with **AUTO-GATING**

Phosphor : P22
Input window : Glass
Output window : Inverting fibre-optic

Construction

The assembly shall be fabricated in accordance with the applicable drawing.

Limiting values

	<u>Minimal</u>	<u>Maximal</u>	<u>Unit</u>
Continuous input Supply voltage	2.0	3.5	V
Reversed Polarity (60 sec)	-3.7	+3.7	V
Storage temperature (4 hours max.)	-56	+70	°C
Storage temperature long term	-35	+35	°C
Operating temperature (4 hours max.)	-52	+52	°C
Force on bearing surface		200	N

Operating conditions and characteristics

Operating Supply voltage : 2.7 V
Ambient temperature : 20 ± 1°C

When the image intensifier is operated under the conditions mentioned above, unless otherwise specified, the characteristic values that follow are attainable:

Date
28th of April 2014

Signed
EP

Checked
OR

184-5980A0

Image Intensifier specification 18 millimetre micro-channel wafer XD-4™ Technology XX2040ZT			184-5980A0	
			Page 2 of 3	
	Minimal	Typical	Maximal	UNIT
FOM	1500			
Signal to noise ratio	20			
(Photocathode illuminance 108 µlx)				
Operational life time	10000			
Gain at 2.10 ⁻⁵ lx	9000		15000	cd/m ² /lx
Gain at 2.10 ⁻⁶ fc	(28250)		(47100)	fl/fc
Maximum Output Brightness	6		10	cd/m ²
Maximum Output Brightness	(1.7)		(2.9)	fl
Input current at 2.10 ⁻⁵ lx			35	mA
Limiting resolution at centre	60			lp/mm
Luminance dynamic range	1x10 ⁻⁶		5x10 ⁴	lux
M.T.F. at 2.5 lp/mm		92		%
at 7.5 lp/mm		80		%
at 15 lp/mm		58		%
at 25 lp/mm		45		%
at 30 lp/mm		35		%
E.B.I.			0.25	µlx
Burn-in	50			hours
Image inversion	179		181	°
Shear distortion			50	µm
Gross distortion			65	µm
Useful cathode diameter	17.5			mm
Output uniformity over Ø17.0 mm at 2850K			3:1	
Bright source protection				
50 millilumens on an area of 1 mm ²	60			sec
Fixed Pattern Noise at 2mlx				
(mean luminance deviations)	-10		+10	%
Halo (illumination spot 0.2mm)			0.8	mm
Image alignment			0.3	mm
Mass			85	gram
Date	Signed	Checked	184-5980A0	
28 th of April 2014	EP	OR		

Shock:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being exposed to 6 shock impacts parallel to and 6 shock impacts perpendicular to the optical axis. Impacts shall be half sine waves with a minimum peak amplitude of 500 g's and a duration of 2 ± 0.2 milliseconds.

Vibration:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being subjected to vibration conditions parallel to and perpendicular to the optical axis over a frequency range of 5 to 55 hertz (Hz), 2.54mm amplitude 10 cycles in each plane.

Spots:

Maximum number of dark spots will be according to the following table:

SPOTS DIAMETER IN MICROMETERS	ZONE 1 dia. 5.6mm	ZONE 2 dia. 5.6mm-14.7mm	ZONE 3 dia 14.7mm-17.5mm
> 380	0	0	0
300 – 380	0	0	0
230 – 300	0	0	1
150 – 230	0	1	2
75 – 150	1	2	3
< 75	Minimal	Minimal	Minimal

In case the assembly has more numerous dark spots of smaller dimension within a zone, the total quantity of dark spots in the zone should be within the total quantity of dark spots in the considered zone as specified in the above table.

For example, if a tube is showing [3 Ø75-150µm] dark spots in zone 2 instead of the [2 Ø75-150µm + 1 Ø150-230µm] specified ones, the tube will be considered to be compliant with the specification.

Image Intensifier specification
18 millimetre micro-channel wafer
XR5™ Technology
XX2540BU



184-3933A2

Page 1 of 3

Description

The Image Intensifier Assembly, 18 millimetres micro-channel wafer, shall have a minimum useful photocathode and phosphor screen diameter of 17.5 millimetres (mm). The assembly shall employ a micro-channel electron multiplier plate with proximity focus on the input and output. The assembly shall include the high voltage multiplier and oscillator and shall be encapsulated within a hard surface insulating sleeve or boot and assembled in a hard plastic housing. The tube is equipped with **AUTO-GATING**

Phosphor : P22
Input window : Glass
Output window : Inverting fibre-optic

Construction

The assembly shall be fabricated in accordance with the applicable drawing.

Limiting values

	<u>Minimal</u>	<u>Maximal</u>	<u>Unit</u>
Continuous input Supply voltage	2.0	3.5	V
Reversed Polarity (60 sec)	-3.7	+3.7	V
Storage temperature (4 hours max.)	-56	+65	°C
Storage temperature long term	-35	+35	°C
Operating temperature (4 hours max.)	-52	+52	°C
Force on bearing surface		200	N

Operating conditions and characteristics

Operating Supply voltage : 2.7 V
Ambient temperature : 20 ± 1°C

When the image intensifier is operated under the conditions mentioned above, unless otherwise specified, the characteristic values that follow are attainable:

Date
July 17, 2015

Signed
EB

Checked
BJE

184-3933A2

Image Intensifier specification
18 millimetre micro-channel wafer
XR5™ Technology
XX2540BU



184-3933A2

Page 2 of 3

	Minimal	Typical	Maximal	UNIT
Cathode sensitivity at 2850K	700			μA/lm
Radiant sensitivity at 830nm	60			mA/W
Signal to noise ratio	25			
(Photocathode illuminance 108 μlx)				
Operational life time	15000			hours
Gain at 2.10 ⁻⁵ lx	10000	13000	16000	cd/m ² /lx
Gain at 2.10 ⁻⁶ fc	(31400)	(40800)	(50250)	fl/fc
Maximum Output Brightness	6	8	10	cd/m ²
Maximum Output Brightness	(1.2)	(1.7)	(2.3)	fl
Input current at 2.10 ⁻⁵ lx			35	mA
Limiting resolution at centre	64			lp/mm
Luminance dynamic range	1x10 ⁻⁶		5x10 ⁴	lux
M.T.F. at 2.5 lp/mm		94		%
at 7.5 lp/mm		85		%
at 15 lp/mm		70		%
at 25 lp/mm		50		%
at 30 lp/mm		40		%
E.B.I.			0.25	μlx
Burn-in	50			hours
Image inversion	179		181	°
Shear distortion			50	μm
Gross distortion			65	μm
Useful cathode diameter	17.5			mm
Output uniformity over Ø17.0 mm at 2850K			3:1	
Bright source protection				
50 millilumens on an area of 1 mm ²	60			sec
Fixed Pattern Noise at 2mlx				
(mean luminance deviations)	-8		+8	%
Halo (illumination spot 0.35mm)			0.95	mm
Image alignment			0.3	mm
Mass		80	85	gram

Date
July 17, 2015

Signed
EB

Checked
BJE

184-3933A2

Shock:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being exposed to 6 shock impacts parallel to and 6 shock impacts perpendicular to the optical axis. Impacts shall be halve sine waves with a minimum peak amplitude of 500 g's and a duration of 2 ± 0.2 milliseconds.

Vibration:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being subjected to vibration conditions parallel to and perpendicular to the optical axis over a frequency range of 5 to 55 hertz (Hz), 2.54mm amplitude 10 cycles in each plane.

Spots:

Maximum number of dark spots will be according to the following table:

SPOTS DIAMETER IN MICROMETERS	ZONE 1 dia. 5.6mm	ZONE 2 dia. 5.6mm-14.7mm	ZONE 3 dia 14.7mm-17.5mm
> 380	0	0	0
300 – 380	0	0	0
230 – 300	0	0	0
150 – 230	0	1	1
75 – 150	0	2	2
< 75	Minimal	Minimal	Minimal

In case the assembly has more numerous dark spots of smaller dimension within a zone, the total quantity of dark spots in the zone should be within the total quantity of dark spots in the considered zone as specified in the above table.

For example, if a tube is showing [3 Ø75-150µm] dark spots in zone 2 instead of the [2 Ø75-150µm + 1 Ø150-230µm] specified ones, the tube will be considered to be compliant with the specification.

Image Intensifier specification
18 millimetre micro-channel wafer

184-5513A0

XX3040GF

Page 1 of 3

Description

The Image Intensifier Assembly, 18 millimetres micro-channel wafer, shall have a minimum useful photocathode and phosphor screen diameter of 17.5 millimetres (mm). The assembly shall employ a micro-channel electron multiplier plate with proximity focus on the input and output. The assembly shall include the high voltage multiplier and oscillator and shall be encapsulated within a hard surface insulating sleeve or boot and assembled in a hard plastic housing. The tube is equipped with **AUTO-GATING**

Technology : INTENS
Phosphor : P22
Input window : Glass (AVG)
Output window : Inverting fibre-optic

Construction

The assembly shall be fabricated in accordance with the applicable drawing.

Limiting values

	<u>Minimal</u>	<u>Maximal</u>	<u>Unit</u>
Continuous input Supply voltage	2.0	3.5	V
Reversed Polarity (60 sec)	-3.7	+3.7	V
Storage temperature (4 hours max.)	-56	+65	°C
Storage temperature long term	-35	+35	°C
Operating temperature (4 hours max.)	-52	+52	°C

Operating conditions and characteristics

Operating Supply voltage : 2.7 V
Ambient temperature : 20 ± 1°C

When the image intensifier is operated under the conditions mentioned above, unless otherwise specified, the characteristic values that follow are attainable:

Date
20.09.2012

Signed
BJE

Checked
OR

184-5513A0

PHOTONIS

Property of the Photonis Group.
Reproduction, or disclosure to third parties,
in any form whatsoever not allowed without
written consent of Photonis.

Propriété du groupe Photonis.
La reproduction ou la diffusion à une tierce partie, sous
quelque forme que ce soit, sans accord écrit de
Photonis, est strictement interdite.

Eigendom van de Photonis Groep.
Vermenigvuldigen of mededeling aan derden, in welke
vorm ook is zonder schriftelijke toestemming van
Photonis niet geoorloofd.

Image Intensifier specification 18 millimetre micro-channel wafer			184-5513A0	
XX3040GF			Page 2 of 3	
	Minimal	Typical	Maximal	UNIT
FOM	1800	2200		
Signal to noise ratio	28	31		
(Photocathode illuminance 108 µlx)				
Operational life time	10000	15000		hours
Gain at 2.10 ⁻⁵ lx	15000		20000	cd/m ² /lx
Gain at 2.10 ⁻⁶ fc	(47120)		(62830)	fL/fc
Maximum Output Brightness	6		10	cd/m ²
Maximum Output Brightness	(1.7)		(2.9)	fL
Input current at 2.10 ⁻⁵ lx		30	35	mA
Limiting resolution at centre	64	72		lp/mm
Limiting resolution at >100 mlux	55			lp/mm
(=autogating mode)				
Luminance dynamic range	1x10 ⁻⁶		5x10 ⁴	lux
M.T.F. at 2.5 lp/mm		94		%
at 7.5 lp/mm		85		%
at 15 lp/mm		70		%
at 25 lp/mm		50		%
at 30 lp/mm		40		%
E.B.I.		0.15	0.25	µlx
Burn-in	50			hours
Image inversion	179		181	°
Shear distortion			50	µm
Gross distortion			65	µm
Useful cathode diameter	17.5			mm
Output uniformity over Ø17.0 mm at 2850K			3:1	
Bright source protection				
50 millilumens on an area of 1 mm ²	60			sec
Fixed Pattern Noise at 2mlx				
(mean luminance deviations)	-10		+10	%
Halo (illumination spot 0.2mm)		0.60	0.80	mm
Image alignment			0.30	mm
Mass			80	gram
Date	Signed	Checked	184-5513A0	
20.09.2012	BJE	OR		

Image Intensifier specification
18 millimetre micro-channel wafer

184-5513A0

XX3040GF

Page 3 of 3

Shock:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being exposed to 6 shock impacts parallel to and 6 shock impacts perpendicular to the optical axis. Impacts shall be half sine waves with a minimum peak amplitude of 500 g's and a duration of 2 ± 0.2 milliseconds.

Vibration:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being subjected to vibration conditions parallel to and perpendicular to the optical axis over a frequency range of 5 to 55 hertz (Hz), 2.54mm amplitude 10 cycles in each plane.

Spots:

Maximum number of dark spots will be according to the following table:

SPOTS DIAMETER IN MICROMETERS	ZONE 1 dia. 5.6mm	ZONE 2 dia. 5.6mm-14.7mm	ZONE 3 dia 14.7mm-17.5mm
> 380	0	0	0
300 – 380	0	0	0
230 – 300	0	0	1
150 – 230	0	1	2
75 – 150	1	2	3
< 75	Minimal	Minimal	Minimal
		+ zone 1 spots	+ zone 2 spots

The number of spots are considered as cumulative within a zone and between zones. For example, a tube with 3 spots of 75-150 μm in zone 2 would be within specification. Also a tube with 3 spots of 75-150 μm , 1 spot of 150-230 μm , and no spot in zone 1 would be within specification.

Date
20.09.2012

Signed
BJE

Checked
OR

184-5513A0

Image Intensifier specification
18 millimetre micro-channel wafer
INTENS™ Technology
XW3040R



184-6661A0

Page 1 of 3

Description

The Image Intensifier Assembly, 18 millimetres micro-channel wafer, shall have a minimum useful photocathode and phosphor screen diameter of 17.5 millimetres (mm). The assembly shall employ a micro-channel electron multiplier plate with proximity focus on the input and output. The assembly shall include the high voltage multiplier and oscillator and shall be encapsulated within a hard surface insulating sleeve or boot and assembled in a hard plastic housing. The tube is equipped with an **AUTO-GATING** Power Supply Unit.

Phosphor : P45
Input window : Glass (AVG)
Output window : Inverting fibre-optic

Construction

The assembly shall be fabricated in accordance with the applicable drawing.

Limiting values

	<u>Minimal</u>	<u>Maximal</u>	<u>Unit</u>
Continuous input Supply voltage	2.0	3.5	V
Reversed Polarity (60 sec)	-3.7	+3.7	V
Storage temperature (4 hours max.)	-56	+65	°C
Storage temperature long term	-35	+35	°C
Operating temperature (4 hours max.)	-52	+52	°C

Operating conditions and characteristics

Operating Supply voltage : 2.7 V
Ambient temperature : 20 ± 1°C

The tube as component without external components or wires attached complies with:

MIL-STD-461 – Electromagnetic Interference Emission and Susceptibility
Requirements for the Control of Electromagnetic Interference
MIL-STD-462 – Measurements of Electromagnetic Interference Characteristics

When the image intensifier is operated under the conditions mentioned above, unless otherwise specified, the characteristic values that follow are attainable:

Date
April 25, 2016

Signed
PB

Checked
BJE

184-6661A0

Image Intensifier specification 18 millimetre micro-channel wafer INTENS™ Technology XW3040R			184-6661A0	
			Page 2 of 3	
	Minimal	Typical	Maximal	UNIT
FOM	2000			
Signal to noise ratio	28			
(Photocathode illuminance 108 µlx)				
Operational life time	7500			hours
Gain at 2.10 ⁻⁵ lx	7000		10000	cd/m ² /lx
Gain at 2.10 ⁻⁶ fc	(22,000)		(31,400)	fL/fc
Maximum Output Brightness	4		8	cd/m ²
Maximum Output Brightness	(1.2)		(2.3)	fL
Input current at 2.10 ⁻⁵ lx			35	mA
Limiting resolution at centre	64	72		lp/mm
Limiting resolution at >200 lux	55			lp/mm
(=autogating mode)				
M.T.F. at 2.5 lp/mm		94		%
at 7.5 lp/mm		85		%
at 15 lp/mm		70		%
at 25 lp/mm		50		%
at 30 lp/mm		40		
E.B.I.			0.25	µlx
Burn-in	50			hours
Image inversion	179		181	°
Shear distortion			30	µm
Gross distortion			50	µm
Useful cathode diameter	17.5			mm
Output uniformity over Ø17.0 mm at 2850K			3:1	
Bright source protection				
50 millilumens on an area of 1 mm ²	60			sec
Fixed Pattern Noise at 2mlx				
(mean luminance deviations)	-10		+10	%
Halo (illumination spot 0.35mm)			0.95	mm
Image alignment			0.15	mm
Mass			80	gram
Date	Signed	Checked	184-6661A0	
April 25, 2016	PB	BJE		

Shock:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being exposed to 6 shock impacts parallel to and 6 shock impacts perpendicular to the optical axis. Impacts shall be halve sine waves with a minimum peak amplitude of 75 g's and a duration of 6 ± 2 milliseconds.

Vibration:

The Image Intensifier tube shall comply with the performance specifications after being subjected to vibration conditions parallel to and perpendicular to the optical axis over a frequency range of 5 to 55 hertz (Hz), 2.54mm amplitude 10 cycles in each plane.

Spots:

Maximum number of dark spots will be according to the following table:

SPOTS DIAMETER IN MICROMETERS	ZONE 1 dia. 5.6mm	ZONE 2 dia. 5.6mm-14.7mm	ZONE 3 dia 14.7mm-17.5mm
> 380	0	0	0
300 – 380	0	0	0
230 – 300	0	0	0
150 – 230	0	1	2
75 – 150	0	2	3
< 75	Minimal	Minimal	Minimal

In case the assembly has more numerous dark spots of smaller dimension within a zone, the total quantity of dark spots in the zone should be within the total quantity of dark spots in the considered zone as specified in the above table.

For example, if a tube is showing [3 Ø75-150µm] dark spots in zone 2 instead of the [2 Ø75-150µm + 1 Ø150-230µm] specified ones, the tube will be considered to be compliant with the specification.



TYPE : **XX2540BU**

SERIAL NO. : **5050530**

DATE : 11 December 2015



Parameter	Min	Measured	Max	Unit
Luminance sensitivity 2850 K Radiant sensitivity 830 nm	700 60	705 65	/ /	μA/lm mA/W
Max. output brightness	6,0	8,1	10,0	cd/m ²
Luminance gain (at 20 μlx)	10000	13680	16000	cd/m ² /lx
Resolution center	64	69	/	lp/mm
Equiv. background illumin.	/	0,19	0,25	μlx
Signal to noise ratio	25,0	25,24	/	/
Input current	/	29,0	35,0	mA
Image alignment	/	0,11	0,30	mm
Useful cathode diameter	17,5	> 18,0	/	mm
Burn in		OK		
Image quality		OK		
Remarks:				



TYPE : **XX2040ZT**

SERIAL NO : **5210564**

DATE : 17 September 2015



Parameter	Min	Measured	Max	Unit
FOM	1500	1687	N/A	/
Max. output brightness	6,0	8,3	10,0	cd/m ²
Luminance gain (at 20 µlx)	9000	12480	15000	cd/m ² /lx
Resolution center	60	65	/	lp/mm
Equiv. background illumin.	/	0,17	0,25	µlx
Signal to noise ratio	20,0	25,95	/	/
Input current	/	30,5	35,0	mA
Image alignment	/	0,16	0,30	mm
Useful cathode diameter	17,5	> 18,0	/	mm
Burn in		OK		
Image quality		OK		
Remarks:				



TYPE : XW3040R				
SERIAL NO : 6260838				
DATE : 02 september 2016				
Parameter	Min	Measured	Max	Unit
FOM	2000	2049	N/A	/
Max. output brightness	4,0	6,0	8,0	cd/m ²
Luminance gain (at 20 µlx)	7000	8740	10000	cd/m ² /lx
Resolution center	64	69	/	lp/mm
Equiv. background illumin.	/	0,13	0,25	µlx
Signal to noise ratio	28,00	29,70	/	
Input current	/	31,8	35,0	mA
Image alignment	/	0,05	0,15	mm
Useful cathode diameter	17,5	> 18,0	/	mm
Burn in		OK		
Image quality		OK		
Remarks:				

PHOTONIS



TYPE : **XX3040GF**

SERIAL NO. : **_L490457**

DATE : 03 February 2016

Parameter	Min	Measured	Max	Unit
FOM (figure of merit)	1800	2124		
Resolution center	64	70	/	lp/mm
Signal to noise ratio	28	30.34	/	
Max.output brightness	6	8.58	10	cd/m ²
Luminance gain (at 20 μ lx)	15000	17357	20000	cd/m ² /lx
Equivalent background illumination	/	0.16	0.25	μ lx
Input current	/	29.5	35	mA
Image alignment	/	OK	0.3	mm
Useful cathode diameter	17.5	OK	/	mm
Burn in		OK		
Image quality		OK		
Remarks:				