



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

NAPÁJECÍ OBVODY PRO FOTONÁSOBIČE UŽÍVANÉ V PŘÍSTROJÍCH NOČNÍHO VIDĚNÍ

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor práce: **Patrick Albrecht**

Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

POWER CIRCUITS FOR PHOTOMULTIPLIER TUBES USED IN NIGHT VISION DEVICES

Bachelor thesis

Study program: B2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems
Author: **Patrick Albrecht**
Supervisor: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrick Albrecht**
Osobní číslo: **M11000141**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Napájecí obvody pro fotonásobiče užívané v přístrojích
nočního vidění**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou napájecích obvodů pro fotonásobiče užívané v přístrojích nočního vidění.
2. Proveďte rešerši o dostupných přístrojích nočního vidění a jejich principech. Zaměřte se na konstrukci napájecích obvodů pro fotonásobiče.
3. Navrhňte vlastní řešení soustavy napájecích obvodů pro vybraný typ fotonásobiče.
4. Sestavte prototyp soustavy napájecích obvodů a ověřte funkčnost celého zařízení.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] Plíva Z., Drábková J., Koprnický J., Petržílka L. Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací. Liberec: Technická univerzita, 2014. 60 s. ISBN 978-80-7494-049-1.
- [2] Kolář M. Analogová elektronika. Liberec: Přednášky TUL, 2014.
- [3] Jelínek J. Měření fyzikálních veličin. Liberec: Přednášky TUL, 2014.
- [4] Novák O., Nouza J., Doležal I., Kolář M. Elektronika. Liberec: 2004. ISBN 80-7083-792-6.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Fuchs**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2015**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan

L.S.




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou / bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

14. 5. 2015



Patrick Albrecht

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, Ing. Jiřímu Jelínkovi Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky, podporu, ochotu a vstřícnost při tvorbě práce. Dále děkuji bratrovi za pomoc a neotřelé připomínky, rodičům za trpělivost. V neposlední řadě bych rád poděkoval přátelům a spolužákům za ochotu pomoci. Nakonec patří jisté poděkování uživatelům internetových fór za odpovědi na mé, občas hloupé, dotazy a pochopení při čtení mých nedokonale srozumitelných anglických vět.

Abstrakt

Tato práce se zabývá odvětvím fotonásobičových trubic, konkrétně těm s obrazovým výstupem umožňující vidět v oblastech, kde lidské oko selhává – ve tmě.

První kapitoly jsou zaměřeny na seznámení se s principy funkce těchto fotonásobičových trubic a jejich druhů, následované problematikou závad a selhání funkčnosti přístrojů pro noční vidění.

V závěrečných kapitolách je návrh nových elektronických obvodů, sloužící ke znovu oživení fotonásobiče.

Klíčová slova

Noční vidění, trubice zesilovače jasu, fotonásobič, zdroj vysokého napětí

Abstract

This thesis addresses sector of photomultiplier tubes, specifically those with image output enabling to see in areas where the human eye fails - in the dark.

First chapters focus on familiarization with the principles of the function of these photomultiplier tubes and their generations, followed by the issue of defects and failure of the night vision devices.

Final chapters describe the design of new electronic circuits used to revitalize the photomultiplier tube function.

Keywords

Night vision, image intensifier tube, photomultiplier, high voltage power supply

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam použitých zkratek	12
Úvod	13
Historie	14
1 Princip funkce	14
1.1 Fotokatoda	15
1.2 Zesilující prvek	16
1.2.1 Mikro-kanálová destička	16
1.3 Stínítko	17
1.4 Napájecí elektronika	18
1.4.1 Napájení trubice s kuželovou anodou	18
1.4.2 Napájení trubice s MCP	19
2 Parametry trubic a jejich význam	21
3 Generace trubic	24
3.1 Generace 0	24
3.2 Generace 1 (1+)	24
3.3 Generace 2 (2+)	26
3.4 Generace 3 (3+)	27
4 Normalizace formátu trubic	30
5 Příčiny a následky poruch na přístroji	31

6	Návrh napájecí elektroniky a přípravku.....	33
6.1	Step-up měnič	34
6.2	Oscilátor a VN transformátor	34
6.3	Násobič napětí.....	36
6.4	Nastavení potenciálů.....	37
6.5	Spínání fotokatody.....	40
6.6	Měření proudu stínítka	40
6.7	Řídící obvod.....	41
6.8	Přípravek.....	43
6.9	Použité trubice.....	45
	Shrnutí výsledků.....	46
	Závěr.....	50
	Literatura.....	51
	Seznam příloh	54
	A Elektrické schéma	55
	B Výkres přípravku	58
	C Nejpoužívanější přístroje nočního vidění.....	61

Seznam obrázků

Obr. 1: Kvantová efektivita fotokatod.....	15
Obr. 2: Mikro-kanálová deska	16
Obr. 3: Kvantová efektivita fosforové obrazovky.....	17
Obr. 4: Regulační děj auto-gating.....	20
Obr. 5: SNR, vyšší hodnota vlevo	21
Obr. 6: EBI, nižší hodnoty vlevo.....	22
Obr. 7: Halo generace 2 (vlevo) a 3	22
Obr. 8: EBI při konstantní teplotě, vyšší hodnota vlevo.....	23
Obr. 9: Kosmetické vady.....	23
Obr. 10: Generace 0, konstrukce.....	24
Obr. 11: Generace 1+, konstrukce.....	25
Obr. 12: Pohled přes přístroj generace 1 a typický vzhled trubice.....	25
Obr. 13: Generace 2 a 2+, konstrukce	26
Obr. 14: Pohled přes přístroj generace 2	27
Obr. 15: Generace 3 a 3+, konstrukce	28
Obr. 16: Pohled přes přístroj generace 3 (nahore) a 3+	29
Obr. 17: Formát kompletních trubic.....	30
Obr. 18: Odhalený prstenec s elektronikou.....	32
Obr. 19 : Blokové schéma napájení trubice 2. a 3. generace	33
Obr. 20: Schéma step-up měniče	34
Obr. 21: Schéma oscilátoru.....	35
Obr. 22: Schéma násobiče napětí.....	37
Obr. 23: Dělič napětí.....	37
Obr. 24: Dělič napětí, digitálně řízený.....	38
Obr. 25: Graf závislosti zisku MCP na napětí.....	39
Obr. 26: Diferenciální zesilovač s OZ.....	40
Obr. 27: Schéma mikrokontroléru.....	41
Obr. 28: Vývojový diagram programu	42
Obr. 29 : Model rozvržení přípravku.....	44
Obr. 30 : Testovací terč.....	47
Obr. 31: Vysoká intenzita osvětlení.....	48
Obr. 32: Střední intenzita osvětlení.....	48
Obr. 33: Nízká intenzita osvětlení.....	48

Seznam tabulek

Tab. 1: Generace 0, parametry.....	24
Tab. 2: Generace 1, parametry.....	25
Tab. 3: Generace 2, parametry.....	26
Tab. 4: Generace 2+, parametry.....	27
Tab. 5: Generace 3, parametry.....	28
Tab. 6: Generace 3+, parametry.....	29
Tab. 7: Vypočtené hodnoty na výstupu transformátoru.....	35
Tab. 8: Vypočtené hodnoty na výstupu násobiče.....	37
Tab. 9: Řídící signály ve vztahu k napětí a zisku na MCP.....	39
Tab. 10: Parametry použitých trubic.....	45
Tab. 11: Naměřená napětí a pracovní rozsah.....	49

Seznam použitých zkratk

GaAs	arsenid galitý
MCP	mikro kanálová destička (micro-channel plate)
CCD	elektronická součástka pro snímání obrazu (charge coupled device)
ABC	automatické řízení jasu (automatic brightness control)
FOM	základní parametr kvality (figure of merit)
SNR	odstup signálu od šumu (signal to noise ratio)
MTF	modulační přenosová funkce (modulation transfer function)
EBI	tepelný šum (equivalent background illumination)
MTTF	životnost (mean time to failure)
SWaP	vývojový trend pro menší velikost, váhu a spotřebu (Size, Weight and Power)
TTL	tranzistorová logika
PSU	zdroj (power supply unit)
OZ	operační zesilovač
USAF	letectvo Spojených států amerických (United States Air Force)

Úvod

Tato práce se zabývá fotonásobiči a převodníky obrazu používanými v přístrojích nočního vidění, zejména jejich konstrukcí a přidruženou elektronikou nutnou pro správnou funkci zařízení.

Motivace

Důvodem ke zpracování této práce je velké množství poruch přístrojů pro noční vidění, konkrétně na napájecích obvodech, ačkoliv vlastní opotřebení fotonásobiče nedosahuje zdaleka poloviny předepsané životnosti, tím se tento drahý přístroj stává prakticky bezcenným. Jediným řešením je nákup nového převodníku obrazu, který ovšem tvoří až 70% ceny celého přístroje.

Cíle

Cílem práce je návrh elektronického obvodu pro trubici fotonásobiče, tak aby mohl být uveden zpět do provozu a maximálně se využila jeho zbývající životnost.

Historie

První jednoduchý převodník infračerveného světla na světlo viditelné zkonstruoval v roce 1934 nor G. Holst, zaměstnanec firmy Phillips. Tento měnič se skládal ze dvou desek – fotokatody a fluorescenčního stínítka, které od sebe dělila jen nepatrná vzdálenost. Mezi nimi byl udržován potenciál několik tisíc voltů, fotony infračerveného světla dopadající na fotokatodu vybudili určité množství elektronů, které vzápětí dopadali na stínítko. Na stínítko narážející elektrony vyvolaly uvolnění fotonů, které měli vlnovou délku viditelného spektra a člověk tak mohl pozorovat obraz. Prvním přístroj nočního vidění sestrojili v Německu za druhé světové války. Od této doby vývoj pokročil a dnes tuto technologii dělíme do základních 4 generací. [7]

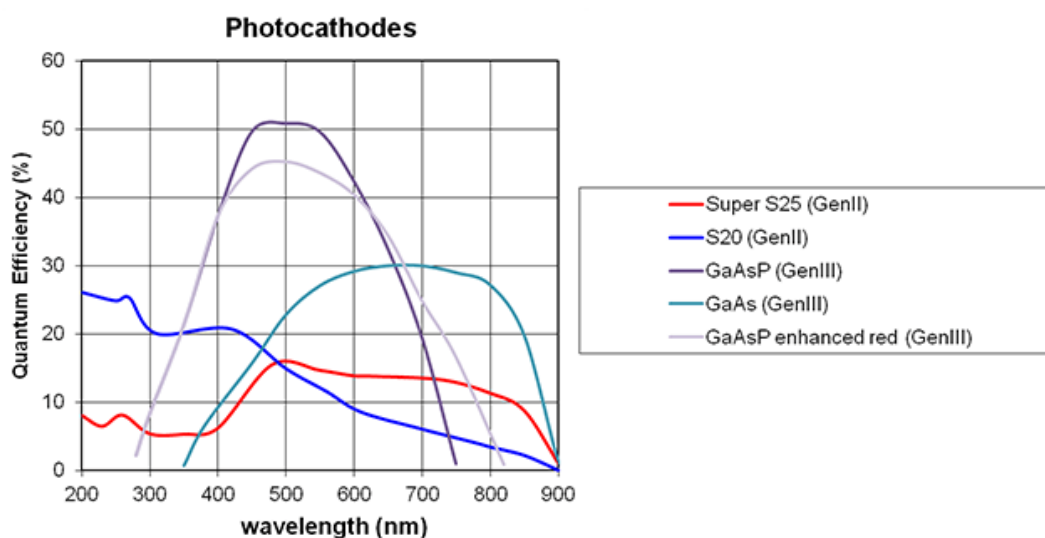
1 Princip funkce

Základním principem přístroje, který umožňuje lidskému oku pozorovat noční scénu, jinak zahalenou tmou, je zpřístupnění vyšší části spektra světla (infračervenou). Blízké infračervené světlo je nezanedbatelnou složkou svitu měsíce a hvězd – to poskytuje dodatečné osvětlení, respektive signál ke zpracování. K využití infračervené složky a její převedení na spektrum pozorovatelné okem slouží dvě důležité součástky – *fotokatoda* a *fosforové stínítko*. Tyto součásti samotné nestačí k vytvoření pozorovatelného obrazu, je tedy nutné zařadit *zesilovací prvek*. Tato sestava součástí je umístěna do těla nejčastěji kruhového průřezu ze skla, případně keramiky, vnitřní prostor tvoří vakuum – tento celek se nazývá trubice zesilovače jasů (z angl. image intensifier tube – IIT). Pokud k trubici doplníme objektiv a okulár, získáme vlastní přístroj nočního vidění.

Poznámka: Pro zjednodušení bude pro trubici zesilovače jasů dále uváděno jen trubice.

1.1 Fotokatoda

Fotokatoda je vstupem trubice, je to záporně nabitá elektroda tvořená fotocitlivým materiálem naneseným na skle nebo svazku optických vláken, který při kontaktu s vlněním světla (z hlediska kvantové optiky fotonem), díky fotoelektrickému jevu, emituje elektron. Energie elektronu koresponduje s energií dopadajícího fotonu. Elektron tedy nese informaci o vlnové délce světla. Podle materiálu, ze kterého je fotokatoda vyrobena se trubice dělí na tzv. *generace*. Důležitou vlastností pro fotokatomy je její kvantová efektivita (obr. 1) – množství uvolněných elektronů v závislosti na vlnové délce. Citlivost fotokatomy je udávána buď světelnou citlivostí v $\mu\text{A/lm}$ při 2856 K, případně spektrální citlivostí v mA/W při vlnových délkách 830, 850 a 880 nm. Nejčastěji používanými materiály na fotokatomy jsou sloučeniny alkalických kovů, fotokatomy generace 0 a 1 – S1, S11, generace 2 – S20, S20ER, S25, Super S25 a nakonec v elektrotechnice rozšířený polovodič arsenid galia pro generace 3 – GaAs a GaAsP. Protože množství využitelných elektronů uchovaných v materiálu fotokatomy je konečný, má fotokatoda určitou životnost. Prakticky životnost celé trubice jako celku se právě odvíjí od životnosti fotokatomy. Ta je dána jako počet hodin za daných světelných podmínek, po kterých dojde k poklesu citlivosti na polovinu. [3, 4]



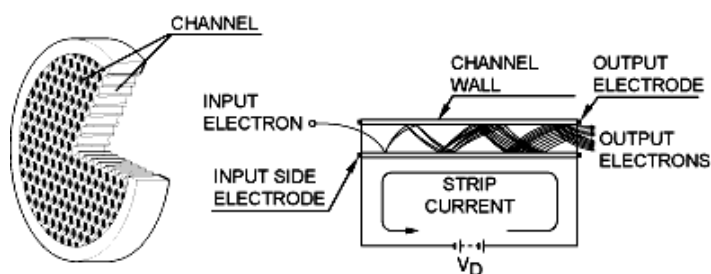
Obr. 1: Kvantová efektivita fotokatod [3]

1.2 Zesilující prvek

Pro zesílení jasů výstupu na pozorovatelnou úroveň se mezi fotokatodu a stínítko umísťuje zesilovací prvek. K požadovanému zvýšení jasů na výstupu je potřeba buď zvýšit energii elektronů, nebo zvětšit jejich množství. Dnes se používá ve většině případů druhého způsobu (nebo kombinace obojího). Zvýšení energie elektronů lze dosáhnout silným elektrostatickým polem s potenciálem v řádech jednotek kilovoltů, tím dojde k urychlování elektronů a tedy zvýšení jejich energie. V případě zvyšování množství elektronů se mezi fotokatodu a stínítko umístí speciální součástka tzv. *mikro-kanálová destička* (microchannel plate – MCP), která elektrony násobí v ohromném měřítku, zároveň je velice malá a výsledná trubice je o mnoho menší než tomu bylo u typů s urychlováním elektronů. [8]

1.2.1 Mikro-kanálová destička

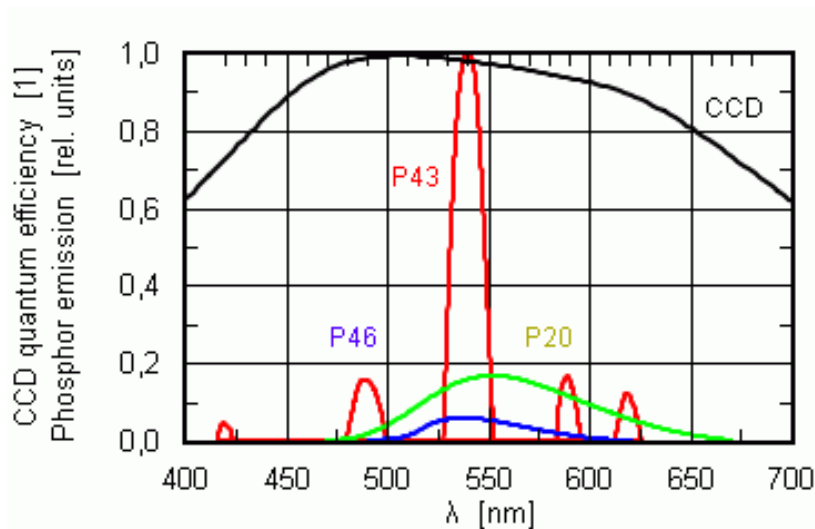
Tenká kruhová destička ze skla s miliony kanálků (obr. 2) o průměru $6\div 12\text{ }\mu\text{m}$, které jsou vůči průřezu skloněny o $8\div 15^\circ$. Na vstupní i výstupní ploše je tenká vrstva vodivé slitiny niklu a chromu, která slouží jako elektrody. Na elektrody se přikládá potenciál v řádech stovek voltů. Elektron emitovaný fotokatodou narazí na vnitřní stěnu kanálku, za přítomnosti elektrického potenciálu vznikne sekundární emise a z materiálu destičky se vybudí další elektron, každý další náraz jednotlivého elektronu vyvolá další emisi, až z konce kanálku vyletí tisíce elektronů. Celkový zisk, kterého lze dosáhnout jednou destičkou dosahuje hodnoty až 10^5 . Velikost zisku je úměrná velikosti potenciálů mezi elektrodami. Pro dosažení ještě většího zesílení lze destičky řadit do kaskády, toho se ovšem u trubic pro noční vidění nevyužívá, protože každá další destička snižuje rozlišení a navyšuje celkový šum. [4, 9]



Obr. 2: Mikro-kanálová deska [9]

1.3 Stínítko

Je výstupem trubice, kladně nabitá elektroda. Na skle nebo svazku optických vláken je nanášena fosforová směs. Urychlené, případně znásobené elektrony, dopadají na tuto vrstvu a inverzním fotoelektrickým jevem emitují fotony, jejichž energie je závislá na dopadajících elektronech. Přední strana stínítka je opatřena hliníkovým filmem zabraňujícím vnikání fotonů do vnitřku trubice. Ve výsledku na stínítku vznikne monochromatický osvit reprezentující zesílený obraz zachycený na fotokatodě. V případě použití svazku optických vláken, lze výstup dále zpracovat – zvětšit, případně zmenšit plochu, natočit výstupní průřez a tím obraz invertovat, upravit průřez pro montáž CCD čipu apod. Materiálem fosforové směsi je dána barva obrazu, nejčastěji používané směsi jsou P20 a P22 (modrozelená), populární P43(žlutozelená) a P45(modrobílá). Tak jako u fotokatody i zde hraje důležitou roli kvantová efektivita (obr. 3). [5]



Obr. 3: Kvantová efektivita fosforové obrazovky [5]

1.4 Napájecí elektronika

Jednotlivé komponenty je nutné napájet příslušným napětím, ve většině případů se jedná o tzv. *wrap around power supply* – miniaturní zdroje doslova obalené kolem těla trubice, pro co největší minimalizaci rozměrů celého přístroje pro noční vidění. Dovolené vstupní stejnosměrné napětí je v rozsahu 2,5÷3,5 V a maximální odběr nepřekročí 30 mA. Pro ruční použití jsou zdrojem elektrické energie nejčastěji dva články velikosti AA, lithiový článek 3V CR123, lze se setkat i s řešením jedním AA článkem s příslušným step-up obvodem. Moderní zdroje mají integrovány funkce řízení zisku tzv. *automatic brightness control* (ABC), případně sofistikovanější nadstavba *auto-gating*, které chrání fotokatodu před nadměrným opotřebením vlivem vysoké intenzity vstupujícího světla, další výhodou takových opatření je rozšíření dynamického rozsahu světelných podmínek, za jakých lze trubice používat. Tyto funkce jsou ovšem v naprosté většině výsadou trubic s mikro-kanálovou deskou. [1, 8]

1.4.1 Napájení trubice s kuželovou anodou

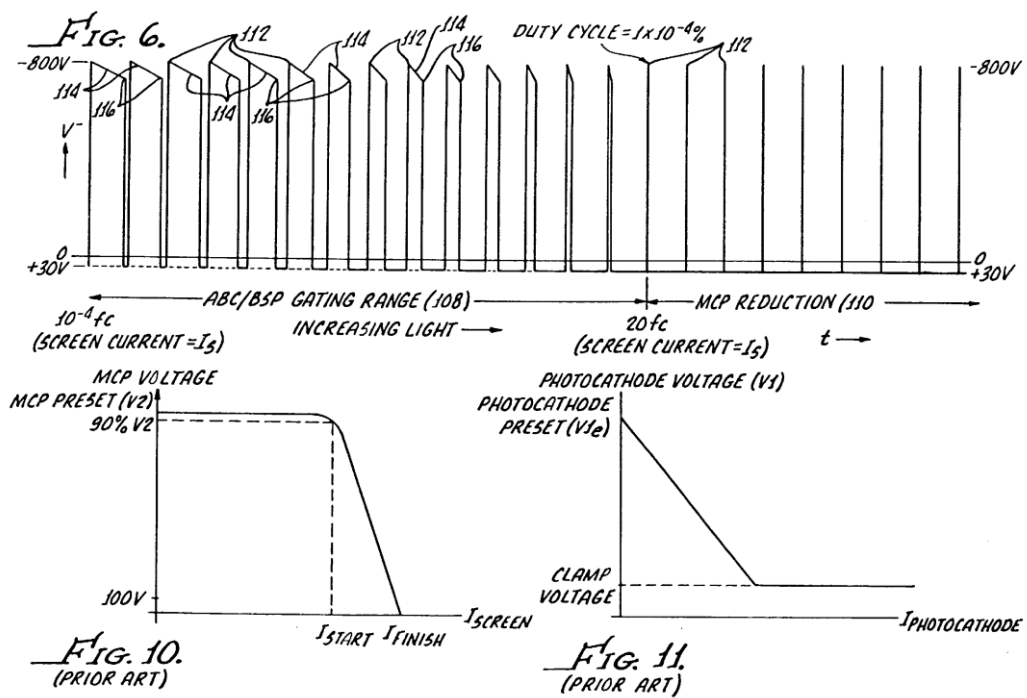
Napájení trubice vyžaduje konstantní stejnosměrné napětí až 15 kV (v závislosti na typu se může hodnota lišit). Fotokatoda je připojena na zem, 15 kV je připojeno na stínítko, které je uvnitř trubice propojené s kuželovou anodou, ta se stará o zaostření paprsků elektronů a zároveň invertuje obraz. Obvod se skládá ze stabilizátoru napětí, generátoru vysokého napětí sinusového průběhu a nakonec z Cockroft-Waltonova násobiče napětí. Řízení zisku je problematické, protože trubice zůstává jistou dobu po odpojení napájení aktivní, tím pádem ztrácí snižování napětí za účelem snížení zesílení smysl. Vzhledem k tomu, že tento typ trubic nahradil mnohem pokročilejší typ s mikro-kanálovou destičkou, tak se od řešení inovace ve formě řízení zisku upustilo.

1.4.2 Napájení trubice s MCP

Elektronika pro tento typ trubice je mnohem složitější, jsou nutná tři stejnosměrná napájecí napětí:

- Stínítka – konstantní napětí $5 \div 6$ kV
- MCP výstup – připojeno na zem
- MCP vstup – variabilní napětí $-200 \div -1000$ V
- Fotokatoda – dle materiálu: (konstantní napětí ve vztahu k MCP vstup)
 - Multialkali – napětí -150 V
 - GaAs – napětí -800 V
 - GaAs thinfilm – napětí -600 V
 - GaAs filmless – napětí -200 V

Obvod se, podobně jako u typu s kuželovou anodou, skládá ze stabilizátoru napětí, generátoru vysokého napětí sinusového průběhu a Walton-Cockroftova násobiče napětí. Zisk je řízen obvodem ABC, který upravuje velikost potenciálu na MCP v závislosti na proudu procházejícím stínítkem (proud stínítkem je úměrný intenzitě vstupujícího světla), tím je dosaženo nastavení optimálního jasu obrazu. Funkce auto-gating (obr. 4) doplňuje ABC, při nízkém osvětlení je zisk nastaven na maximum, pulsně šířkovou modulací s vysokou frekvencí (v řádu stovek Hz až jednotek kHz) se fotokatoda spíná na stav zapnuto – záporné napětí dle typu fotokatomy (uvolnění elektronů je umožněno) a vypnuto – kladné napětí, zpravidla $+30$ V (převrácená polarita znemožňuje uvolňování dalších elektronů). Při zvyšující se intenzitě vstupujícího světla poroste proud stínítkem (alternativně lze použít proud k fotokatodě), pro udržení proudu na optimální hodnotě se začne zmenšovat střída, což má za následek snížení počtu elektronů vznikajících na fotokatodě a tím pokles proudu stínítkem. Po dosažení minimální střídy přebírá iniciativu ABC a kompenzuje další nárůst proudu zmenšením zisku. Pokud je intenzita světla natolik vysoká a zisk, respektive potenciál na MCP, je na minimální hodnotě hrozí poškození součástí. Aby se zabránilo poškození je dodatečně většina moderních přístrojů vybavena komparačním obvodem s fotoprvkem, který nadměrnou intenzitu světla oznámí kontrolní LED a v několika málo okamžicích trubicí odpojí od zdroje elektrické energie. [1,4]



Obr. 4: Regulační děj auto-gating [6]

2 Parametry trubic a jejich význam

Každá trubice projde během výrobního procesu mnoha měřeními, pomocí naměřených hodnot se řadí do kvalitativních skupin – ty určují finální ceny a umožňují výběr pro koncového zákazníka. Ty nejlepší trubice jsou určeny pouze pro armádu a složky bezpečnostních sborů, od určité hranice také pro civilní trh. Nejjednodušším měřítkem kvality trubice je tzv. FOM (figure of merit), což není nic jiného než součin limitního rozlišení a poměru signál/šum. FOM se u trubic pohybuje od 126 u nejhorších po 2600 a více u těch nejlepších. Pro detailnější posouzení kvality je FOM nevyhovující, například pro trubice využívané v astronomii má jen velmi malou váhu.

- **Limitní rozlišení [lp/mm]** – udává kolik párů linek (černá a bílá) je trubice schopná rozlišit na 1 mm stínítka.
- **Poměr signál/šum (SNR) [bez rozměru]** – poměr užitečného signálu k šumu, měřeno při intenzitě světla 108 μlx (obr. 5).



Obr. 5: SNR, vyšší hodnota vlevo[4]

- **Citlivost fotokatody [$\mu\text{A/lm}$]** – množství uvolněných elektronů při světle barevné teploty 2854 K.
- **Spektrální citlivost [mA/W]** – množství uvolněných elektronů při osvětlení monochromatickým světlem, měřeno při 830, 850 a 880 nm.
- **Zesílení [fL/Fc nebo $\text{cd/m}^2/\text{lx}$]** – poměr výstupní k vstupní svítivosti.

- **Modulační přenosová funkce (MTF) [%]** – udává kontrast mezi páry linek s jejich klesající šířkou (obr. 6). Kontrast 3 % určuje limitní rozlišení.



Obr. 6: EBI, nižší hodnoty vlevo [4]

- **Halo [mm]** – halové jevy vznikají při intenzivním bodovém osvětlení fotokatody (obr. 7). Na přední straně MCP se nárazem elektronů na stěnu mezi mikro-kanálky, elektrony se odrazí a el. statickým polem jsou vtaženy do sousedních kanálků, tam jsou zesíleny a na stínítku pak tvoří kolem obrazu bodu jasný disk. Průměr disku je dán vzdáleností fotokatody od MCP. Trubice generace 3 má halo větší než generace 2, to je dáno tím, že vrstva GaAs fotokatody je cca 25krát silnější.



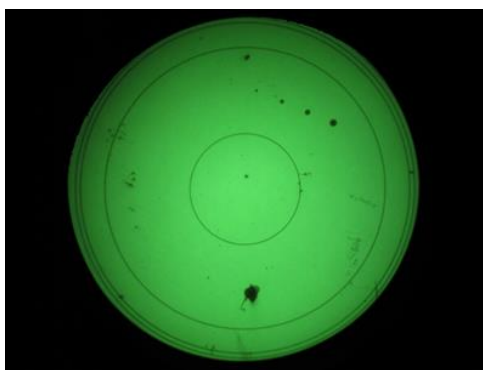
Obr. 7: Halo generace 2 (vlevo) a 3 [4]

- **EBI [μlx]** – minimální intenzita osvětlení na vstupu, za které je možné rozeznat obraz (obr. 8). Fotokatoda vlivem tepla náhodně uvolňuje elektrony – šum, tento šum roste s teplotou. V dnešní době je EBI na hranici 2,5 μlx a menší.



Obr. 8: EBI při konstantní teplotě, vyšší hodnota vlevo [10]

- **Životnost (MTTF) [h]** – doba, za kterou klesne citlivost fotokatody na polovinu.
- **Kosmetické vady** – výrobní vady na součástech trubice, které se projeví jako tmavé body a skvrny (obr. 9), určuje se typ, počet, velikost a zóna výskytu.



Obr. 9: Kosmetické vady [4]

3 Generace trubic

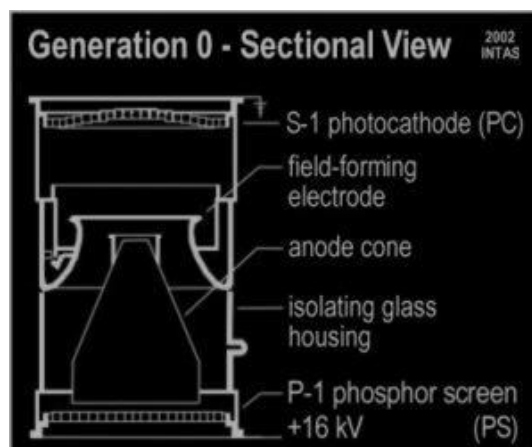
Jak již bylo naznačeno v první kapitole, trubice se dělí na generace dle materiálu fotokatody. Vyšší generace znamená větší kvalitu, modernější konstrukci a v neposlední řadě vyšší cenu a případné omezení pro civilní trh.

3.1 Generace 0

Trubice této generace byly využívány v letech 1938 až 1960. Velké skleněné baňky s fotokatodou typu S1, s životností v řádu stovek hodin. Kvůli minimálnímu zesílení bylo nutné používat velice silné přisvětlení, jednalo se v podstatě pouze o převodník infračerveného světla na viditelné. Obraz je zkreslen efektem rybího oka.

Tab. 1: Generace 0, parametry

Fotokatoda	S1 – Ag-O-Cs
Stínítko	P1 – Zn-Cd
Citlivost	<60 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální rozsah	300÷1000 nm
Životnost	<stovky h
Rozměry (cca)	Ø50 x 90 mm



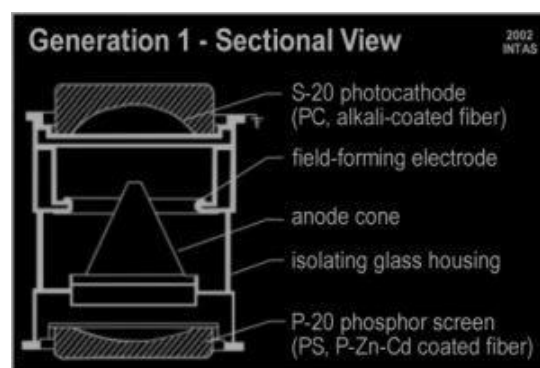
Obr. 10: Generace 0, konstrukce [8]

3.2 Generace 1 (1+)

V padesátých letech došlo k vývoji a použití efektivnější fotokatody S11 a fosforu P10. Za příhodných podmínek (plný měsíc) již nebylo nutné používat přisvit, jedná se o první polo-pasivní přístroje pro noční vidění. Rozlišení díky vyšší jemnosti fosforové směsi značně narostlo, obraz je stále zkreslen geometrickou distorzí. Došlo ke zmenšení rozměrů, při použití vyššího napájecího napětí vzrostlo zesílení.

Tab. 2: Generace 1, parametry

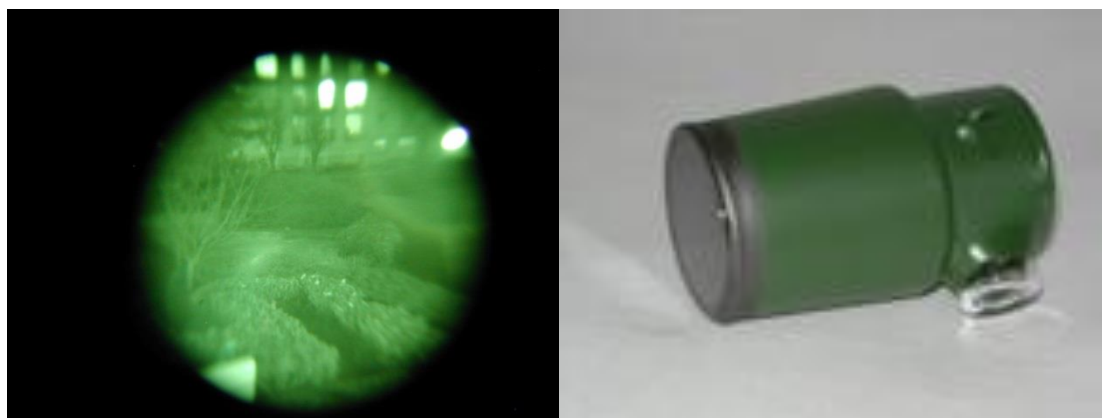
Fotokatoda	S11 – Sb-Cs
Stínítko	P20 – Zn-Cd
Rozlišení	<20 lp/mm
Citlivost	<200 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální rozsah	300÷800 nm
Zesílení	<1 000 fL/fc
Rozměry (cca)	Ø40 x 50 mm
Životnost	<1 000 h



Obr. 11: Generace 1+, konstrukce [8]

U generace 1+ bylo na vstupu a výstupu na místo plochého skla použito svazku optických vláken, jejichž tvarováním se dala kompenzovat geometrická distorze

Řazením trubic do kaskády lze dosáhnout zesílení až 10^5 , nevýhodou takového řešení je prohloubení geometrické distorze a prodloužení celého přístroje. Obvykle bylo použito jen 2 nebo 3 za sebou jdoucích trubic. [8]



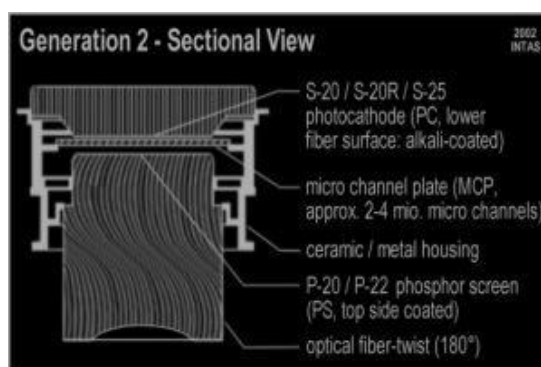
Obr. 12: Pohled přes přístroj generace 1 a typický vzhled trubice [11]

3.3 Generace 2 (2+)

V 60. letech s příchodem MCP byli položeny základy moderních měničů. Vstup a výstup ze svazku optických vláken, výstup může být natočen tak, aby invertoval obraz – tzv. *twister*. Obraz je bez geometrické distorze. Měniče se zmenšily natolik, že bylo možné je používat jako náhlavní soupravy (PVS-5), díky velkému zesílení se již řadí do plně pasivních systémů, elektronické obvody doplněny o funkci ABC. S MCP s kolem 2 milionů kanálků dosahuje dobrých hodnot rozlišení. [8]

Tab. 3: Generace 2, parametry

Fotokatoda	S20 – Na-K-Sb-Cs
Stínítko	P20 – Zn-Cd
Rozlišení	20÷32 lp/mm
Citlivost	200÷350 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální rozsah	200÷850 nm
Zesílení	<15 000 fL/fc
SNR	>4,5
Rozměry (cca)	Ø35 x 30 mm
Životnost	<4 000 h



Obr. 13: Generace 2 a 2+, konstrukce [8]

Po 70. letech se vývojem fotokatody S20 zavedli nové a efektivnější značené S20ER (extended red), v průběhu let se zjistilo, že nanášením fotokatody S20ER na sklo se zvýšila citlivost. Tato skutečnost dala vzniknout fotokatodám S25 a Super S25, které se vyrábí dodnes nizozemskou firmou Photonis, její dnešní trubice označované jako XR5 s 12 miliony kanálků v MCP do jisté míry konkuruje trubicím 3. generace. Mezi její největší výhody patří velký rozsah osvětlení scény, obzvláště pokud jsou vybaveny funkcí auto-gating, minimální halo efekt a vysoký kontrast pozorovaného obrazu. [6]

Tab. 4: Generace 2+, parametry

Fotokatoda	S20ER, S25, S S25
Stínítko	P20, P22, P43, P45
Rozlišení	32÷81 lp/mm
Citlivost	240÷800 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální rozsah	200÷900 nm
Zesílení	15÷55 $\times 10^3$ fL/fc
SNR	16÷30
Rozměry (cca)	Ø35 x 30 mm
Životnost	4 000÷15 000 h



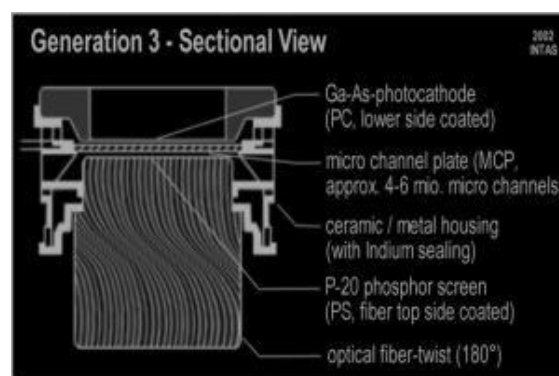
Obr. 14: Pohled přes přístroj generace 2 [11]

3.4 Generace 3 (3+)

V 80. letech následuje vývin fotokatody z arsenidu galia (GaAs) jejíž citlivost je oproti dosud používaným materiálům nesrovnatelně vyšší. Negativem GaAs je náchylnost na kladné ionty, které vznikají při kontaktu elektronů se stěnou kanálku v MCP (vrstva fotokatody je cca 25 krát silnější než u 2. generace, kde většina kationtů proletí skrz). Musí se tedy chránit iontovou bariérou, tzv. *filmem*, jímž je vrstva oxidu hliníku nanесena na přední stranu MCP. Nevýhodou ochranného filmu je to, že nepropustí ani elektrony, které nemají dostatečnou energii na to, aby se dostali skrz. Tím se citlivost fotokatody snižuje o cca 50%. Z toho vyplývá, že první měniče této generace nebyli zdaleka tak dobré, jak předpovídala citlivost fotokatody a jejich výkon nebyl o moc lepší než, již v tu dobu, pokročilejší trubice generace 2. S pokračujícím vývojem se zvyšovala efektivita této fotokatody na, kterou se zaměřili hlavně ve Spojených státech amerických a v Rusku. V Evropě se, až na pár výjimek, zůstalo u vývoje fotokatody 2. generace. [8]

Tab. 5: Generace 3, parametry

Fotokatoda	GaAs
Stínítko	P20, P43, P45
Rozlišení	36÷64 lp/mm
Citlivost	1000÷1800 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální rozsah	400÷950 nm
Zesílení	20÷80 x 10^3 fL/fc
SNR	16÷21
Rozměry (cca)	Ø35 x 30 mm
Životnost	10 000 h



Obr. 15: Generace 3 a 3+, konstrukce [8]

Na přelomu tisíciletí, se experimentovalo s odstraněním ochranného filmu, a aby se zabránilo pronikání kationtů k fotokatodě, mění se s vysokou frekvencí polarita napájení fotokatody (*Auto-gating*), tím jsou kladné ionty odpuzeny, ještě předtím, než poškodí fotokatodu. Odstraněním filmu se využil plný potenciál fotokatody a nárůst výkonu u těchto měničů (tzv. *filmless*) je obrovský. Nevýhodou je nepatrně nižší životnost. Kompromisem je nanášet pouze tenký film (tzv. *thinfilm*), který citlivost snižuje o cca třetinu. Filmless varianta se v mnoha případech označuje jako generace 4, ale z hlediska definice generace dle materiálu fotokatody se stále jedná o generaci 3. Tyto trubice jsou vyráběny výhradně firmami L3 EOS a ITT ve spojených státech amerických. Varianty filmless a thinfilm auto-gated mají excelentní rozlišení a nízký šum i při těch nejnižších úrovních osvětlení a jsou špičkou ve světě. Platí pro ně ovšem omezená distribuce – naprostá většina trubic se dostává k armádě, konkrétně letectvu a speciálním jednotkám. To málo trubic, které se dostane na civilní trh, je horší kvality, protože nesplní přísná armádní kritéria a testy. Export ze země není díky klasifikaci bezpečnostního materiálu možný. [3, 8]

Tab. 6: Generace 3+, parametry

Fotokatoda	GaAs
Stínítko	P43, P45
Rozlišení	64÷81 lp/mm
Citlivost	1800÷2600 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální rozsah	400÷950 nm
Zesílení	20÷110 x 10 ³ fL/fc
SNR	20÷40
Rozměry (cca)	Ø35 x 30 mm
Životnost	<10 000 h



Obr. 16: Pohled přes přístroj generace 3 (nahore) a 3+ [11]

4 Normalizace formátu trubic

Pro zajištění kompatibility trubic mezi různými přístroji nočních vidění (vlastní tělo přístroje s optikou a zdrojem el. energie, do kterého se kompletní trubice montuje, viz příloha C) jsou rozměry a provedení trubic normovány podle určitých kritérií [1]. Nejprve nastíním typy přístrojů a poté kompatibilní trubice.

- Jednakanálové (průměr vstupního a výstupního okénka 18 mm)
 - Monokulární – trubice s invertovaným obrazem (např. PVS-14)
 - Bi-okulární – trubice s přímým obrazem (např. PVS-7)
- Dvoukanálové (průměr vstupního a výstupního okénka 16 nebo 18 mm)
 - Binokulární – trubice s invertovaným obrazem (např. PVS-5, AVS-9)
- Více kanálové (průměr vstupního a výstupního okénka 16 mm)
 - Čtyř-kanálové – trubice s invertovaným obrazem (např. GPNVG-18)

Kompatibilní trubice:

- Fat anvis (Ø43 x 31 mm)
 - Invertující – vstup ze svazku optických vláken, typ MX9916 (PVS-5)
 - Neinvertující – vstup sklo, série F9810 (PVS-7)
- Slim anvis (Ø36 x 31 mm)
 - Invertující – vstup sklo, série F9800 (AVS-9) a F9815 (PVS-14)
- 16mm SWaP (Ø32 x 31 mm)
 - Invertující – vstup sklo, série F9821 (GPNVG-18, PVS-21)



Obr. 17: Formát kompletních trubic [8]

5 Příčiny a následky poruch na přístroji

Jelikož je vakuový modul trubice i příslušná elektronika navržena s ohledem na minimální rozměry, nese to jistá úskalí. Trubice mají normované rozměry, průměr vstupního a výstupního okénka (dnešní standard je 18 mm), celkový vnější průměr, včetně elektroniky, je v současné době dle typu 43 a 36 mm, délka je pro oba typy 31 mm. Elektronické součástky jsou umístěny ve válcovém prstenci zalitým epoxidem (obr. 18), jehož tloušťka stěn nepřesahuje cca 6 mm. Pokud vezmeme v potaz malý prostor a složitost elektroniky (u trubic s MCP), můžeme dojít k závěru, že vlastní součástky obvodu budou rozmístěny těsně vedle sebe, jejich velikost je miniaturní a bude se s nejvyšší pravděpodobností jednat o zakázkové součástky vyrobené speciálně k osazení do těchto malých zdrojů, lze tedy předpokládat, že nebudou nijak zvlášť předimenzované. Přidáme-li k tomu vysokou náročnost na izolaci, která je mimo epoxidový prstenec řešena zalitím silikonovým izolantem, lze usoudit, že selhání funkce může dojít buď narušením silikonové izolace – vzduchové bubliny, mikroskopické trhliny v materiálu izolace a následné vztlínání vlhkosti, které způsobí vznik výbojů mezi vedeními s malou mezerou a vysokým napětím mezi nimi, případně vypovězením funkce jedné nebo více elektronických součástek, které jsou namáhány nadměrným napětím a proudem, které se mohou vyskytnout v případě mnohonásobného vystavování přístroje extrémním světelným podmínkám. Poruchy se pak projevují jako ztráta zisku, problikávání obrazu, výboje mezi součástkami a vodiči v epoxidovém prstenci napájecích obvodů, výboje mezi pájitelnými kontakty na trubici samotné nebo úplná ztráta funkce. V případě narušení silikonové izolace a viditelných výbojů mimo prstenec spočívá oprava v oddělení vakuového modulu trubice od prstence s elektronikou, důkladné očištění a opětovné zalití silikonem. V případě selhání některé ze součástek, je nutné nahradit celou napájecí elektroniku, diagnostika obvodu není díky součástkám zalitými v epoxidu možná.



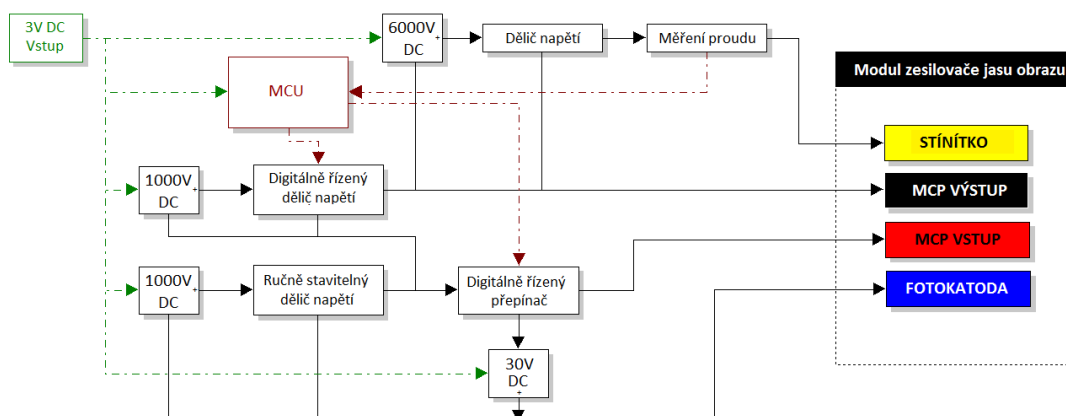
Obr. 18: Odhalený prstenec s elektronikou v průhledném epoxidu, ve spodní části izolační hmota černé barvy

Mezi méně časté, ale o to destruktivnější, poruchy patří závada na těsnění mezi keramickými segmenty spojující součásti trubice, dojde k narušení vakua uvnitř trubice a přístupu vzduchu k fotokatodě, která za přítomnosti kyslíku oxiduje a po čase degraduje natolik, že se stane nepoužitelnou. Tato závada je neopravitelná.

6 Návrh napájecí elektroniky a přípravku

V rámci této práce jde o návrh napájecí elektroniky použitelný pro trubice generace 2 a 3 s mikro-kanálovou destičkou. Obvody budou řešeny na deskách plošných spojů, bez přístupu ke speciálním miniaturním součástkám není nutné dodržovat přísnou minimalizaci, toto řešení poskytne jistou míru diagnostiky součástek při případných problémech. Napájecí napětí je 3 V stejnosměrné, to je pomocí několika funkčních bloků nutné zvýšit na cca 6000 V výstup a na dvojici cca 1000V výstupů. Tyto tři výstupy je nadále nutné zpracovat, tak aby byl:

- Zajištěn potenciál mezi stínítkem a zadní stranou MCP v rozsahu 5÷6 kV (U_s)
- Na MCP nastavitelný potenciál 200÷1000V (U_{MCP})
- Mezi MCP a fotokatodou stavitelný potenciál v rozsahu 200, 600 a 800V (U_{PC})

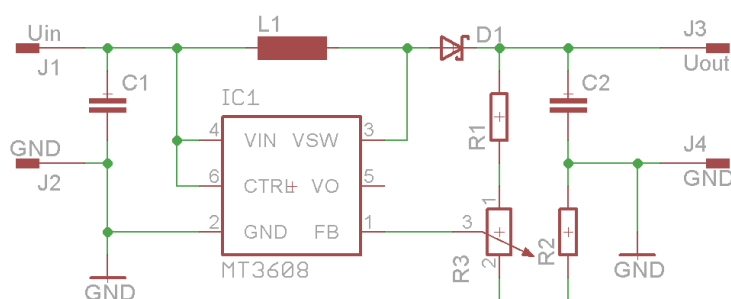


Obr. 19 : Blokové schéma napájení trubice 2. a 3. Generace

6.1 Step-up měnič

Zvyšuje vstupní napětí na napětí potřebné pro další blok – oscilátor. Volím levný a dostupný DC-DC měnič IC5A004A s nastavitelným výstupním napětím využívající integrovaný obvod MT3608 s následujícími parametry:

- Vstupní napětí: 2÷24 V
- Výstupní napětí: až 28 V
- Maximální výstupní proud: až 2 A
- Účinnost: až 93 %



Obr. 20: Schéma step-up měniče

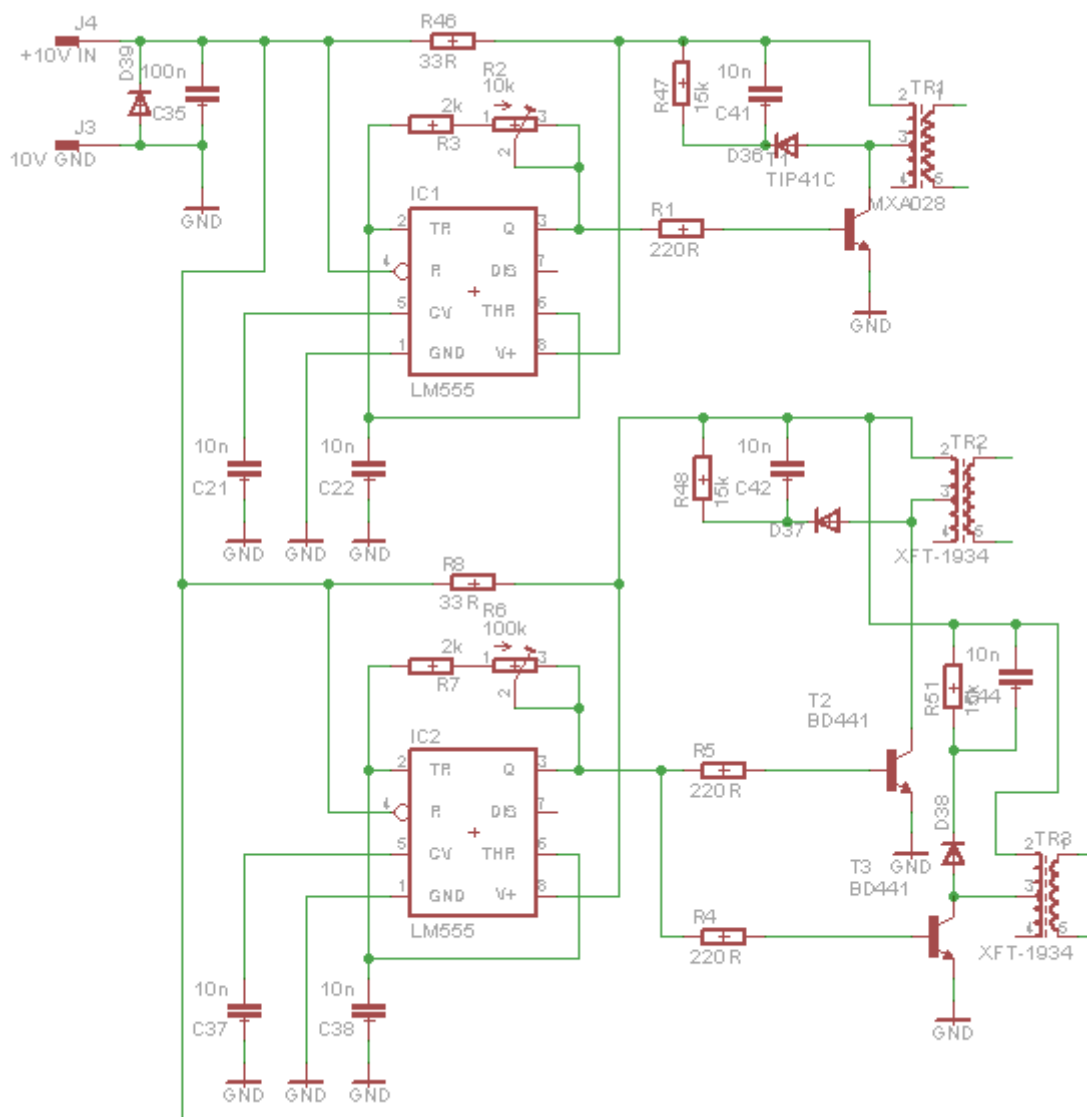
6.2 Oscilátor a VN transformátor

Základem oscilátoru je časovač 555 v astabilním zapojení generující obdélníkový signál 50% střidy o amplitudě 10 V s proměnnou frekvencí nastavitelnou trimry R2 a R6. Rozsah frekvencí časovače je dán výpočtem uvedeným v datasheetu LM555:

$$f = \frac{0,7}{RC} \quad (1)$$

Pro buzení transformátorů větším proudem, než je časovač schopný dodat, jsou signálem spínány příslušné tranzistory T1, T2 a T3 v zapojení se společným emitorem (obr. 21). Posledním členem bloku jsou transformátory TR1 s převodním poměrem 1:75 a dvojice transformátorů TR2 a TR3 s převodním poměrem 1:25. Maximální napětí na sekundárním vinutí spočítáme podle rovnice:

$$U_{max} = \frac{1}{2} p \cdot U_{IN} \quad (2)$$



Obr. 21: Schéma oscilátoru

Tab. 7: Vypočtené hodnoty na výstupu transformátoru

Výstupní napětí TR1	$U_{\max} = 375 \text{ V}$
Rozsah frekvencí	$f = 0,7 \div 35 \text{ kHz}$
Výstupní napětí TR2, TR3	$U_{\max} = 125 \text{ V}$
Rozsah frekvencí	$f = 6 \div 35 \text{ kHz}$

6.3 Násobič napětí

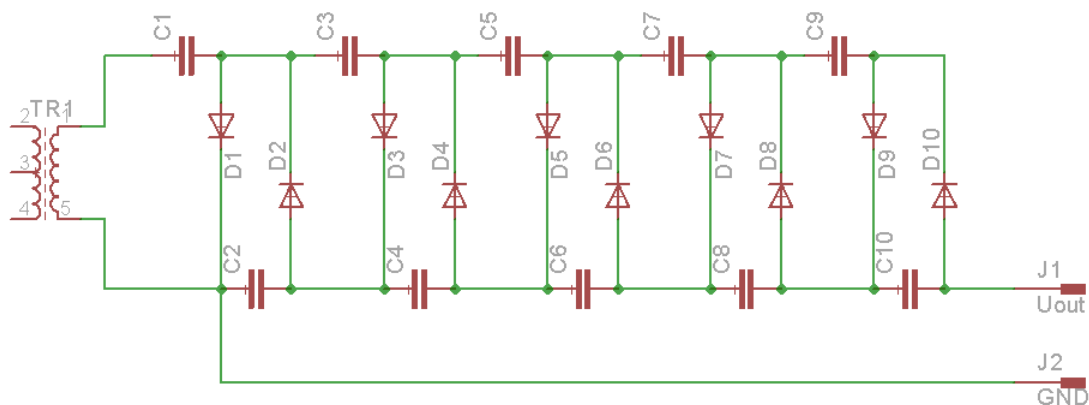
Pro získání vysokého napětí se na sekundární vinutí transformátoru připojuje Cockroft-Waltonův násobič skládající se z diod a kondenzátorů spojených do kaskády (obr. 22). Ten pracuje tak, že při kladné půlvlně se nabíjí kondenzátor C1 na hodnotu maximálního napětí na transformátoru, po příchodu záporné půlvlny se napětí na kondenzátoru C1 přičte k napětí transformátoru a na tuto hodnotu se nabíjí kondenzátor C2. Při další kladné půlvlně se otvírá mimo diody D1 i dioda D3 a kondenzátor C3 se nabíjí na dvojnásobnou hodnotu U_{max} . V druhé záporné půlvlně se nabíjí kromě kondenzátoru C2 i kondenzátor C4 také na dvojnásobnou hodnotu U_{max} . Součet napětí na těchto dvou kondenzátorech je roven čtyřnásobku maximální hodnoty střídavého napětí transformátoru. Takto lze přidávat další stupně a zvyšovat konečné napětí. Tento děj neprobíhá postupně, ale najednou. To znamená, že při kladné půlvlně se otvírají všechny diody označené lichými čísly a nabíjí se horní řada kondenzátorů. V případě záporné půlvlny se naopak otvírají sudé diody a nabíjí se spodní řada kondenzátorů. Výsledné usměrněné napětí je tedy dáno jako dvojnásobek součinu počtu stupňů a vstupního maximálního napětí (3), kde jeden stupeň n vždy odpovídá dvojici kondenzátorů a diod.

$$U_{out} = 2n \cdot U_{max} - U_{drop} \quad (3)$$

Pokud bude z násobiče odebírán určitý proud, je vhodné vzít v úvahu, tímto odběrem způsobený, pokles napětí. Ten lze vypočítat následující rovnicí [12]:

$$U_{drop} = \frac{I_{load}}{6fC} \cdot (4n^3 + 3n^2 - n) \quad (4)$$

Pro zajištění potenciálu mezi fotokatodou a přední stranou MCP bylo zvoleno násobiče o 4 stupních, pro MCP potom stupňů 5. Pro potenciál mezi stínítkem a MCP je to stupňů 8.



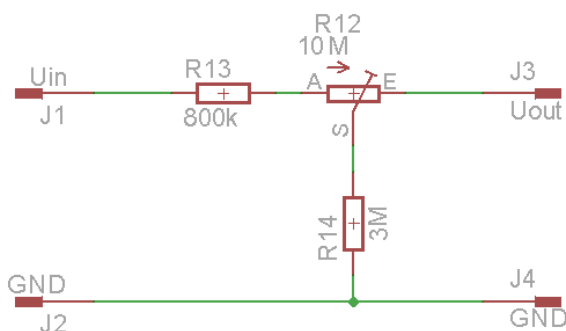
Obr. 22: Schéma násobiče napětí

Tab. 8: Vypočtené hodnoty na výstupu násobiče

Potenciál MCP-stínítko	$U_s = 6000 \text{ V}$
Potenciál na MCP	$U_{MCP} = 1250 \text{ V}$
Potenciál fotokatoda-MCP	$U_{PC} = 1000 \text{ V}$

6.4 Nastavení potenciálů

- **Potenciál stínítko-MCP** – nastavení v rozsahu cca 5000÷6000 V.
- **Potenciál fotokatoda-MCP** – ruční nastavení potenciálu fotokatody v rozsahu 200 až 800 V. Řešení v podobě děliče napětí.



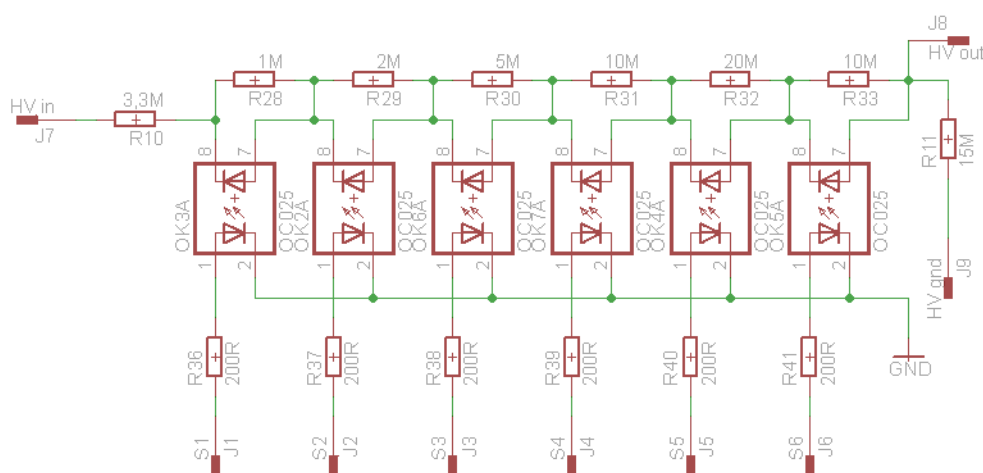
Obr. 23: Dělič napětí

Výpočet je dán:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_{14}}{R_{13} + R_{14} + R_{AS}} \quad (5)$$

Při použití hodnot z obr. 24 dostaneme $U_{max} = 790$ V a $U_{min} = 217$ V.

- **Potenciál na MCP** – nastavením potenciálu na MCP regulujeme velikost výsledného zesílení. MCP pracuje s potenciálem v rozsahu 200÷1000 V. Pro ruční řízení zisku lze použít předchozího řešení. Při řešení funkce ABC je třeba použít elektricky (digitálně) řízený dělič. Ten lze zkonstruovat pomocí optočlenů, výhodou je galvanické oddělení vedení vysokého napětí od řídicích signálů. Celkový odpor mezi elektrodami MCP je 1÷10 GΩ [13].



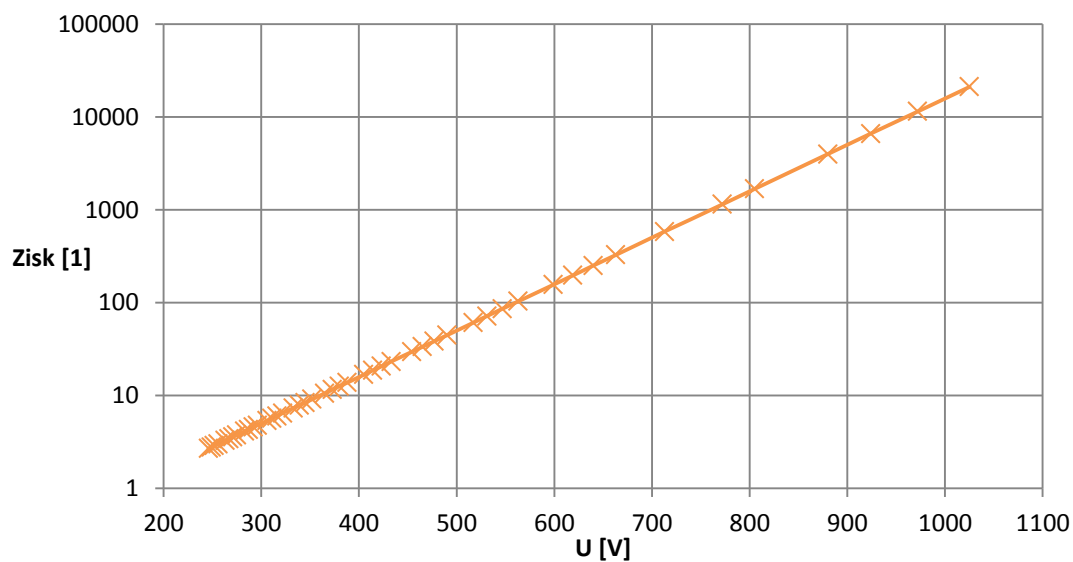
Obr. 24: Dělič napětí, digitálně řízený

Řídicími signály S1÷S6 (TTL) je řízeno připojení odporů R28÷R33, které spolu s R10 a R11 tvoří dělič. To umožňuje celkem 48 úrovní řízení jasu. Pomocí rovnice (5) jsou v následující tabulce spočtená výstupní napětí pro hodnoty odporu uvedené na obr. 24 a spočten teoretický zisk daný rovnicí (6), která je získána interpolací hodnot grafu [15]:

$$Gain = 10^{\frac{U_{MCP}-160}{200}} \quad (6)$$

Tab. 9: Řídící signály ve vztahu k napětí a zisku na MCP

S6	S5	S4	S3	S2	S1	R[MΩ]	U[V]	Zisk[1]	S6	S5	S4	S3	S2	S1	R[MΩ]	U[V]	Zisk[1]
						0	1025	21135		1	1				30	388	13,8
					1	1	972	11482		1	1			1	31	380	12,6
				1		2	924	6607		1	1		1		32	373	11,6
				1	1	3	880	3981		1	1		1	1	33	365	10,6
			1			5	805	1679		1	1	1			35	352	9,1
			1		1	6	772	1148		1	1	1		1	36	345	8,4
			1	1		7	741	803,5		1	1	1	1		37	339	7,9
			1	1	1	8	713	582,1		1	1	1	1	1	38	333	7,3
		1				10	663	327,3		1	1				40	322	6,5
		1			1	11	640	251,2		1	1			1	41	316	6,0
		1		1		12	619	197,2		1	1		1		42	311	5,7
		1		1	1	13	599	156,7		1	1		1	1	43	306	5,4
		1	1			15	563	103,5		1	1	1			45	296	4,8
		1	1		1	16	547	86,1		1	1	1		1	46	292	4,6
		1	1	1		17	531	71,6		1	1	1	1		47	287	4,3
		1	1	1	1	18	517	61,0		1	1	1	1	1	48	283	4,1
1						20	490	44,7	1	1	1				50	275	3,8
1					1	21	477	38,5	1	1	1			1	51	271	3,6
1				1		22	465	33,5	1	1	1		1		52	267	3,4
1				1	1	23	454	29,5	1	1	1		1	1	53	263	3,3
1			1			25	433	23,2	1	1	1	1			55	256	3,0
1			1		1	26	423	20,7	1	1	1	1		1	56	252	2,9
1			1	1		27	414	18,6	1	1	1	1	1		57	249	2,8
1			1	1	1	28	405	16,8	1	1	1	1	1	1	58	246	2,7



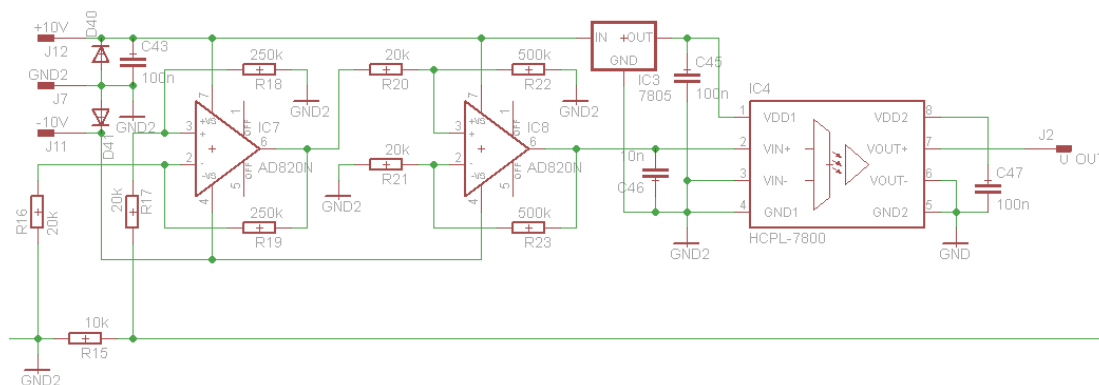
Obr. 25: Graf závislosti zisku MCP na napětí

6.5 Spínání fotokatody

Funkce auto-gating spočívá ve spínání fotokatody ve stavech vypnuto a zapnuto, kdy je při stavu vypnuto odpojen záporný potenciál a připojen potenciál kladný (postačuje pár desítek V). K této realizaci lze opět využít optočleny. Frekvence spínání závisí zejména na druhu fotokatody a její úpravě filmem s nízkým odporem, kde jsou obecně fotokatody z alkalických kovů (gen. 2) rychlejší než GaAs (gen. 3) s časy sepnutí v řádu jednotek nanosekund [15]. Rychlá spínání jsou vhodná pro záznam vysokorychlostních dějů. Pro pozorovací použití postačí spínací frekvence v řádu stovek Hz.

6.6 Měření proudu stínítka

Proud stínítkem určuje výstupní jas fosforové obrazovky, ten je měřen úbytkem napětí na odporu tzv. low-side metodou a následně zesílen kaskádně řazenými diferenciálními zesilovači. Hranice maximálního povoleného proudu stínítkem je uváděna 30 nA [13], nebo až 100 nA [14].



Obr. 26: Diferenciální zesilovač s OZ

$$A = \Delta U \cdot \frac{R_{19}}{R_{16}} \quad (7)$$

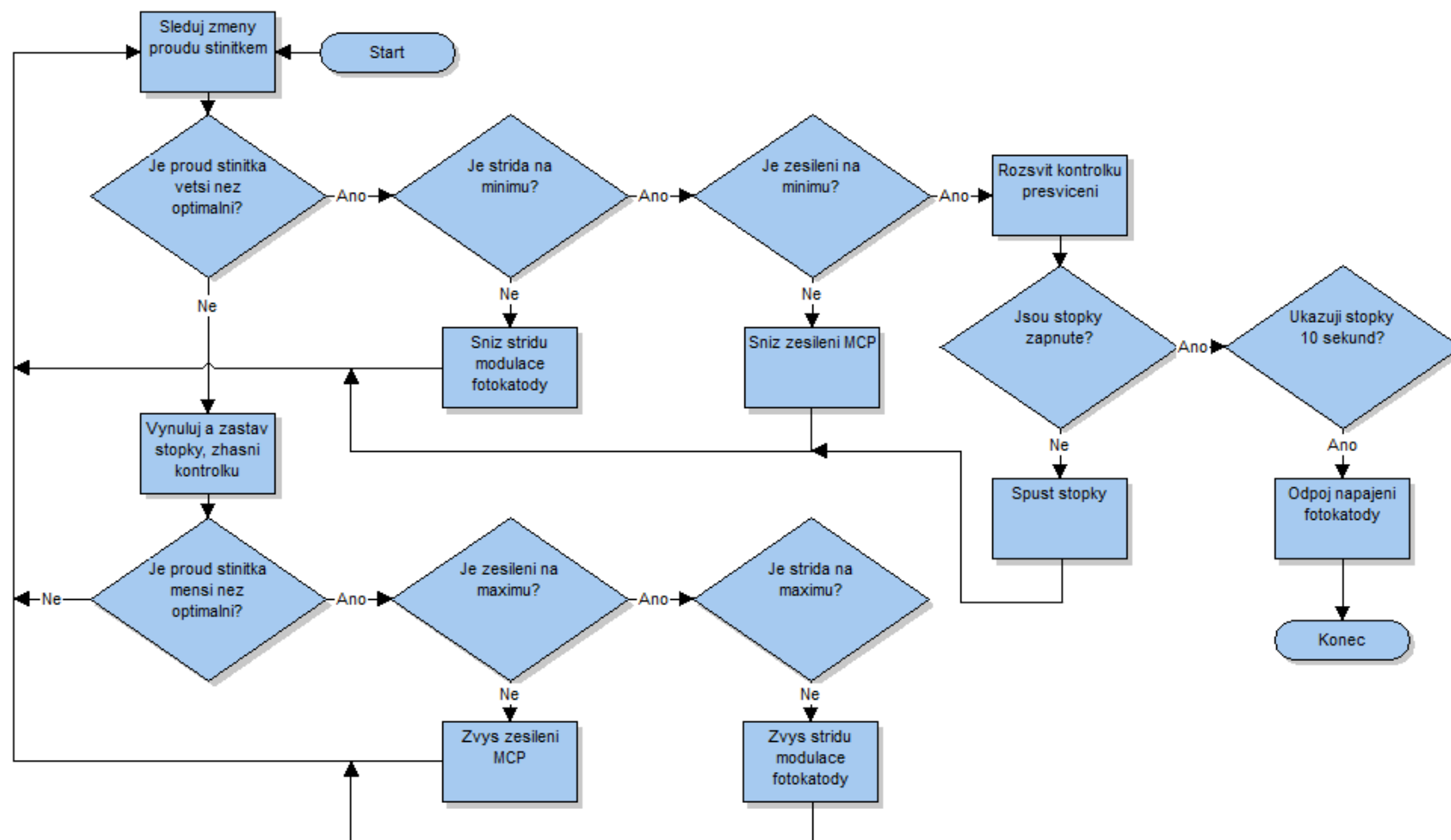
Zesílení diferenciálního zesilovače je dáno rovnicí (7), pro hodnoty ze schématu na obr. 26 je zesílení prvního stupně rovno $A = 250/20 = 12,5$. V případě tří za sebou

6.7 Řídící obvod

- Vnitřní oscilátor – až 4 MHz
- Programová paměť – 1792 B
- 12 vstupně/výstupní pinů – z toho 8 s 10 bitovým A/D převodníkem
- Jeden komparátor
- Dva časovače – 8 a 16 bit

- 6 výstupů pro řízení děliče napětí
- 2 výstupy pro spínání fotokatody
- 1 výstup pro kontrolní LED
- 2 analogové vstupy pro uživatelské nastavení hranice zesílení a jasu
- 1 analogový vstup pro měření proudu





Obr. 28: Vývojový diagram programu

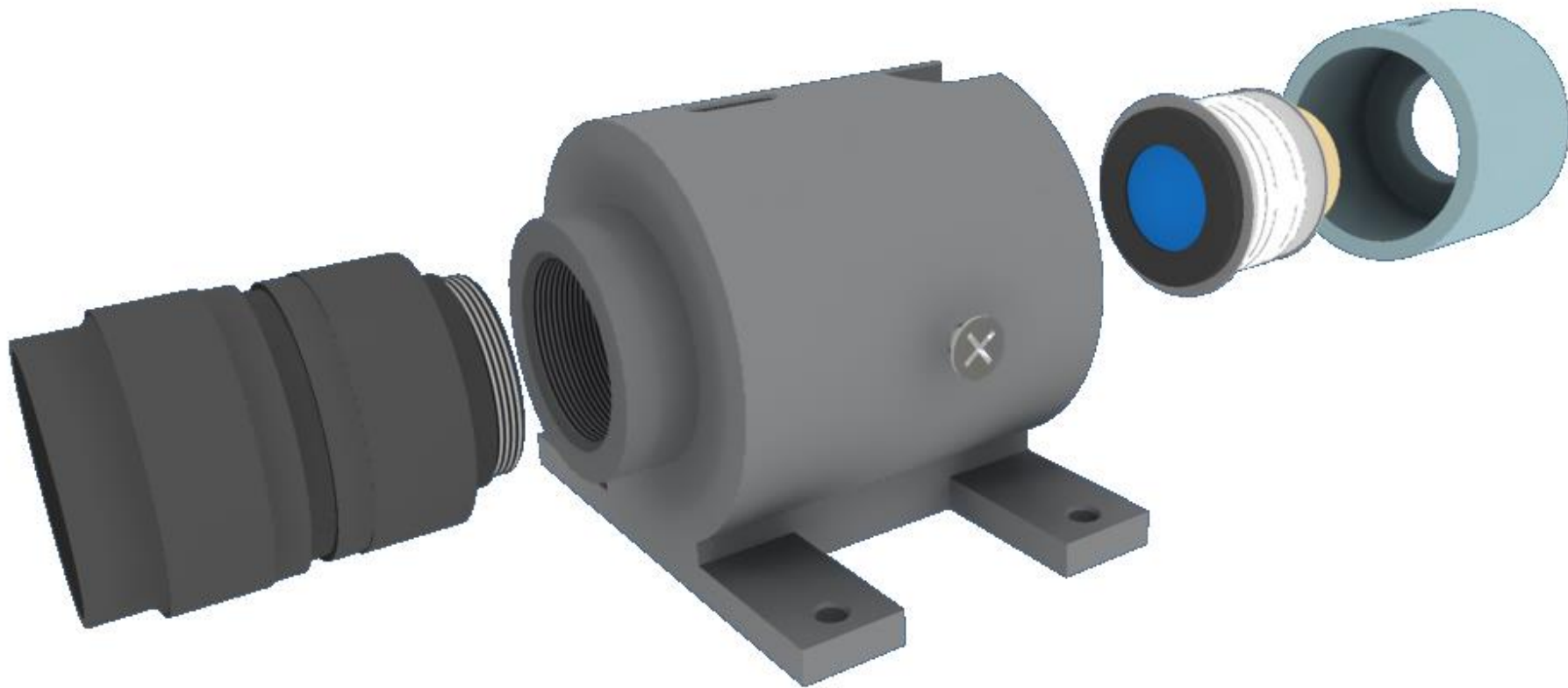
6.8 Přípravek

Nutným krokem k získání obrazu přes trubici je přidat objektiv, který zaostří pozorovaný obraz na fotokatodu. Objektiv má určité parametry:

- Ohnisková vzdálenost – kombinací ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru lze dosáhnout různých zvětšení, pokud trubice na stínítku obraz vůči fotokatodě zvětšuje, či zmenšuje, je nutné tento poměr také zahrnout. Moderní trubice s MCP mají poměr průměru stínítka k průměru fotokatody roven jedné, trubice s kuželovou anodou zpravidla menší než 1 (zmenšují obraz).
- Aktivní průměr – objektivem obsluhovaná plocha by měla pro co největší efektivitu přesně pokrýt plochu fotokatody.
- Světelnost – udává ztráty ve skle, definované jako poměr ohniskové vzdálenosti k průměru vstupní pupily, značeno jako tzv. F číslo
- Ošetření povrchů čoček – antireflexní vrstvy, vrstvy pro korekci chromatické aberace, filtrační vrstvy upravující propustnost určitých vlnových délek.

Moderní přístroje nočních vidění bez zvětšení (obraz 1:1) mají objektivy ohniskové vzdálenosti 25 mm a světelnost F1,2. Pro trubice v rámci projektu jsem použil 1/2" CCTV objektiv ohniskové vzdálenosti 25 mm, světelnosti F1,4 s vrstvami zvyšující propustnost v infračerveném spektru. Tento objektiv je kompromisem ceny, velikosti a světelnosti.

Pro ustavení objektivu vůči trubici, je nutné vyrobit přípravek (obr. 29), do kterého bude trubice zasunuta a objektiv bude našroubován na příslušný závit. Přípravek je navržen jako dvoudílný model vytvořený v CAD software Inventor (příloha B). Při dnešní rozšířenosti 3D tiskáren se tisk z ABS plastu jeví jako vhodná cesta k realizaci přípravku. Při návrhu modelu bylo třeba dbát na přesné ustavení, vzdálenost mezi fotokatodou a objektivem je dána velikostí FFD (flange focal distance), která pro výše zmíněný objektiv činí 17,52 mm. Při nedodržení této vzdálenosti by nebylo možné zaostřit obraz v celém rozsahu ostřících vzdáleností. Dále bylo vhodné upravit rozměry otvoru pro trubici tak, aby bylo možné přípravek použít pro více druhů trubic.



Obr. 29 : Model rozvržení přípravku

6.9 Použité trubice

V rámci této práce byly použity dvě 18mm MCP trubice. První trubice je typu MX9916, model M801-001 firmy Litton, s fotokatodou 2. generace na svazku optických vláken a inverzí obrazu. Druhá trubice je neznámého výrobce s fotokatodou 3. generace na plochem skle, výstup je ze svazku optických vláken, zda invertuje obraz zjistíme až při jejím použití. Obě trubice mají poruchu, kde první trubice negeneruje žádný obraz a druhá trubice sporadicky poblikává. Pro použití je nutné odstranit původní zdroje obalené kolem trubice, napájet vodiče a opět zaizolovat. Parametry jsou uvedeny v následující tabulce, sloupec s neznámou trubicí vychází z předpokladů minimálních parametrů trubic 3. generace.

Tab. 10: Parametry použitých trubic

Trubice	M801-001	Neznámá
Fotokatoda	S20	GaAs
Stínítko	P20	?
Rozlišení	>28 lp/mm	>45 lp/mm
Citlivost	>240 $\mu\text{A/lm}$	>1000 $\mu\text{A/lm}$
Spektrální citlivost	>15 mA/W	>100 mA/W
Zesílení	$18 \div 25 \times 10^3 \text{ fL/fc}$	$>30 \times 10^3 \text{ fL/fc}$
SNR	>4,5	>16
Rozměry (s PSU)	$\varnothing 43 \times 31 \text{ mm}$	$\varnothing 36 \times 31 \text{ mm}$
Životnost	2000 h	?

Shrnutí výsledků

Před samotným sestavením obvodů byly návrhy simulovány v software (Multisim, Circuit Simulator). Při vlastním testování obvodů docházelo k elektrickým výbojům mezi vinutími většího transformátoru ($p = 1/75$) a mezi součástkami násobiče napětí, zvětšení již velkých mezer mezi součástkami by znamenalo přepájení velkého množství součástek, řešením bylo ošetření povrchů a vinutí izolační barvou firmy Starbrite, která uvádí elektrickou pevnost jedné vrstvy až 1700 V/mm při 50% vlhkosti. Nanesením tří vrstev na všechny postižené plochy problém s výboji vyřešilo.

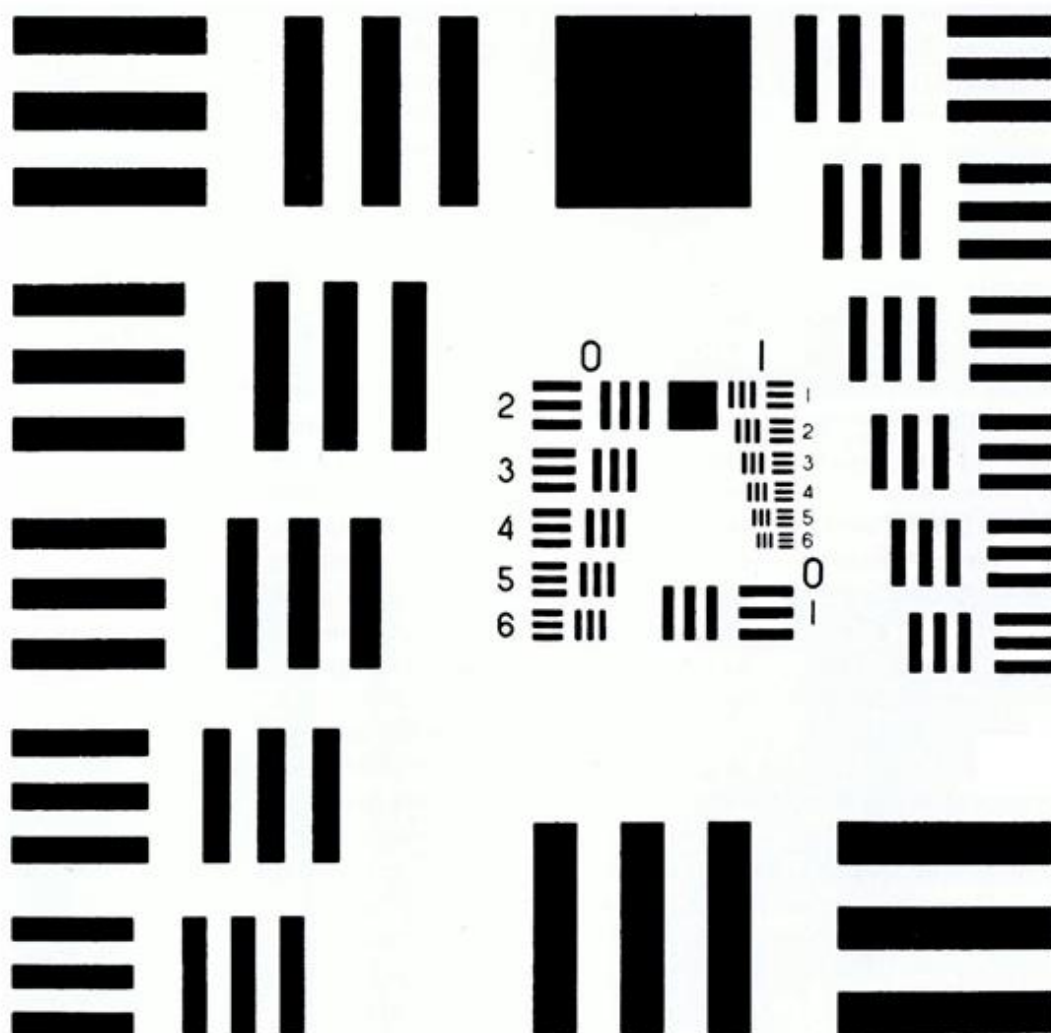
Při testech s trubicemi se ukázalo, že Litton M801-001 není schopná generovat obraz a to ani při nastavení vyššího zesílení (U_{MCP}), ani při překročení doporučené hranice napětí fotokatody (U_{PC}) 2. generace. Dá se tedy předpokládat, že je poškozená, či vzhledem k nízké životnosti již natolik opotřebovaná. Při zkoušce s neznámou trubicí 3. generace, po nastavení napětí na fotokatodě $U_{PC} = 212$ V a minimálním zesílení se jeví bez odezvy na stínítku. Na přibližně polovině rozsahu U_{MCP} se na stínítku objevují osvětlené chaoticky pohybující se body a obrazce. A konečně stabilní osvětlení stínítka při $U_{MCP} > 496$ V. V následujícím testu s objektivem bylo nutné doladit napětí na fotokatodě, jelikož obraz na stínítku byl rozmazaný – nízkého rozlišení. Nastavena byla maximální hodnota $U_{PC} = 741$ V. Výsledný obraz je již použitelný. V této konfiguraci byla sestava podrobena testování rozlišení obrazu v závislosti na světelných podmínkách a ověření funkce regulace jasu. Pozorovaným obrazem je potištěný papír, jehož obrazce jsou založeny na terči USAF 1951 (obr. 30). Výsledné obrazy (obr. 31, 32, 33) odpovídají nízké, střední a vyšší intenzitě osvětlení. Všechny tyto intenzity jsou daleko pod měřeným rozsahem luxmetru ($<< 1$ lx). Tato sada tří obrazů byla vyfocena nejdříve s expozicí 1/14 s a poté s expozicí 1 s pro potlačení šumu.

Technická univerzita v Liberci

Technická univerzita v Liberci

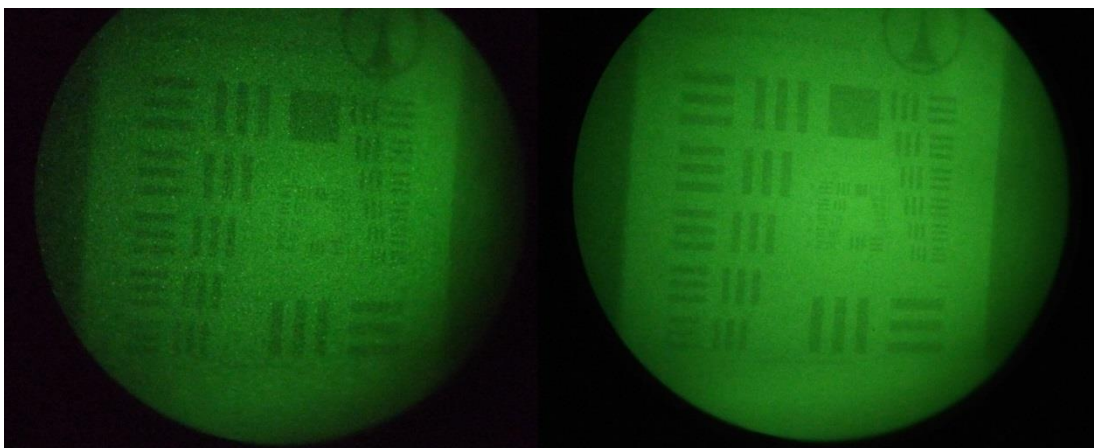
Technická univerzita v Liberci

Technická univerzita v Liberci



USAF 1951 resolution test pattern

Obr. 30 : Testovací terč



Obr. 31: Vysoká intenzita osvětlení



Obr. 32: Střední intenzita osvětlení



Obr. 33: Nízká intenzita osvětlení

Z obrázků výše je patrný světle zelený, nažloutlý odstín osvitu, trubice tedy disponuje fosforem P43, obraz je čistý, bez kazů a ostrý až ke krajům, zároveň je invertovaný. Z nastaveného napětí na fotokatodě $U_{PC} = 741 \text{ V}$ lze usoudit, že se jedná o trubici se standardním (silným) ochranným filmem na MCP.

Průběh regulace jasu nelze popsat pomocí statických obrázků, lze však konstatovat, že do jisté míry pracuje, ovšem problémem je zúžený rozsah U_{MCP} , který omezuje nastavitelná napětí na pouze 16 úrovní a vzhledem k tomu, že mezi kroky v horní hranici zesílení se její hodnota mezi dvěma úrovněmi liší o přibližně dvojnásobek (tab. 9), je v této horní hranici patrná skoková změna intenzity (za určitých podmínek – zvyšování/snižování intenzity světla). Pokud je intenzita světla konstantní, program se zacyklí. Řešením je rozdělení celého rozsahu zesílení na menší díly a kompenzovat příliš velký skok změnou střídání spínání fotokatody.

Tab. 11: Naměřená napětí a pracovní rozsah

	Úplný rozsah	Pracovní rozsah trubice 3. gen.
Potenciál MCP-stínítko	< 5892 V	5500 V
Potenciál na MCP	234÷964 V	496÷964 V
Teoretický zisk MCP	2,3÷10 470	48÷10 470
Potenciál fotokatoda-MCP stav vypnuto	-26 V	-26 V
Potenciál fotokatoda-MCP stav zapnuto	212÷741 V	741 V

Tento prototyp napájecích obvodů lze využít prakticky pro všechny trubice s mikrokanálovou destičkou s průměrem vstupního a výstupního okénka 18 mm. Tento výčet tedy zahrnuje většinu dnes, i v minulosti, používaných trubic generace 2, 2+, 3 a 3+.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se a porozumět problematice elektronových trubíc užívaných v přístrojích nočního vidění. V první kapitole je elementární popis funkce a konstrukce nezbytných dílčích součástí – fotokatody, mikro-kanálové destičky, fosforového stínítka a napájecí elektroniky. Další kapitoly jsou věnovány výkonnostním (kvalitativním) parametrům těchto trubíc a jejich dělení do 4 generací, následované souhrnem finální podoby kompletních trubíc připravených k použití a rozdíly mezi nimi. Závěrečná kapitola teoretické části popisuje vznik a nástin řešení poruch na přístrojích nočního vidění.

Pomocí nabytých znalostí z teoretické části se v té praktické řeší stavba prototypu napájecích a řídicích obvodů pro trubice s mikro-kanálovou destičkou. Jednotlivé úkony jsou rozděleny do navazujících částí. Hlavní ideou k získání potřebného vysokého napětí, které je pro tyto elektronové trubice zásadní, bylo využití transformátorů s velkým převodem a násobičů napětí. Pro nastavení pracovního rozsahu je využito principu děliče napětí a potřebné úkony řízení obstarává 8 bitový mikrokontrolér. K dokončení prací na prototypu a zahájení testování nepřispívala nedostupnost některých součástek a soustavné problémy s izolací – ty nadobro vyřešil izolační lak. Po zahájení testování dvou dostupných trubíc na sestaveném prototypu, se ukázalo, že jedna z trubíc vůbec nefunguje. Naštěstí byla ta druhá v pořádku a podařilo se dosáhnout kýženého výsledku, byť s omezeními, které se ovšem nedali předpovídat.

Pokračováním práce na tomto prototypu by mohlo být odladění řídicího programu a navýšení úrovně zesílení pro plynulý přechod jasu v celém rozsahu. Po vybavení prototypu CCD kamerou, by mohl být využit jako měřicí úloha – experimentální měření rozlišení trubice.

Literatura

- [1] SEITZ, Peter. Albert, J. P., THEUWISSEN. *Single Photon Imaging*. Springer, 2011, ISBN 978-3-642-18442-0
- [2] XX1332 Philips Image Intensifier. [online]. 2013. Dostupné z: http://www.abex.co.uk/sales/optical/night_vision/intensifiers/xx1332/
- [3] Lambert Instruments. Third Generation Image Intensifiers. [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.lambertinstruments.com/technologies-1/2014/12/4/third-generation-image-intensifier>
- [4] Photonis. How it works/Technical. [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.photonis.com/en/content/102-nightvision-how-it-works>
- [5] Stanford Computer Optics. The Phosphor Screen. [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.stanfordcomputeroptics.com/technology/image-intensifier/phosphor-screen.html>
- [6] Litton Systems, Inc. Night vision device having an image intensifier tube, microchannel plate and power supply for such an image intensifier tube, and method. Spojené státy americké. Patentový spis US6087649. 11.7.2000
- [7] Inframet. Image intensification. [online]. 2015. Dostupné z: http://www.inframet.com/eimage_intensifier_tubes.htm
- [8] Intas. Nivitech. [online]. 2002. Dostupné z: <http://www.nivitech.com/nightvision-gnl.htm>
- [9] Del Mar Photonics. Microchannel Plates. [online]. 2015. Dostupné z: http://www.dmphotonics.com/MCP_MCPIImageIntensifiers/mcp_references.htm
- [10] Compasscall. EBI importance. In: AR15.com Night Vision Forum [online]. November 29, 2011 [vid. 2014-10-14]. Dostupné z: <https://www.ar15.com/archive/topic.html?b=6&f=18&t=357026>

- [11] Last_lancer. Picture request please. In: AR15.com Night Vision Forum [online]. December 30, 2007 [vid. 2014-11-29]. Dostupné z: <https://www.ar15.com/archive/topic.html?b=6&f=18&t=233555>
- [12] Xavier B., Blaze Labs Research. Experiment 15 – Cockroft Walton Multiplier. [online]. 20xx. Dostupné z: <http://www.blazelabs.com/e-exp15.asp>
- [13] Hamamatsu Photonics K.K. Image intensifier apparatus. Spojené státy americké. Patentový spis US5510588. 23.4.1996
- [14] Eastman Kodak Comp. Image intensifier photocathode protection circuit. Spojené státy americké. Patentový spis EP1139382. 4.10.2000
- [15] Hamamatsu Photonics. Resources. [online]. 2015. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/II_TII0004E.pdf



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

NAPÁJECÍ OBVODY PRO FOTONÁSOBIČE UŽÍVANÉ V PŘÍSTROJÍCH NOČNÍHO VIDĚNÍ

Přílohy bakalářské práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor práce: **Patrick Albrecht**

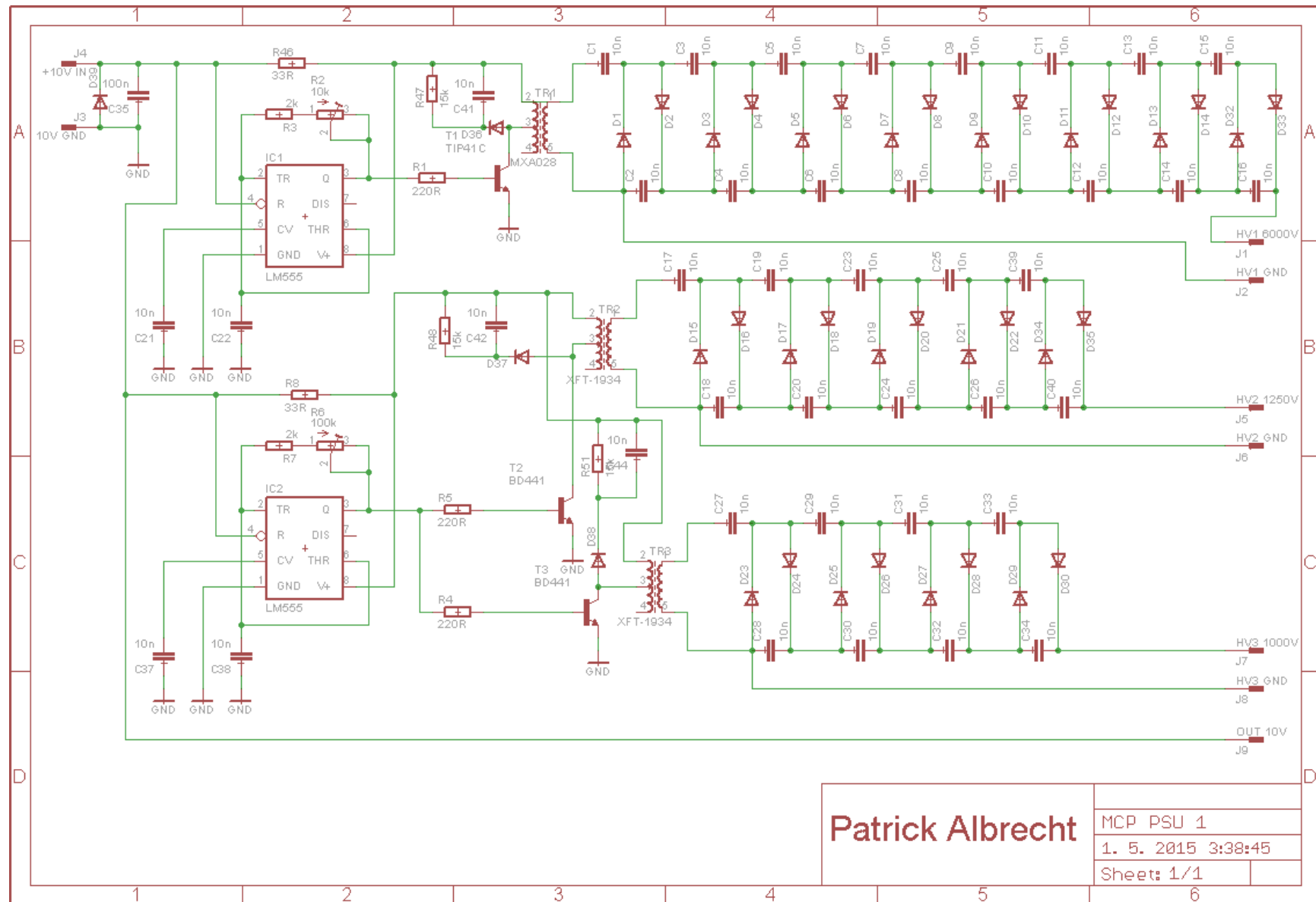
Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Seznam příloh

A Elektrické schéma	55
B Výkres přípravku	58
C Nejpoužívanější přístroje nočního vidění	61

Příloha A

Elektrické schéma



Příloha B

Výkres přípravku

Příloha C

Nejpoužívanější přístroje nočního vidění

AN/PVS 4 (1978-dodnes)

Přístroj 2. generace, využívá 25 mm měnič s elektrostatickou inverzí obrazu (kuželová anoda), manuální ovládání zisku. Používal se na různých ručních zbraních od M16A2, M249, M240 až po FIM-92 Stinger (s hybridním měničem gen. 3+1 s extrémním ziskem). Je možné instalovat měnič 3. generace, který ovšem není na úrovni pokročilejších 18 mm měničů

Optika:

Zvětšení	3,8x
Zorný úhel	14,5°
Objektiv	95 mm,F/1,2 kat.

Rozměry:

Délka	32 cm
Výška	12 cm
Šířka	10 cm
Váha	1820 g

Trubice:

Typ	25 mm, 2-3. gen
Rozlišení	32 lp/mm
Zesílení	20 000+ FL/Fc

Napájení:

Napětí	3 V, spec., 2xAA
Výdrž	40 h



AN/PVS 5 (1973-1999)

Binokulární brýle 2,2+ a později i 3. generace, určeny kupevnění na hlavu. Díky dvěma měničům zachovává prostorové vidění. Používán byl jak řidiči, tak piloty vrtulníků. Byl modernizován až na verzi D, která měla měniče 3 generace. Řešení upevnění na hlavu a kompletní překrytí oblasti očí bylo problematické zejména pro piloty, kteří potřebovali sledovat přístrojovou desku. Jeho objektivy patří mezi nejlepší, co kdy byly na masově používaných přístrojích použity (se světelností F1,01 - 1,05 u verze C a D). Přístroj má vlastní zdroj infračerveného přísvitu.

Optika:

Zvětšení	1x
Zorný úhel	40°
Objektiv	26,8 mm, F/1,1

Rozměry:

Délka	15 cm
Výška	12 cm
Šířka	15 cm
Váha	960 g

Trubice:

Typ	18 mm, 2-3. gen
Rozlišení	32-51 lp/mm
Zesílení	15 000+ FL/Fc

Napájení:

Napětí	3 V, spec. CR123
Výdrž	20 h



AN/PVS 7 (1986-dodnes)

Bi-okulární brýle 2. a 3. generace, nahrazující PVS 5. Obsahuje pouze jednu, z toho důvodu jsou menší, lehčí a hlavně levnější. Byly modernizovány až na současnou verzi D. Verze C, vypadá stejně jako A, ovšem je plně vodotěsná do 60 stop (18 metrů). Verze B/D jsou si také velice podobné. První verze byly dodávány s měniči 2. generace. Upevňují se na hlavu pomocí náhlavní montáže nebo přímo na výklopnou montáž k helmě. Díky tomu, že obě oči pozorují přes jeden měnič stejný obraz, dochází ke ztrátě prostorové orientace. Má vlastní zdroj infračerveného světla. Mezi příslušenstvím je 3x zvětšující rychlo-nasazovací objektiv nebo projekční kompas.

Optika:

Zvětšení	1x
Zorný úhel	40°
Objektiv	27 mm, F/1,2

Rozměry:

Délka	15 cm
Výška	7,5 cm
Šířka	16 cm
Váha	630 g

Trubice:

Typ	18 mm, 2-3. gen
Rozlišení	36-72 lp/mm
Zesílení	20÷80 x 10 ³ FL/Fc

Napájení:

Napětí	3 V, spec., 2xAA
Výdrž	30 h



AN/PVS 14 (2000-dodnes)

Víceúčelový monokulár 3. generace, nástupce PVS 7. S možností manuální regulace jasů. Upevnění na hlavu, helmu, zbraň nebo použití jako kapesní pozorovací přístroj. Umožňuje použití ochranných brýlí a ochranných plynových masek. Volné oko si zachovává přirozené „noční“ vidění, poskytuje dostatečné prostorové vidění a větší přehled.

Optika:

Zvětšení	1x
Zorný úhel	40°
Objektiv	27mm, F/1,2

Trubice:

Typ	18 mm, 3. gen
Rozlišení	64-81 lp/mm
Zesílení	40÷100 x 10 ³ FL/Fc

Rozměry:

Délka	12 cm
Výška	5,5 cm
Šířka	5 cm
Váha	392 g

Napájení:

Napětí	1,5-3V, 1 nebo
2xAA	
Výdrž	20-30 h

