

Transimpedanční zesilovač pro otevřené optické spoje

Transimpedance amplifier for
opening optical channel

Miroslav Procházka

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Institut řízení procesů a aplikované informatiky

PODKLAD PRO ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PRACOVNÍ NÁZEV TÉMATU:

Transimpedanční zesilovač pro otevřené optické spoje

VEDOUCÍ PRÁCE:

doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte zásady a způsoby konstrukce transimpedančního zesilovače podle literatury.
2. Navrhněte zapojení zesilovače.
3. Proveďte stavbu laboratorního vzorku zesilovače.
4. Proveďte měření základních parametrů zesilovače s důrazem na šumové vlastnosti konstrukce.
5. Navrhněte a proveďte úpravy laboratorního vzorku.
6. Popište možné aplikace zkonstruovaného zařízení.

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

1. Saleh B.E.A., Teich M.C.: Základy fotoniky. Matfyzpress, Praha 1996
2. Firemní literatura EG&G OPTOELECTRONICS
3. Firemní literatura Stanford Research Systems
4. Míšek J., Kratěna L. (1979). Optoelektronika. SNTL, Praha
5. Fraden J.: Handbook of Modern Sensors 2-nd edition, AIP Press Springer 1996
6. Wait J.V., Huelsman L.P., Korn G.A.: Introduction to Operational Amplifier theory and applications, 2-nd ed. McGraw-Hill 1992
7. Rieke G.: Detection of Light, 2-nd ed. Cambridge University Press 2003

Rád bych poděkoval doc. RNDR. Vojtěchu Křesálkovi, CSc za vedení bakalářské práce a za zodpovězení všech otázek.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 02. 06. 2005

.....

Miroslav Procházka

Abstrakt

V bakalářské práci je probrána koncepce současných otevřených optických spojů s důrazem na klíčovou část spoje, transimpedanční zesilovač. Cílem práce je návrh tohoto zesilovače se zaměřením na šumové vlastnosti. Navržené zařízení bylo zkonstruováno a byly na něm naměřeny základní parametry. Na konci práce jsou popsány možné způsoby užití tohoto přístroje a návrhy dalšího vývoje.

Abstract

This bachelor thesis describe conception of the contemporary open optical connection with a view to key part of this connection, the transimpedance amplifier. The purpose of this work is proposal of the transimpedance amplifier for opening optical channels with a view to noise characteristics. Designed arrangement was realized and fundamental characteristics was measured for apparatus. Possible manners for apparatus using are described in conclusion those thesis.

OBSAH

ÚVOD.....	6
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	7
1.1 OPTICKÝ SPOJ.....	7
1.1.1 Elektromagnetické vlnění.....	7
1.1.2 Otevřený optický spoj.....	8
1.1.3 Vlastnosti infračerveného přenosu.....	10
1.1.4 Vlastnosti přenosového prostředí otevřeného optického spoje.....	11
1.2 ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	12
1.2.1 Elektroluminiscenční diody LED.....	13
1.2.2 Polovodičové laserové diody LD.....	14
1.3 DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	14
1.3.1 PN a PIN fotodiody.....	14
1.3.2 APD lavinová fotodiody.....	16
1.4 OPERAČNÍ ZESILOVAČE.....	17
1.4.1 Transimpedanční zesilovač.....	18
1.5 PŘÍKLADY VÝROBKŮ SVĚTOVÝCH SPOLEČNOSTÍ.....	21
1.5.1 LCA - S - 400K - SI firmy FEMTO.....	21
1.5.2 LCA - 30 -1T firmy FEMTO.....	22
1.5.3 TZA3033 firmy Philips.....	23
1.5.4 T-11-155-G-AGC firmy Optronics International Corp.....	24
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	25
2.1 NÁVRH ZAPOJENÍ ZESILOVAČE.....	25
2.2 REALIZACE ZESILOVAČE.....	26
2.2.1 Návrh zapojení zdroje.....	26
2.2.2 Návrh plošného spoje zdroje.....	27
2.2.3 Návrh plošného spoje zesilovače.....	28
2.2.4 Kompletace zesilovače.....	29
2.3 MĚŘENÍ NA NAVRŽENÉM ZESILOVAČI.....	33
2.3.1 Měření šířky pásma zesilovače.....	33
2.3.2 Měření šumových vlastností zesilovače.....	36
2.3.3 Měření citlivosti v závislosti na úhlu natočení ke zdroji záření.....	37
2.4 DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	38
ZÁVĚR.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	45
SEZNAM TABULEK.....	46
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

ÚVOD

Datová komunikace zprostředkovaná optickými zařízeními má v dnešní době stále větší význam. Vedle spojů, využívající optická vlákna se na menší přenosové vzdálenosti začíná dostávat zatím málo využívaný typ přenosu, a to otevřený optický spoj. Tato technologie se hojně využívá již dlouhou dobu pro dálkové ovládání spotřební elektroniky. Malé nároky na dosah a rychlost přenosu vyhovují tomuto způsobu užití. Používané vlnové délky náleží do infračervené oblasti, a tudíž je přenos neviditelný. V důsledku nových trendů rozvoje elektrotechniky, stále dosahování vyšších rychlostí, a vývoj nových speciálních obvodů umožňuje zasadit otevřený optický spoj na vyšší kvalitativní úroveň. Moderní systémy otevřeného optického spoje pracují na vzdálenosti až několika kilometrů a přenos dosahuje rychlosti desítek Gb/s. Nespornou výhodou je skutečnost, že není potřeba pokládat žádné kabely stejně jako u radiového spoje. Navíc pro optické spoje neexistují poplatky za využívání provozních frekvencí. Nevýhodami otevřeného optického spoje jsou potom nutnost umístění komunikačních hlavic v přímé viditelnosti mezi sebou a závislosti spolehlivosti spoje na počasí, nebo jinými nepředpověditelnými skutečnostmi jako je přerušení optického svazku ptákem a podobně. Neblahý vliv na spojení má také změna počasí, která v průběhu roku vlivem teplotní roztažnosti materiálů způsobuje nakrucování nosné konstrukce hlavičky a tím vychylování optického záření mimo daný směr. Používané frekvence jsou odvozeny od propustnosti atmosféry, která vybízí k využívání tzv. atmosférických oken. Možnosti optických zařízení nabízí nesčetné množství použití.

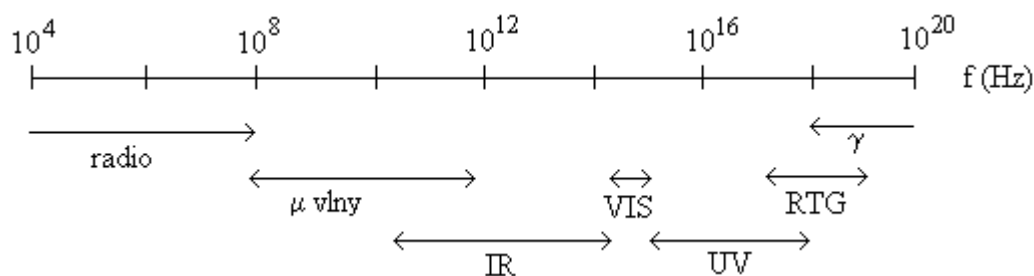
Cílem práce je návrh klíčové části otevřeného optického spoje, kterou je transimpedanční zesilovač. Na transimpedančním zesilovači závisí téměř všechny sledované vlastnosti otevřeného optického spoje. Na jeho šířce pásma záleží přenosová rychlost, na jeho šumových vlastnostech záleží dosah, event. energetická náročnost spoje.

Navržené zařízení bylo zrealizováno a byly na něm naměřeny základní parametry. Při návrhu a realizaci byl brán ohled na šumové vlastnosti zařízení. Sledovanými vlastnostmi byly šířka pásma, šumové vlastnosti, ze kterých odvozujeme dynamický rozsah zesilovače, a závislost citivosti zařízení na úhlu natočení ke zdroji optického záření.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Optický spoj

1.1.1 Elektromagnetické vlnění



Obr. 1. Rozdělení elektromagnetického spektra

Radiové vlny - v desítkách metrů (25m – 75m)

μ vlny - μ vlnné trouby, policejní radary

IR - Infračervené záření

VIS - Viditelné záření. (400nm – 750nm)

Mezi vlnovou délkou a frekvencí vlnění platí následující vztah (1).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

λ vlnová délka

v rychlost vlnění

f frekvence vlnění

Rychlost elektromagnetického vlnění se vypočítá podle vztahu (2).

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \quad (2)$$

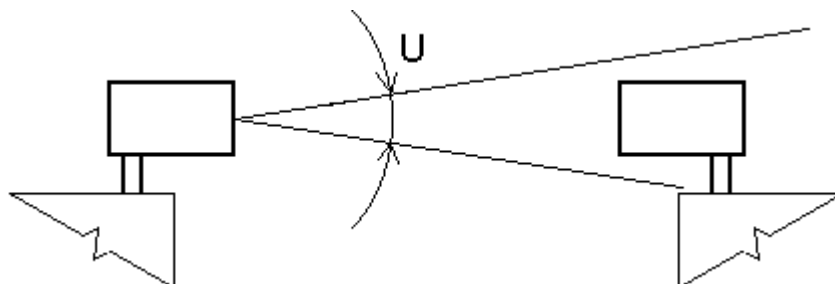
μ permitivita prostředí

ε permeabilita prostředí

Rychlost vlnění ve vzduchu se vypočítá z hodnot udávaných pro vakuum. $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

1.1.2 Otevřený optický spoj

Otevřený optický spoj je složen ze dvou hlavic pracujících v duplexním režimu. Přenos informace nastává pomocí optického svazku. Vysílač vysílá optický svazek s úhlem rozbíhavosti $U/2$ několik miliradiánů na přijímač. Mezi hlavicemi musí být přímá viditelnost, viz obr.2. Využívá se výhradně IR záření.



Obr. 2. Ozařování hlavice světelným svazkem, U je úhlová šířka svazku.

Vzdálenost mezi hlavicemi lze v nejjednodušším případě definovat vztahem (3).

$$E_z = \frac{I_z}{d^2} \quad (3)$$

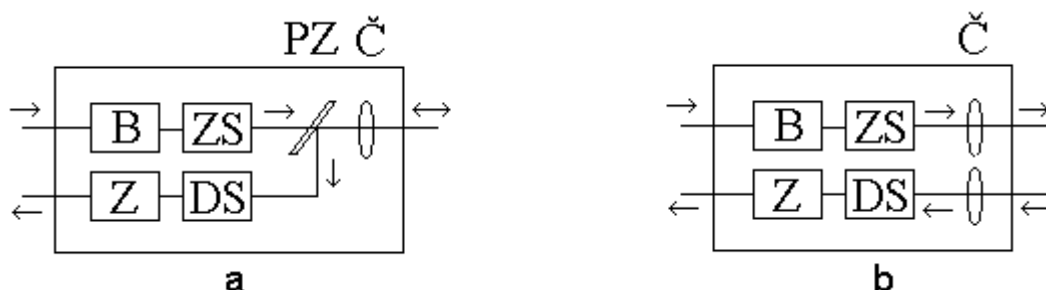
E_z ... zářivý výkon

I_z intenzita záření zdroje

d přenosová vzdálenost

Výpočet však musíme brát jen přibližně, protože např. u infračerveného přenosu používaného v uzavřených místnostech bývá díky odrazům tato vzdálenost větší.

Skladba hlavic otevřeného optického spoje odpovídá typu spoje. Mohou se lišit počtem vysílaných svazků, počtem použitých optických kanálů a metodou zvyšující dostupnost spoje. Bloková schémata dvou hlavic vysílajících jeden svazek na jedné vlnové délce jsou na obr. 3. Hlavice se liší v uspořádání optického systému.



Obr. 3. Skladba hlavic otevřeného optického spoje: a) s jednou čočkou, b) se dvěma čočkami.

B - Budič, Z - Zesilovač, ZS – Zdroj Světla (svítící dioda laserová nebo výkonová LED), DS –Detektor Světla (fotodioda PIN nebo APD), PZ - polopropustné zrcadlo, Č - čočka spojka.

Parametry otevřeného optického spoje lze rozdělit na stacionární a statistické. Stacionární parametry se týkají energetiky spoje, patří mezi ně přenosová rychlost, dosah a chybovost BER určenou vztahem (4).

$$BER = \frac{n_{ch}}{n} \quad (4)$$

n_{ch} ... počet chybně přenesených bitů

n celkový počet přenesených bitů

Statistické parametry jsou závislé na umístění hlavic a patří mezi ně procento času dostupnosti spoje Pds definovanou vztahem (5) a pravděpodobnost přerušení svazku ptákem PBE kdy dojde k přerušení optického svazku a tím výpadku spojení asi na 10 ms.

$$Pds = 100 \frac{\sum \Delta t_i}{T} \quad (5)$$

$\sum \Delta t_i$... součet časových úseků, pro které bylo žádané kritérium chybovosti dodrženo

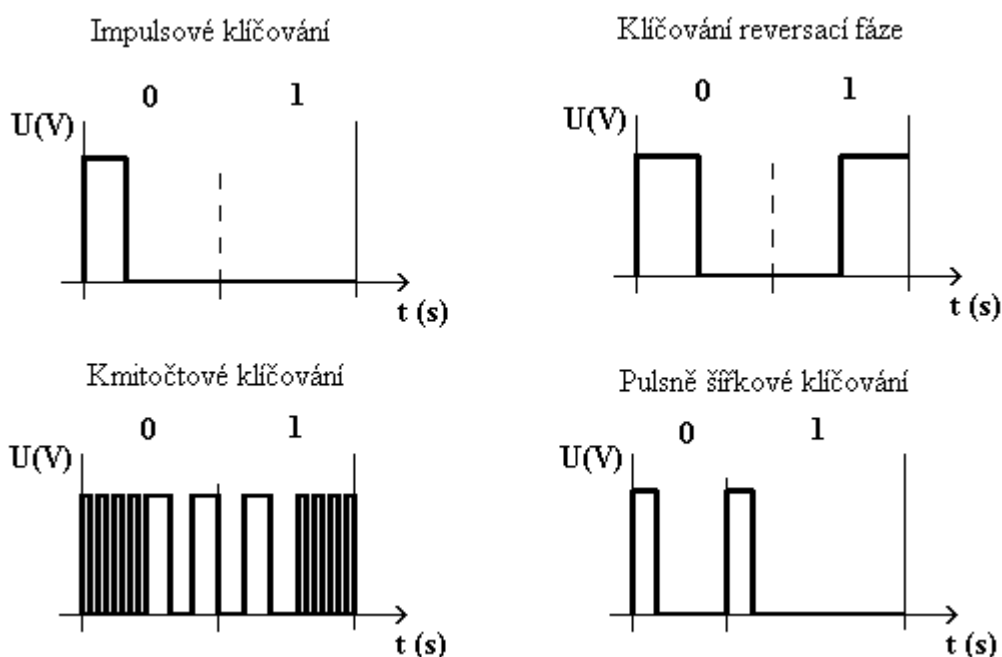
T celkový čas měření. Zpravidla jeden rok

V současné době vyráběné systémy otevřeného optického spoje pracují na vzdálenosti od stovek metrů až po vzdálenost několika kilometrů. Dosah závisí na použitém zdroji a

detektoru světla. Pro kratší vzdálenosti se používá soustava LED diod, pro delší vzdálenosti potom LASERY. Přenosová rychlost se pohybuje od jednotek Mb/s do 10Gb/s. Dalšími parametry jsou vlnová délka nosné vlny, typ světelného zdroje, typ detekční fotodiody, rozměry a hmotnost. Kromě jednosvazkových a jednokanálových metod přenosu se užívá vícesvazkových a vícekanálových metod přenosu pro zvýšení spolehlivosti a přenosové rychlosti. V hlavicích se ojediněle objevuje systém automatického dosměrování svazku, který kompenzuje směr vysílání. Výhodou takového spoje je rychlé sestavení a snadné překonání překážek jako například rušná cesta, železniční koleje, řeka a pod. Na používání spoje není potřeba zvláštních licencí jako při užívání rádiových spojů. Spoj nalézá uplatnění např. v síťové aplikaci. Další uplatnění spoje je v propojení oddělených, ale mezi sebou přímo viditelných objektů jako například dálkové ovládání elektroniky.

1.1.3 Vlastnosti infračerveného přenosu

Pro dálkové ovládání spotřební elektroniky se začal široce využívat přenos dat v infračervené oblasti. Používá se vysílač a přijímač signálu pro infračervenou část elektromagnetického spektra. Výhradně se využívá oblast vlnové délky v rozmezí 840 – 960nm. Objevuje se však nový standard využívající pásmo 700 – 1600nm. Standardně se používají čtyři druhy kódování. Jejich princip je zřejmý z obrázku 4.



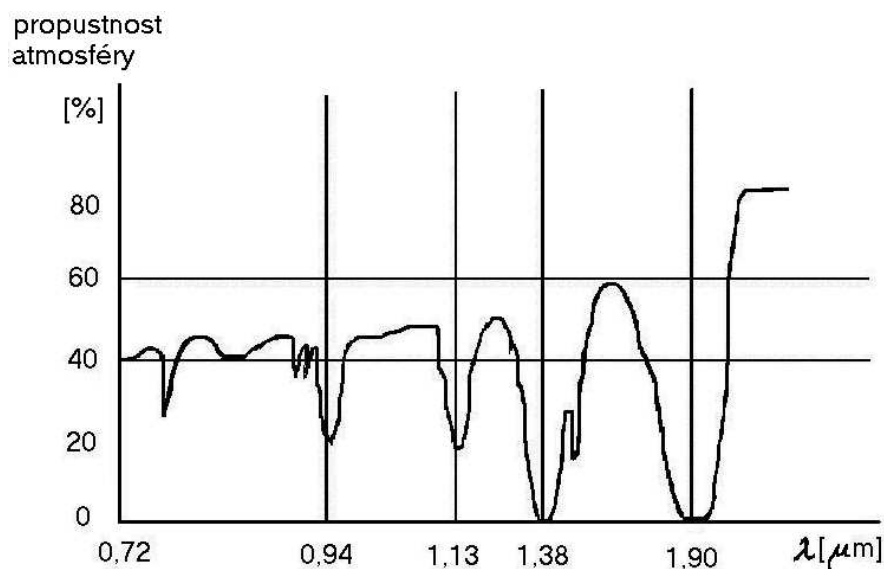
Obr. 4. Metody klíčování IR přenosu

Kmitočtové klíčování se téměř nepoužívá z důvodu energetické náročnosti. Některé firmy si pro své výrobky vytvořili vlastní klíčování. Jak bylo řečeno, IR přenos se využívá pro dálkové ovládání spotřební elektroniky, a tím vyvstává problém napájení vysílače, kterým jsou zpravidla baterie s malou kapacitou. Proud protékající vysílací diodou je proto omezen. Aby byla zajištěna bezpečnost přenosu, musíme veškerá opatření provést na straně přijímače. Využívají se zároveň dva způsoby. Přijímací fotodiody mají velice velkou aktivní plochu. Někdy až 8 mm^2 . Ty zároveň bývají umístěny ve speciálním pouzdře které zajistí selekci záření proti rušení.

1.1.4 Vlastnosti přenosového prostředí otevřeného optického spoje

Přenosovým prostředím otevřeného optického spoje je atmosféra. Ta je obecně nestacionární a nehomogenní. Index lomu se mění s polohou a časem. Vlastnosti atmosféry podstatně ovlivňují kvalitu přenosu. Při šíření světelného paprsku atmosférou dochází k jeho útlumu, který se vyjadřuje koeficientem útlumu [dB/km]. Koeficient útlumu je závislý na vlnové délce procházejícího záření. Další vliv na útlum světelné vlny má mlha a déšť. Mlha utlumuje podstatně více než déšť. Vliv na šíření optické vlny mají i tzv. turbulence. Jde o atmosférický jev který má za následek náhodné vznikání a zanikání nehomogenit indexu lomu. Ty mají tvar koule o velikosti od několika mm do několika km. Pozorujeme je jako známé třepotání vzduchu nad zahřátými plochami. Důsledkem je krátkodobé odchýlení směru paprsku od osy šíření. Další působení na spoj s sebou nese změna teploty. Vlivem tepelné roztažnosti stativu hlavice dochází odchýlení optického svazku. Proto musíme uvažovat dostatečně velký úhel rozbíhavosti svazku.

Atmosféry má schopnost odfiltrout některé vlnové délky, proto vlnová délka vysílaného paprsku musí ležet v tzv. atmosférických oknech vyznačených na obrázku 5 [19].



Obr. 5. Závislost propustnosti atmosféry na vlnové délce procházejícího záření.

1.2 Zdroje optického záření

Zdroje optického záření jsou zařízení emitující světelné záření. Pro naše potřeby bude zaměřeno na elektroluminescenční diody - LED a Laserové diody.

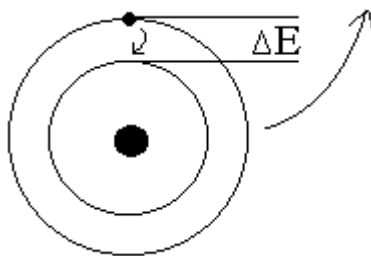
Energie vyzářeného fotonu se vypočítá ze vztahu (6).

$$E = f \cdot h \quad (6)$$

f ... frekvence záření

h ... Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$)

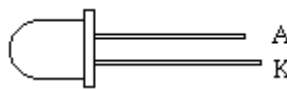
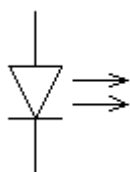
Narazí-li do atomu foton s energií odpovídající rozdílu energií mezi stávající a možnou vyšší hladinou valenčního elektronu, je foton pohlcen a elektron v atomu je vybuzen na vyšší hladinu. Spadne-li naopak v atomu elektron z vyšší hladiny na nižší, je uvolněn foton s kmitočtem odpovídajícím rozdílu energií obou hladin. Excitovaný elektron se na vyšší hladině dlouho neudrží a po určité době života opět spadne na nižší hladinu. V diodě LED se elektrony excitují napětím na NP přechodu a při jejich návratu do normálního energetického stavu se emituje světlo $f \cdot h = \Delta E$



Obr. 6. Fotoemise

1.2.1 Elektroluminiscenční diody LED

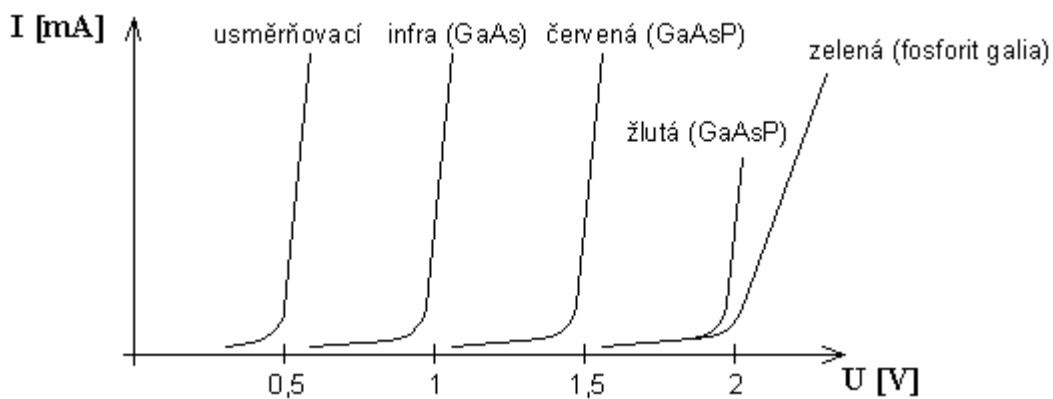
LED se budí vždy v propustném směru. Světelná energie se generuje prostřednictvím "spontánní emise", fotony se generují v oblasti přechodu P-N jeden na druhém nezávisle. Na obrázku 7 je schematická značka a fyzický vzhled LED diody.



Obr. 7. Schematická

značka a fyzický vzhled LED diody

LED diody využívají různé napětí i proud. Je to dáno jejich barvou a velikostí. Voltampérová charakteristika LED diod z různých materiálů je na obrázku 8.



Obr. 8. VA-charakteristiky LED diod

Diody z GaAs emitují nízký výkon ale mají široký vyzařovací diagram. Nejsou vhodné pro navázání do optického vlákna. Účinnost vazby je kolem 1%. Nevýhodami jsou velká chromatická disperze $\Delta\lambda = 20 - 150\text{nm}$ a vysoká kapacita přechodu což omezuje rychlost přenosu. Max. stovky Mb/s. Výhodami jsou potom nízká cena, dlouhá životnost a malá teplotní závislost.

1.2.2 Polovodičové laserové diody LD

Polovodičová laserová dioda je realizovaná na polovodiči. Elektrony se do vyšší hladiny dostávají napětím na přechodu PN oproti použití světelného záření běžného u klasických laserů. Oproti klasickým laserům mají menší rozměry a snadné napájení ale má horší vlastnosti. Méně koherentní světlo, horší chromatičnost, menší výkon a mají velmi krátkou životnost, ale oproti LED mají podstatně větší světelný výkon a vyšší spektrální čistotu o několik řádů. Záření je koherentní a proto se velmi dobře navazuje do vlákna. Při přenosu se proto projevuje jen velmi nízká chromatická disperze $\Delta\lambda = 0,1 - 5\text{nm}$. Muže být proto dosaženo větších rychlostí, řádově stovky Gb/s. Nevýhodami oproti LED jsou horší linearita, krátká životnost a vyšší cena.

1.3 Detektory optického záření

Fotodetektory můžeme rozdělit na fotodetektor s jednoduchým PN přechodem, který se zpravidla nepoužívá. Má vysokou kapacitu, a tedy je pomalý. PIN dioda má mezi polovodiči P a N vložený intrinsický polovodič, viz. obrázek 10, který se chová jako izolant, vzdálenost P a N je tedy větší a kapacita menší. Nejcitlivější je APD - lavinová fotodioda s vnitřním ziskem kde, vlivem silného el.pole dochází k lavinovému vzniku volných elektronů. Diody se polarizují výhradně v závěrném směru.

1.3.1 PN a PIN fotodioda

PN a PIN fotodiody pracují tak, že foton, který vstupuje do polovodiče s dostatečnou energií může být absorbován, přičemž vzniklý volný elektron a díra vytváří v polovodiči

napětí - fotovoltaický jev, anebo zvětšují jeho vodivost - fotovodivostní jev. Maximální vlnová délka, při níž může ještě dojít k absorpci je dána vztahem (7). [18]

$$\lambda_0 = \frac{1,24}{\Delta W} \quad (7)$$

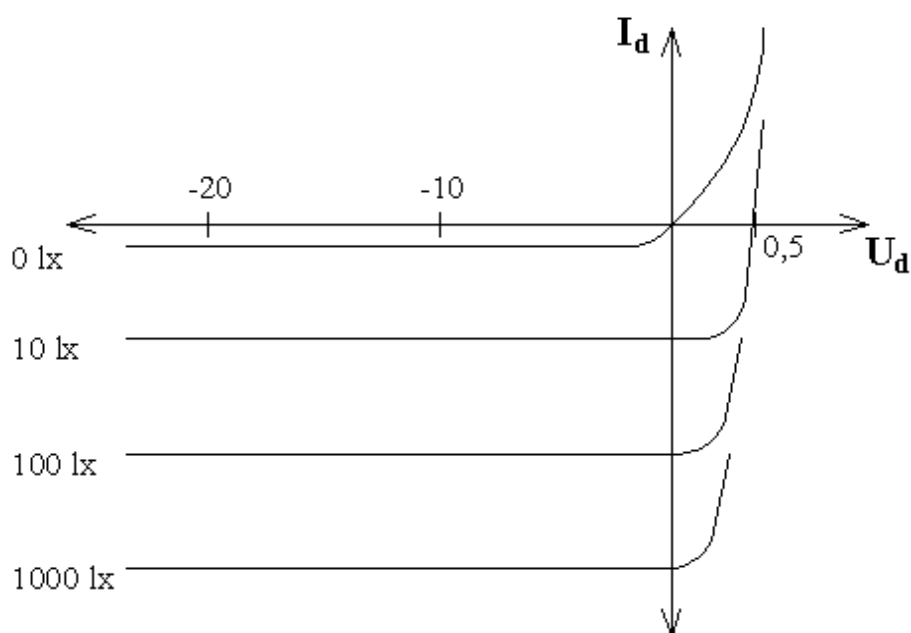
λ_0 maximální vlnová délka, při které může dojít k absorpci [μm]

ΔW ... šířka zakázaného pásu [eV]

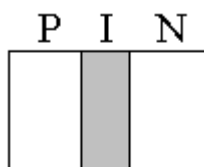
Voltampérová charakteristika PN a PIN diody zasahuje do tří kvadrantů. Viz.obr 9. Ve IV. kvadrantu pracuje fotodioda ve fotovoltaickém, též hradlovém režimu a chová se jako aktivní prvek. Dopadají-li na fotodiodu v hradlovém režimu fotony o energii větší než je šířka zakázaného pásu ΔW , dochází k jejich absorpci za vzniku párů elektron - díra. To znamená uvolnění elektronů do vodivostního pásu a děr do valenčního pásu.

Fotodiody v hradlovém režimu slouží jako solární články nebo detektory s vysokou citlivostí, protože jediným zdrojem v obvodu je právě fotodioda, což znamená omezení šumu ve srovnání s režimem fotovodivostním.

Ve fotovodivostním, též odporovém režimu se dioda chová jako pasivní prvek, jehož elektrický odpor klesá s intenzitou ozáření. Fotodioda je připojena ke zdroji napětí, který ji polarizuje do závěrného směru. Dopadající fotony generují volné elektrony a díry jako v případě hradlového režimu. Z důvodu závěrné polarizace je však na PN přechodu vyšší intenzita elektrického pole, tato oblast je širší a proto generované volné elektrony driftují vyšší rychlostí ke katodě, zatímco díry k anodě. S rostoucí rychlostí nosičů se zvyšuje přenosová rychlost fotodiody. Nejrozšířenější použití je tedy s fotodiodou PIN, na jejíž střední oblasti o veliké ploše s téměř vlastní vodivostí o velikém odporu se dosáhne vysoké intenzity elektrického pole. Toto pole zvyšuje rychlost nosičů a tím i šířku pásma. Nevýhodou je průtok temného proudu za tmy, jehož velikost je teplotně závislá. Proto není toto zapojení vhodné pro měření malých signálů.



Obr. 9. VA-charakteristika fotodiody



Obr. 10. Struktura PIN fotodiody

1.3.2 APD lavinová fotodioda

Nedostačuje-li citlivost těchto fotodiód, je možné použít APD lavinových fotodiód, které vykazují vlastní zesílení. Toto zesílení je způsobeno přiložením velkého závěrného napětí, které urychluje vzniklé nosiče náboje natolik, že při srážce s mřížkou krystalu polovodiče dojde k vyražení dalších elektronů. Dojde k lavinové reakci. Výhoda vlastního zesílení je vykoupena náročnější konstrukcí fotodiody a nutností polarizace diody. K tomu je zapotřebí kvalitní stabilizovaný zdroj napětí o velikosti pro Ge diody řádově desítky voltů a pro Si diody řádově stovky voltů, přičemž konkrétní hodnota napětí je pro každou diodu, i ze stejného materiálu, různá.

1.4 Operační zesilovače

Název „Operační zesilovač“ pochází z dob analogové výpočetní techniky protože se používal pro matematické operace sčítání, odčítání, integraci, derivaci a další. Díky jeho vlastnostem, viz tab.I, bývá často ztotožňován s ideálním zesilovačem.

Na obrázku 11 [1] je schematická značka operačního zesilovače a jeho blokové znázornění. operační zesilovač se skládá ze tří částí. První je vstupní diferenční zesilovač, který pracuje v můstkovém zapojení. Následuje druhá střední část, která má zajistit co největší zesílení. Třetí výstupní část, kde se využívá komplementární zapojení koncového zesilovače.

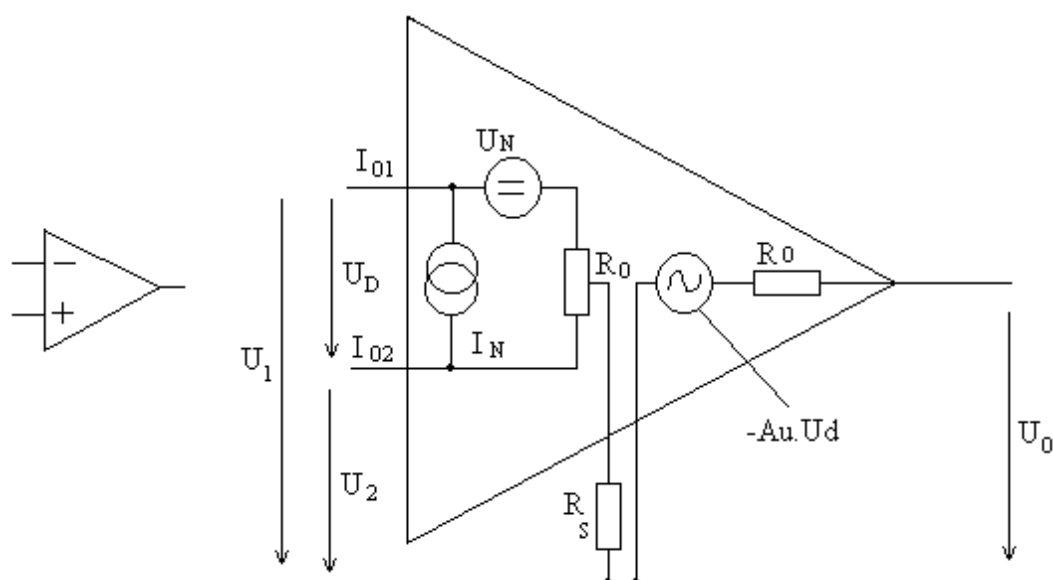
Pro ideální OZ platí, že při nulovém vstupním napětí bude i výstupní napětí nulové. U reálného OZ tomu tak ve skutečnosti není. Viz tabulka I. Rozdílové napětí na vstupu:

$$U_n = U_1 - U_2 \quad (8)$$

nulové není a nazýváme ho vstupní napěťová nesymetrie. Rozdíl vstupních proudů

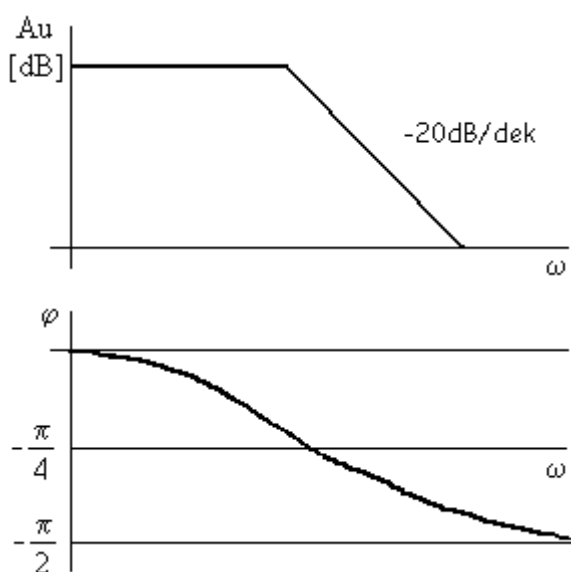
$$I_n = I_{01} - I_{02} \quad (9)$$

potom proudová nesymetrie. Tyto vlivy lze kompenzovat speciálními kompenzačními obvody.



Obr. 11. Schematické a blokové znázornění OZ

Obecná amplitudová a fázová frekvenční charakteristika je zobrazena na obrázku 12.



Obr. 12. Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika OZ

Tabulka I. Ideální a reálný OZ

Parametr	ideální OZ	reálný OZ
napětíové zesílení A_0	∞	$10^3 \div 10^7$
Napájecí napětí $\pm U_{cc}$		$\pm 2 \text{ V} \div \pm 200 \text{ V}$
Mezní kmitočet	∞	$10^3, 10^6, 10^8 \text{ Hz}$
proudová nesouměrnost vstupů	0	$10^{-8} \div 10^{-15} \text{ A}$
napětíová nesymetrie	0	$10^{-6} \div 10^{-2} \text{ V}$
Diferenciální výstupní odpor	0	$1 \div 1000 \Omega$
diferenciální vstupní odpor	∞	$10^5 \div 10^{15} \Omega$
nejmenší zatěžovací odpor		$1 \div 10^5 \Omega$
délka náběžné hrany	0	$10^{-9} \div 10^{-4} \text{ s}$

1.4.1 Transimpedanční zesilovač

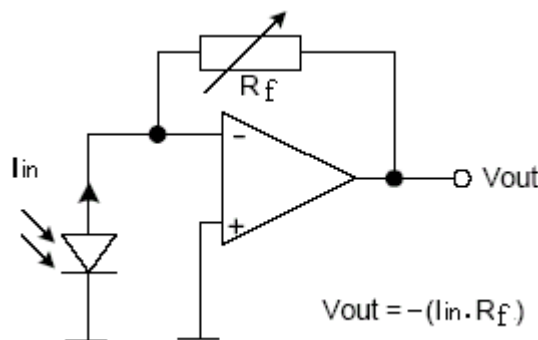
Optický signál je převeden pomocí lavinové fotodiody APD nebo PIN diody na elektrický proud tekoucí do vstupu transimpedančního zesilovače většinou označovaného anglickými zkratkami TIA (TransImpedance Amplifier) nebo OTI (Operational TransImpedance

amplifier), s přenosovou impedancí v rozsahu nízkých desítek kiloohmů. TIA je kritický blok optického přijímače. Jeho šum, výkon, zisk, a frekvenční odezva velkou měrou určí celkovou citlivost a rychlost přenosu dat z optického spojení.

Zesílení operačního zesilovače je velmi vysoké. Pokud připojíme zpětnovazební rezistor R_f tak výstupní napětí bude dáno vztahem (10).

$$U_{out} = -(I_{in} \times R_f) \quad (10)$$

To platí pro obr.13. Běžně toto zapojení nazýváme I/U převodník, tedy převodník proudu na napětí, který to také je, někdy se ale odvoláváme na "transimpedanční zesilovač," kde "zisk" nebo "transimpedance" je rovna R_f .



Obr. 13. Principiální zapojení TIA

Fotodiody však často mají vysokou kapacitu C_D a jestliže bude odvod zapojen podle obrázku.13, objeví se dva problémy. Jestliže velikost zpětnovazebního odporu R_f bude velká, potom zisk může být velký, ale odezva bude pomalá a časová konstanta ze vztahu (11) bude velká, což bude mít za následek výrazné omezení šířky pásma.

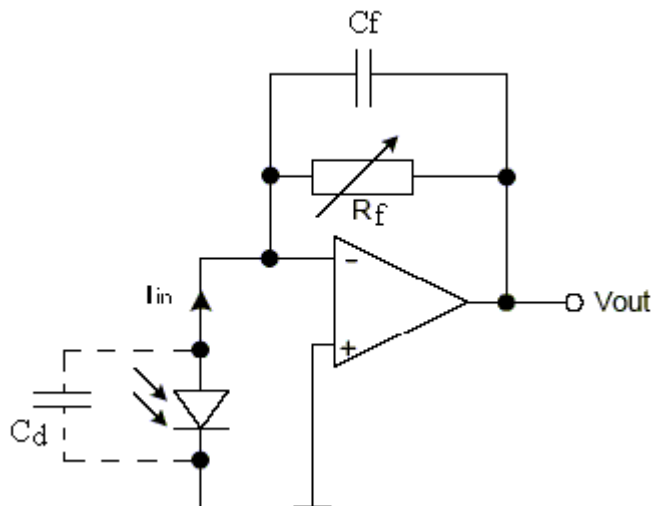
$$\tau = R_f \cdot C_D \quad (11)$$

Jestliže velikost zpětnovazebního odporu bude malá, dostaneme malou časovou konstantu, ale zisk bude nízký a poměr signálu k šumu SNR může být nepříjemný. Zapojení podle obrázku 13 navíc díky vstupní kapacitě OZ může způsobit nestabilitu. Můžeme navrhnout postačující kompromis anebo se problému vyhnout tak, že zapojíme obvod dle obr.14. Zde, časová konstanta není $R_f \cdot C_D$, ale mnohem menší. Navíc, zisk může být značně větší, protože nyní můžeme použít větší R_f .

Obvykle potřebujeme přidat zpětnovazební kondenzátor, pro jehož hodnotu se uvádí vztah (12) [10].

$$C_F \cdot R_F = C_{IN} \cdot R_{IN} \quad (12)$$

V takovém případě můžeme kapacitu fotodiody zanedbat.



Obr. 14. Upravené zapojení TIA

K výpočtu zpětnovazebního kondenzátoru mohou být použity vztahy (12), (13), (14), (15) které uvádí literatura [10].

Jestliže:

$$\left(\frac{R_F}{R_{IN}} + 1 \right) \geq 2\sqrt{GBW \cdot R_F \cdot C_D} \quad (12)$$

tak platí:

$$C_F = \frac{C_D}{2\left(\frac{R_F}{R_{IN}} + 1 \right)} \quad (13)$$

Jestliže:

$$\left(\frac{R_F}{R_{IN}} + 1 \right) < 2\sqrt{GBW \cdot R_F \cdot C_D} \quad (14)$$

tak platí:

$$C_F = \sqrt{\frac{C_D}{GBW \cdot R_F}} \quad (15)$$

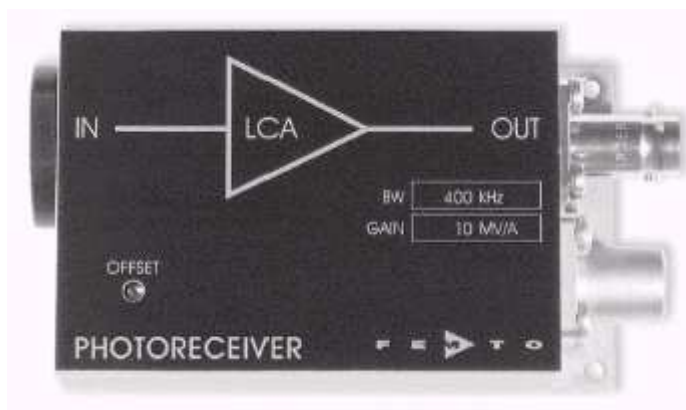
GBW ... Gain - BandWidth - součin zisku a šířky pásma, jakostní číslo zesilovače.

Význam ostatních veličin je zřejmý z obrázku 14.

1.5 Příklady výrobků světových společností

Na trhu se setkáme s různými zařízeními obsahujícími TIA, zejména v kombinaci s fotodiodou. Zde je uvedeno několik produktů významných firem s popisem jejich vlastností a vnitřních zapojení.

1.5.1 LCA - S - 400K - SI firmy FEMTO



Obr. 15. Fotodetektor LCA-S-400K-SI od firmy FEMTO

Fotodioda je již integrována do samotného zařízení.

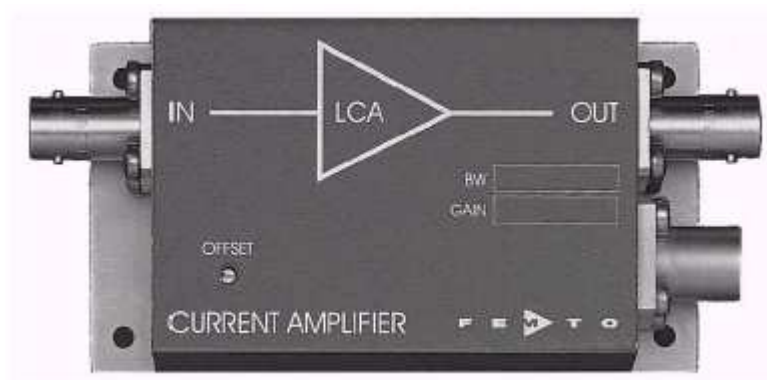
Rysy:

- Si-PIN-fotodetektor
- Spektrální rozsah 400 ... 1050 nm
- Transimpedance (zisk) 1×10^7 V/A
- šířka pásma DC ... 400 kHz

Aplikace:

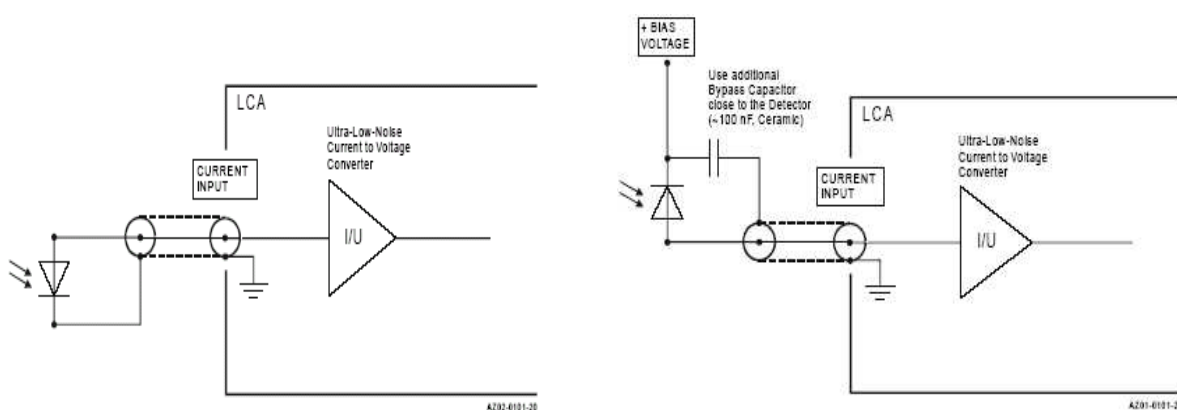
- spektroskopie
- obecný díl optoelektronických měření a podobně

1.5.2 LCA - 30 -1T firmy FEMTO



Obr. 16. Zesilovač LCA-30-1T od firmy FEMTO

Vstup i výstup je připojen BNC kabelem.



Obr. 17. Možná zapojení zesilovače LCA - 30 - 1T

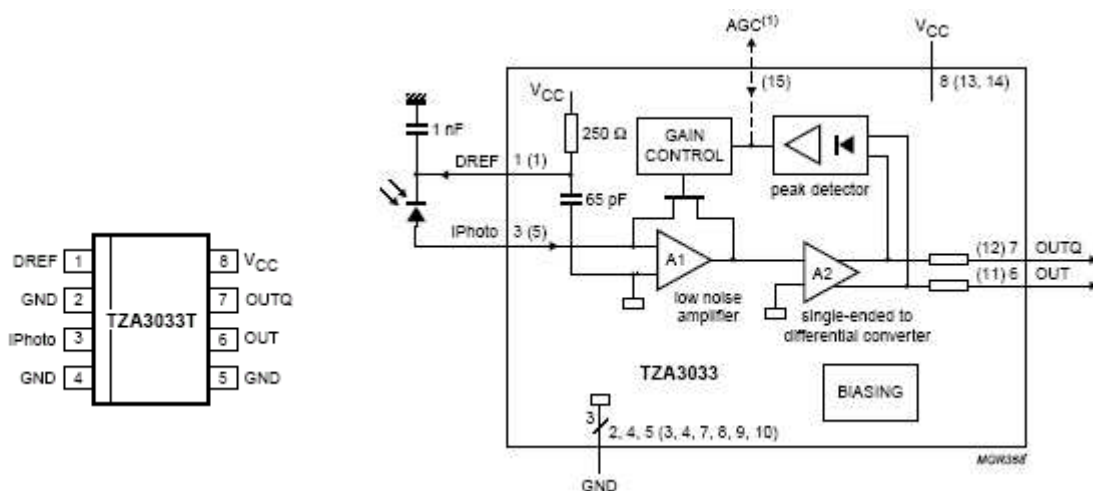
Rysy:

- Šířka pásma a frekvenční odezva nezávislá na detektoru-kapacitní reaktance (až 10 nF)
- Extrémně nízkošumový, $0,5 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Šířka pásma DC ... 30 Hz
- Transimpedance (zisk) $1 \times 10^{12} \text{ V/A}$

Aplikace:

- Spektroskopie
- Ionizační detektory, a další

1.5.3 TZA3033 firmy Philips



Obr. 18. Vnější vzhled a vnitřní struktura TZA3033 firmy Philips

V tomto případě se nejedná o hotový produkt ale o elektronickou součástku. TZA3033 je nízkošumový transimpedanční zesilovač s AGC navržený aby byl použitý ve vláknových optických spojích. AGC – Auto Gain Control je systém, který automaticky hlídá zisk zesilovače.

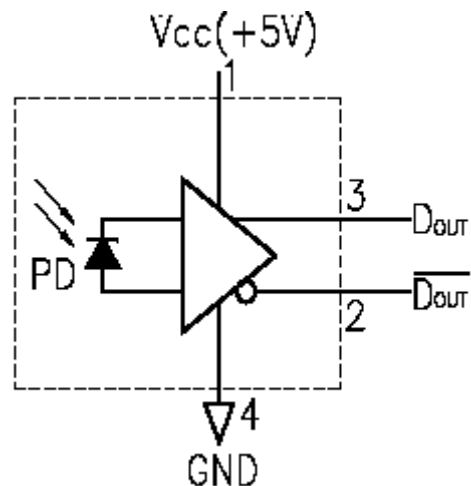
Rysy:

- nízký šum $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typický)
- šířka pásma typická 130 MHz
- difference výstupu
- na čipu automatické řízení zisku (AGC)
- bez potřeby vnější součástky
- jednotlivé napájecí napětí z 3, až 5,5 V

Aplikace:

- digitální vláknová optika - přijímač

1.5.4 T-11-155-G-AGC firmy Optronics International Corp.



Obr. 19. Fotodetektor T-11-155-G-AGC firmy Optronics International Corp. a vnitřní zapojení

Jedná se o elektronickou součástku, která má již integrovanou fotodiodu v pouzdře.

Rysy:

- InGaAs/InP PIN fotodioda s transimpedančním zesilovačem
- Vysoká citlivost s AGC (Auto Gain Control)
- Diference výstupu
- -40 ~85°C provozní teplota

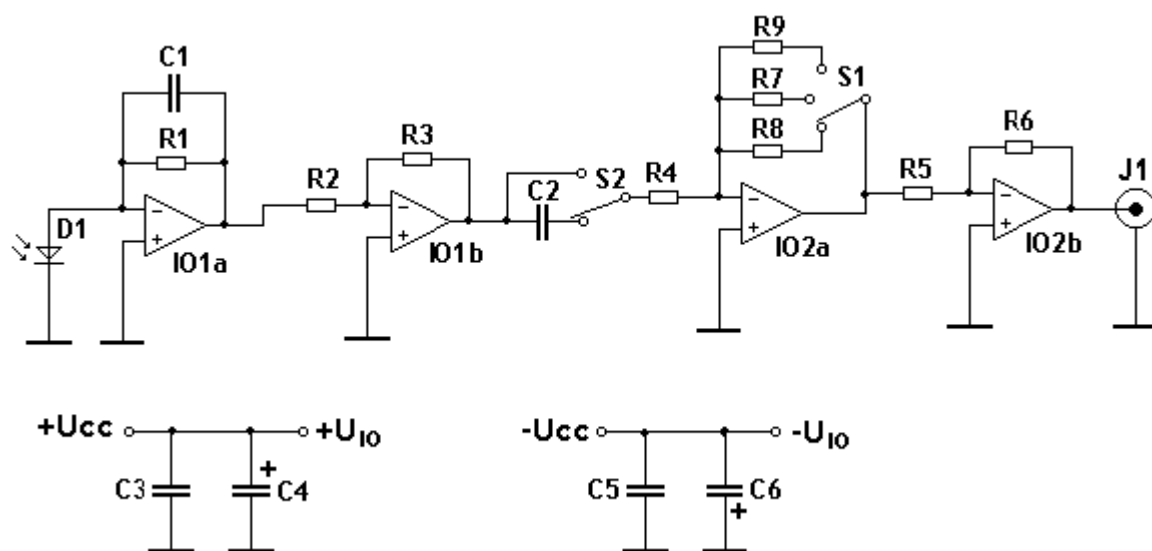
Aplikace:

- Atmosferický 155 Mbps přijímač / kombinace přístroje
- Rychlá místní počítačová síť přijímač / kombinace přístroje

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Návrh zapojení zesilovače

Zesilovač byl navržen pro snímání viditelné i IR oblasti spektra bez nutnosti výměny fotodiody. Fotodioda D1 SFH 2030 je citlivá na záření vlnové délky od 400 do 1100 nm. Níže uvedené zapojení je výsledkem pokusů na bezkontaktním nepájivém poli. Transimpedance je realizována na IO1a a má velikost $R1$ 40 k Ω . Přidáním kondenzátoru C1 zamezíme nežádoucímu vlivu parazitní kapacity fotodiody. Velikost C1 byla odhadnuta na základě vztahu 12 a zkoušením byla zvolena hodnota 8 pF. Dále na IO1b je signál dvakrát zesílen pomocí rezistorů $R2$ a $R3$. Přepínač S2 umožňuje zapojit vazební kondenzátor C2 mezi stupně IO1b a IO2a. Přepínačem S1 je možné nastavit zesílení IO2a na 1, 10 a 100 pomocí rezistorů $R4$ a $R7$, $R8$ a $R9$. Řetězec zakončuje koncový zesilovač IO2b se zesílením 1 pomocí rezistorů $R5$ a $R6$. Výstupní signál je veden stíněným kabelem na BNC konektor J1. Napájecí napětí integrovaných obvodů je standardně filtrováno paralelní dvojicí keramického a elektrolytického kondenzátoru C3, C4, C5 a C6. Schéma zapojení zesilovače je na obrázku 20. IO1 a IO2 jsou obvody NE5532 obsahující dvojici nízkošumových operačních zesilovačů.



Obr. 20. Schéma zapojení zesilovače

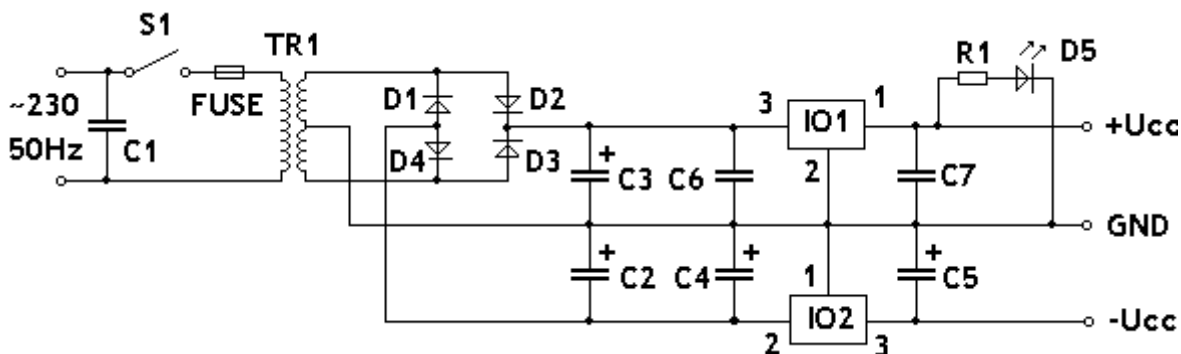
Rozpis součástek:

R1.....40k Ω
 R2,R4-R6,R8.....1k Ω
 R3.....2k Ω
 R7.....10k Ω
 R9.....100k Ω
 C1.....8pF
 C2.....10nF
 C3,C5.....47nF
 C4,C6.....100 μ F/16V
 D1.....SFH2030 (Fotodioda)
 IO1,IO2.....NE5532
 S1,S2.....Otočný přepínač
 J1.....BNC Z 50 (BNC přístrojový konektor)

2.2 Realizace zesilovače

2.2.1 Návrh zapojení zdroje

Napájecí zdroj je napájen standardním síťovým napětím 230V / 50Hz. Napětí je filtrováno síťovým filtračním kondenzátorem. Primární okruh je hlídán proti zkratu pojistkou FUSE na 1A. Transformátor TR1 má dvě sekundární vinutí s vyvedeným středem, protože je potřeba napájet integrované obvody symetrickým napětím. Diody D1 až D4 tvoří standardní diodový usměrňovací můstek. Napětí je filtrováno kondenzátory C2 a C3. Dále jsou zařazeny monolitické stabilizátory IO1 pro kladné a IO2 pro záporné napětí 15V. K nim jsou zařazeny patřičné kondenzátory C4 až C7. Na kladné výstupní napětí je připojena signalizační LED dioda D5 s ochranným rezistorem R1. Schéma zapojení zdroje je na obrázku 21.



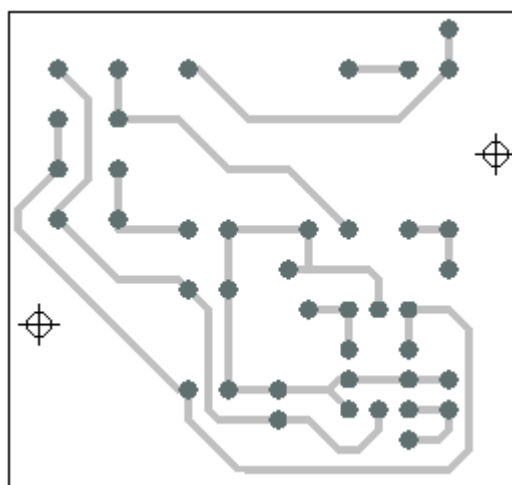
Obr. 21. Schéma zapojení napájecího zdroje

Rozpis součástek:

R1.....1k Ω / 2W
 C1.....220nF/275V~
 C2-C3.....470 μ F/40V
 C4.....2,2 μ F
 C5.....1 μ F
 C6.....330nF
 C7.....100nF
 D1-D4.....1N4007
 D5.....LED zelená
 IO1.....78L15
 IO2.....79L15
 TR1.....WL4415-2 (2X15V, 2,4VA)
 S1.....P-B100G (Síťový vypínač)
 FUSE.....FSF01 (Síťová pojistka umístěná v pouzdře do PS (KS20SW))

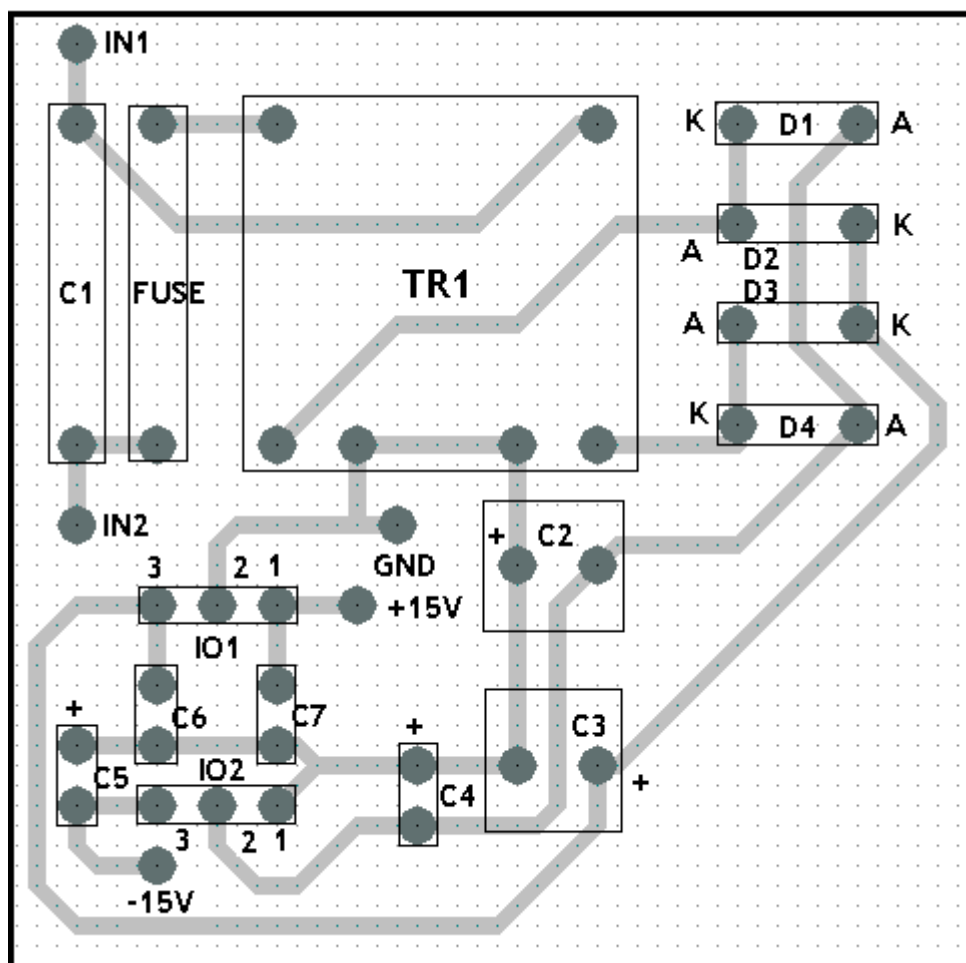
2.2.2 Návrh plošného spoje zdroje

Návrhy plošných spojů byly vytvořeny v programu Formica 4.30 – PCB Design systém (Demonstration Version). Návrh plošného spoje ze strany spojů napájecího zdroje podle schématu na obrázku 21 je v měřítku 1:1 na obrázku 22.



Obr. 22. Návrh plošného spoje napájecího zdroje

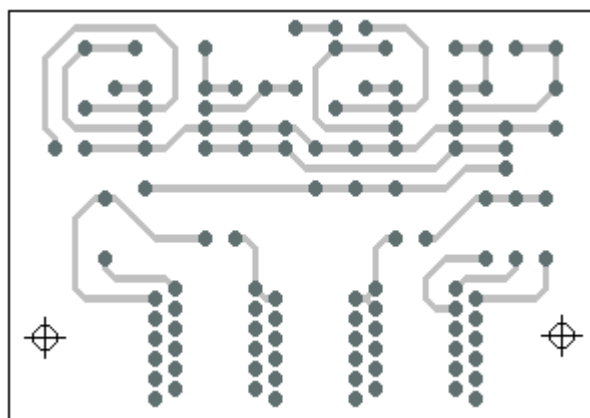
Na obrázku 23 je pohled na plošný spoj napájecího zdroje z pohledu součástek s jejich rozmístěním.



Obr. 23. Osazení plošného spoje napájecího zdroje

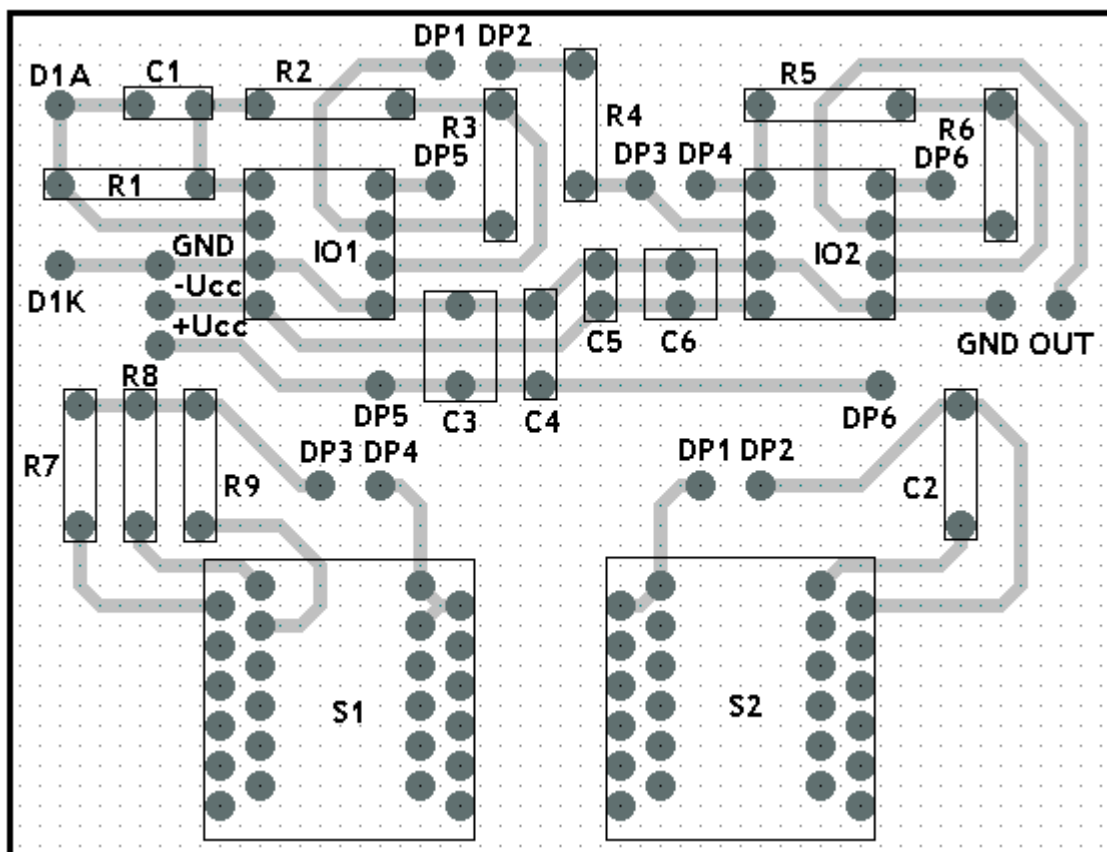
2.2.3 Návrh plošného spoje zesilovače

Návrh plošného spoje ze strany spojů napájecího zdroje podle schématu na obrázku 20 je v měřítku 1:1 na obrázku 24



Obr. 24. Návrh plošného spoje zesilovače

Na obrázku 25 je pohled na plošný spoj zesilovače z pohledu součástek s jejich rozmístěním. Označení DP1 až DP6 znamená drátová propojka.

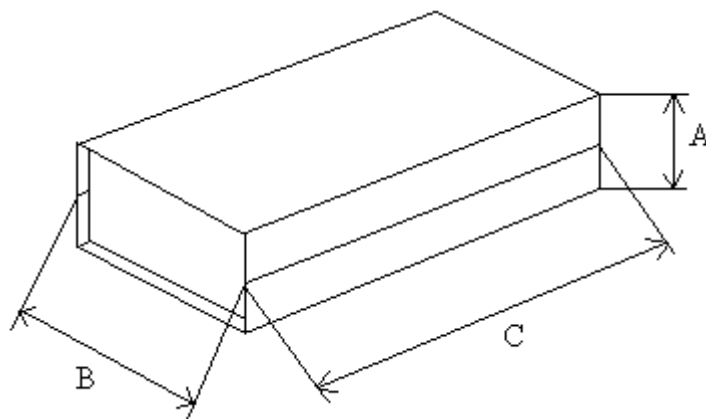


Obr. 25. Osazení plošného spoje zesilovače

2.2.4 Kompletace zesilovače

Desky plošných spojů byly vytvořeny chemickou cestou z jednostranných cuprexitů. Nákres spojů byl proveden speciální lihovou barvou na plošné spoje a deska byla následně vyleptána v lázni na bázi roztoku chloridu železitého.

Celé zařízení je umístěno v krabici KP 34. Popis krabice je na obrázku 26.



Obr. 26. Popis krabičky zesilovače

2 díly, 2 čela, 4 vruty, 4 nožičky, bez větracích otvorů, černá, A x B x C...50 x 93 x148

Původní montážní sloupky byly odstraněny a namísto nich na místech vyznačených na nákresech plošných spojů byly umístěny nové 0,5cm vysoké pro montáž plošného spoje napájecího zdroje a 1,5cm vysoké pro montáž plošného spoje zesilovače. Napájecí kabel prochází zadním čelem krabičky a je pevně našroubován do čokolády, která je přišroubována do spodního dílu krabičky. Čokoláda je jedním kabelem spojena přímo s plošným spojem, druhý kabel je přerušen síťovým vypínačem. Signalizační LED dioda je umístěna vedle síťového vypínače. Montáž plošného spoje napájecího zdroje je na obrázku 27. Osazený plošný spoj zesilovače je na obrázku 28. Plošný spoj zesilovače je před montáží do krabičky umístěn do odstíněného krytu. Kryt je z vodivého kovového materiálu připojeného na zemnicí vodič. Kompletní montáž plošných spojů je na obrázku 29. Fotodioda je z důvodu možnosti výměny vsunuta do patice a vyvedena po co nejkratších drátech z boku přístroje. Z vnější strany přístroje je fotodioda zacloněna černou krytkou ve tvaru trubičky o světlosti 8 mm a délce 10 mm. Celkový pohled na přístroj je na obrázcích 30 a 31.



Obr. 27. Montáž plošného spoje napájecího zdroje.



Obr. 28. Osazený plošný spoj zesilovače



Obr. 29. Kompletní montáž plošných spojů



Obr. 30. Pohled na přední stranu přístroje



Obr. 31. Pohled na zadní stranu přístroje

2.3 Měření na navrženém zesilovači

2.3.1 Měření šířky pásma zesilovače

Šířka pásma je definovaná jako frekvenční oblast ve které velikost výstupního signálu nepoklesne více než o 3 dB od referenční hodnoty. Mezní napětí které odpovídá útlumu o 3 dB od referenčního napětí získáme z odvozeného vztahu (16).

Referenční výstupní napětí je maximální výstupní napětí z uvedených tabulek v příloze P 1 a P 2. Jeho hodnotu pro jednotlivá zesílení udává tabulka II. Dolní mez šířky pásma má smysl uvažovat pouze při zapojeném vazebním kondenzátoru. Naměřené hodnoty uvádí tabulka v příloze P 1.

Jako zdroj optického záření byla použita červená LED dioda v konstantní vzdálenosti od přístroje. Vyhodnocení napětí bylo provedeno odečtením z obrazovky osciloskopu.

Frekvenční charakteristika je grafickým vyjádřením závislosti zisku v dB na frekvenci v logaritmickém měřítku. Vykreslena je na obrázku 32 a 33.

Tabulka II. Hodnoty
referenčního napětí
pro jednotlivá zesílení.

Zesílení [-]	U_{REF} [V]
1	0,03
10	0,3
100	3

$$-3dB = 20 \cdot \log \frac{U}{U_{REF}}$$

$$-\frac{3}{20} = \log \frac{U}{U_{REF}}$$

$$\frac{U}{U_{REF}} = 10^{-\frac{3}{20}}$$

$$\frac{U}{U_{REF}} = 10^{-\frac{3}{20}} = 0,7079$$

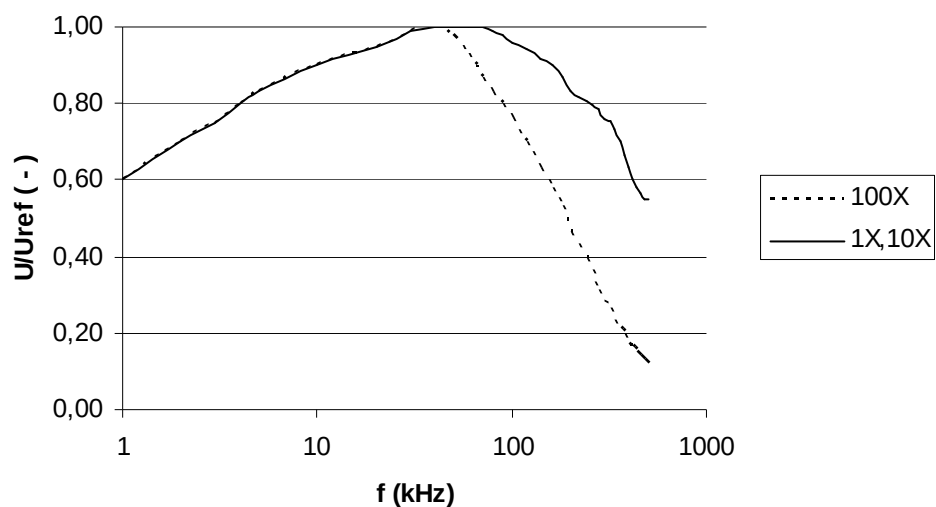
$$U = 0,7079 \cdot U_{REF} \quad (16)$$

Z tabulek v přílohách P1 a P2 lze odečíst horní a dolní mez šířky pásma.

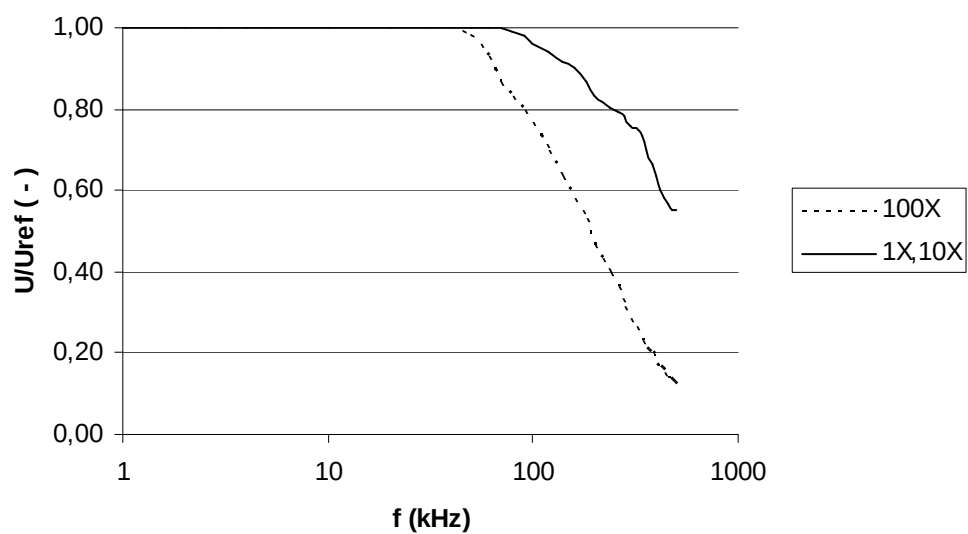
$$f_H = 350 \text{ kHz} \quad \text{pro zesílení 1 a 10.}$$

$$f_H = 110 \text{ kHz} \quad \text{pro zesílení 100.}$$

$$f_D = 3 \text{ kHz}$$



Obr. 32. Frekvenční charakteristika zesilovače s vazebním kondenzátorem



Obr. 33. Frekvenční charakteristika zesilovače bez vazebního kondenzátoru

2.3.2 Měření šumových vlastností zesilovače

Měření je založeno na měření šumového napětí na výstupu zesilovače. Při měření byl zapojen vazební kondenzátor pro odstranění stejnosměrné složky a vypnut zdroj optických impulsů. Na osciloskopu bylo odečítáno šumové napětí. Při přepínání zesílení na zesilovači bylo zjištěno, že se šumové napětí pro jednotlivá zesílení liší. Jejich hodnoty uvádí tabulka III.

Tabulka III. Velikost šumového napětí pro jednotlivá zesílení.

Zesílení [-]	U_{s} [mV]
1	2,5
10	10
100	25

Z velikosti šumu je možné určit dynamický rozsah zesilovače který je definovaný vztahem (17).

$$20 \cdot \log \frac{U_{REF}}{U_{\text{s}}} \quad [dB] \quad (17)$$

Pro maximální napětí na výstupu zesilovače je předpokládáno saturační napětí operačního zesilovače pro všechna nastavená zesílení stejné $U_{REF} = 14V$.

Dynamický rozsah zesilovače se potom pro jednotlivá zesílení liší.

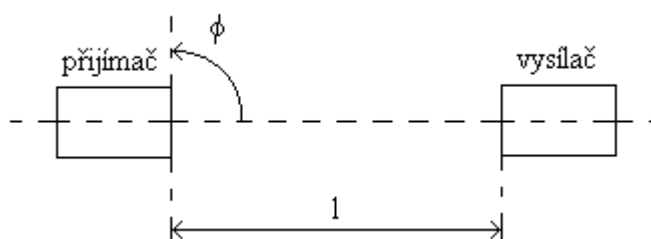
$$20 \cdot \log \frac{U_{REF}}{U_{\text{s}}} = 20 \cdot \log \frac{14}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 75 dB \quad \text{pro zesílení 1.}$$

$$20 \cdot \log \frac{U_{REF}}{U_{\text{s}}} = 20 \cdot \log \frac{14}{10 \cdot 10^{-3}} = 63 dB \quad \text{pro zesílení 10.}$$

$$20 \cdot \log \frac{U_{REF}}{U_{\text{s}}} = 20 \cdot \log \frac{14}{25 \cdot 10^{-3}} = 55 dB \quad \text{pro zesílení 100.}$$

2.3.3 Měření citlivosti v závislosti na úhlu natočení ke zdroji záření

Citlivost fotodiody je obecně závislá na úhlu natočení ke svazku optického záření. V případě měřeného objektu je tato závislost navíc ovlivněna clonou na krabičce zesilovače. Způsob měření naznačuje obrázek 34. Jako zdroj záření byla použita červená LED dioda vzdálená od zesilovače 10 cm. Úhel natočení byl sledován úhloměrem. Naměřené hodnoty udává tabulka IV. Zesílení zesilovače nemá na tuto charakteristiku vliv. Naměřená charakteristika je na obrázku 35.



Obr. 34. Měření citlivosti v závislosti na úhlu natočení ke zdroji záření

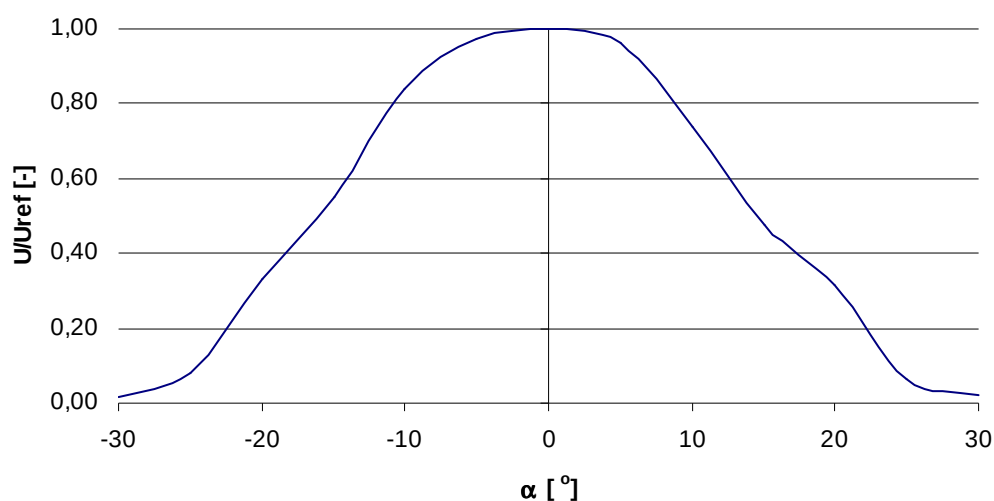
$$\Phi = (\alpha + 90)^\circ$$

l = vzdálenost od zdroje záření 10 cm

Při nulovém úhlu natočení bylo naměřeno referenční napětí $U_{REF} = 3,8V$.

Tabulka IV. Naměřené hodnoty napětí v závislosti na úhlu natočení.

α ($^\circ$)	U (V)	U/U_{REF} (-)
-30	0,06	0,02
-25	0,30	0,08
-20	1,25	0,33
-15	2,10	0,55
-10	3,20	0,84
-5	3,70	0,97
0	3,80	1,00
5	3,65	0,96
10	2,80	0,74
15	1,80	0,47
20	1,20	0,32
25	0,24	0,06
30	0,09	0,02



Obr. 35. Závislost citlivosti zesilovače na úhlu natočení.

2.4 Diskuse výsledků

Měřením byla získána frekvenční charakteristika, šumové vlastnosti a závislost citlivosti na úhlu natočení ke zdroji záření.

Frekvenční charakteristika je závislá na zesílení což odpovídá vlastnostem reálného zesilovače. Naměřené hodnoty $f_H = 350\text{ kHz}$ pro zesílení 1 a 10 a $f_H = 110\text{ kHz}$ pro zesílení 100 zhruba odpovídají typu použitého operačního zesilovače. Zařízení lze použít k přenosu dat, je však zřejmé, že naměřené frekvence nedosahují hodnot používaných v moderních datových spojích popsanych v teoretické části. Tato frekvence není dána fotosoučástkami, proto možné řešení pro dosažení vyšší horní mezní frekvence je použití speciálních obvodů jako např. TZA3033 nebo SA5223. Jedná se o moderní speciální obvody určené pro montáž do optických zařízení. Jsou použitelné do frekvencí 150MHz při zajištění extrémně nízkého šumu. Dolní mez $f_D = 3\text{ kHz}$ lze nastavit hodnotou vazebního kondenzátoru.

Cílem návrhu je mimo jiné dosáhnout minimálního šumu. Zlepšení jednoho parametru zpravidla vede ke zhoršení jiného. Mimo použití jiného obvodu je možným řešením vedoucím ke snížení šumu omezení šířky pásma, což vychází z definičních vztahů šumů. Pokud by zařízení bylo používáno pro přenos dat pracující na jisté frekvenci, je možné tuto frekvenci vyselektovat oboustrannými filtry.

Šum vzniká na každém rezistoru a dle definičního vztahu roste s jeho ohmickou hodnotou. Proto možné omezení šumu by mohlo nabízet i řazení více zesilovacích stupňů za sebe namísto jednoho s velkým zesílením. Přístroj by i nadále umožňoval přepínání rozsahu například pro měřicí účely.

Měření šumových vlastností mohlo být ovlivněno spojením mezi osciloskopem a přístrojem.

Charakteristika určující závislost citlivosti na úhlu natočení ke zdroji je standardní a je zřejmé, že je snahou mít tento úhel co nejmenší. S úhlem natočení asi 30° již zařízení téměř nereaguje.

Dosah přístroje stanoven nebyl. K takovému měření je zapotřebí znát zářivý výkon zdroje záření. Tato charakteristika by navíc byla závislá na vlnové délce, protože s tou se mění citlivost fotodiody.

Z výše uvedeného vyplývá, že zařízení lze použít pro přenos dat, ale díky funkčním přepínačům nabízí univerzální užití.

Zajímavé použití otevřeného optického spoje s relativně menšími nároky na dosah a technickou vyspělost by byla realizace komunikační sítě v uzavřené místnosti.

ZÁVĚR

V teoretické části je probrána konstrukce a parametry současných otevřených optických spojů. Klíčovou částí tohoto propojení je transimpedanční zesilovač, jehož parametry v podstatě udávají parametry celého přenosového systému. Pokud vezmeme v úvahu, že zdroj světla a samotný senzor světla kterým je fotodioda mají zpravidla vyšší horní mez pásma použitelnosti tak na šířce pásma zesilovače závisí rychlost přenosu celého systému. Velice důležitým parametrem jsou také šumové vlastnosti zesilovače, protože musí být zajištěn dostatečný odstup signálu od šumu. Na tomto parametru proto závisí dosah zesilovače, protože se vzdáleností zdroje optického záření od přijímače klesá intenzita přijatého záření. Tento nedostatek lze částečně odstranit zvýšením intenzity záření zdroje, zvýšíme tím ovšem energetickou náročnost spoje.

Cílem práce bylo navrhnout transimpedanční zesilovač, který byl zrealizovaný a proběhla na něm měření základních parametrů. Realizované zařízení je navrženo tak aby bylo možno z důvodu použití vyměnit fotodiodu, která je zasunuta v patici. Dále jsou na přístroji dva přepínače, z nichž jedním lze přepínat zesílení zesilovače mezi 1, 10 a 100. Druhým přepínačem lze do obvodu zapojit vazební kondenzátor, pro odfiltrování stejnosměrné složky.

Návrh i realizace probíhaly s ohledem převážně na šumové vlastnosti. Byly zvoleny nízkošumové operační zesilovače, fotodioda je vyvedena po co nejkratších vodičích a výstupní signál je na BNC konektor veden stíněným kabelem. Deska plošného spoje zesilovače, na které se signál zpracovává je od okolí oddělena uzemněnou přepážkou. Také proto že celé zařízení obsahuje i napájecí zdroj, což by mohl být i zdroj rušení. Na samotné desce plošného spoje zesilovače jsou umístěny filtrační kondenzátory napájecího napětí operačních zesilovačů.

Na zesilovači proběhla tři nezávislá měření. Jako zdroj optického záření byla použita ve všech případech červená LED dioda. Vyhodnocování probíhalo na osciloskopu. První měření udává šířku pásma zesilovače. Šířka pásma se liší v závislosti na zvoleném zesílení a na tom, zda je v obvodu vazební kondenzátor. Pro zesílení 1 a 10 se horní mez šířky pásma neliší a dosahuje asi 350 kHz. Pro zesílení 100 je tato frekvence nižší, asi 110 kHz, což vyplývá z vlastností operačního zesilovače. Vazební kondenzátor nejen odstraňuje stejnosměrnou složku, ale zároveň udává dolní mez šířky pásma asi 3 kHz,

kterou v případě vyloučení tohoto kondenzátoru neuvažujeme. Druhé měření se týká šumových vlastností zesilovače. I toto měření je závislé na nastaveném zesílení zesilovače. Pro zesílení 1 dosahuje šum maximální hodnoty špička-špička 2,5 mV. Se zvětšováním zesílení se zvětšuje i šumové napětí, což je způsobeno zesilováním samotného šumu, tak i zvyšování tzv. bílého šumu na rezistorech s vyšší ohmickou hodnotou samotného zesilovacího stupně. Další šum může vznikat ve vedení spojující zesilovač a osciloskop. Pro zesílení 10 tedy má šumové napětí hodnotu 10 mV a pro zesílení 100 potom 25 mV. Pro vyjádření dynamického rozsahu je uvažováno, že maximální napětí na výstupu zesilovače je saturační napětí 14 V pro všechna zesílení. Potom dynamický rozsah je pro jednotlivá zesílení různý, a to pro zesílení 1 je 75 dB, pro zesílení 10 je 63 dB a pro zesílení 100 potom 55 dB. Poslední měření mělo za cíl určit charakteristiku závislosti citlivosti zesilovače na úhlu natočení ke zdroji záření. Tato závislost není v tomto případě daná pouze závislostí udávanou výrobcem fotodiody, ale je ovlivněna také ochranou clonou na fotodiodě. Toto měření není závislé na zesílení.

Zlepšení parametrů přístroje nabízí výměna některých součástí za speciální a případné úpravy zapojení.

Možnosti použití zhotoveného zesilovače jsou díky univerzálnosti různé. Možnost výměny fotodiody umožňuje zaměřit se na libovolný rozsah vlnové délky záření. Zároveň možnost vyřazení vazebního kondenzátoru umožňuje zesilovač použít jak pro přenos dat při vyloučení stejnosměrné složky, tak pro měření stejnosměrných složek. Např. jako optický senzor pohybu a podobně. Zajímavé se jeví využití otevřeného optického spoje jako komunikační sítě v uzavřené místnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- (1) NAVRÁTIL, Z , VOJTÁŠEK, J. *Mikroelektronika*. 1.vyd. VUT Brno 1989. ISBN 80-214-1067-1.
- (2) URBAN, F. *Optoelektronika*. 2.vyd. VUT Brno 1989. ISBN 80-214-0034-X
- (3) KOCOUREK, P. *Přenos Informace*. 1.vyd. ČVUT Praha 1994. ISBN 80-01-01169-0
- (4) NEUMANN, P , UHLÍŘ, J. *Elektronické obvody a funkční bloky*. 1.vyd. ČVUT Praha 2001. ISBN 80-01-02394-X
- (5) UHLÍŘ, J , SOVKA, P. *Číslicové zpracování signálů*. 2.vyd. ČVUT Praha 2002. ISBN 80-01-02613-2
- (6) KAINKA, B. *Využití rozhraní PC*. HEL Ostrava 1998. ISBN 80-902059-3-3
- (7) Součástky pro elektrotechniku. Praha: GM electronic, 2003. 540 s.
- (8) Kulhavý, K. *Bezvláknová optika III prostředí* [online]. C2002, [cit. 2004-11-10]. Dostupné z: <<http://www.root.cz/clanek/1412>> .
- (9) *Projekt WOptíc* [online]. [cit. 2004-11-14]. Dostupné z: <<http://woptic.czfree.net/project/electronics/receiver.htm>> .
- (10) *What's All This Transimpedance Amplifier Stuff, Anyhow* [online]. [cit. 2004-12-07]. Dostupné z: <<http://www.elecdesign.com/Articles/ArticleID/4346/4346.html>> .
- (11) *Transimpedance Amplifier Simplifies Receiver Module Design* [online]. [cit. 2004-12-07]. Dostupné z: <<http://www.elecdesign.com/Articles/ArticleID/1939/1939.html>>
- (12) FEMTO Messtechnik. Produkty společnosti. [online]. [cit. 2005-2-09]. Dostupné z: <<http://www.femto.de>>
- (13) PHILIPS. Produkty společnosti. [online]. [cit. 2005-2-09]. Dostupné z: <<http://www.semiconductors.philips.com>>
- (14) Optronics International Corp. Produkty společnosti. [online]. [cit. 2005-2-09]. Dostupné z: <<http://www.oic.com.tw>>
- (15) Číž, R , Kotulán, R. *Parametry infračerveného přenosu*. [online]. C2003, [cit. 2005-2-11]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02070/>> .
- (16) Prokeš, A. *Koncepce současných optických směrových spojů*. [online]. C2003, [cit. 2005-2-11]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/00040/index.htm>> .

- (17) Šára, Z , Řehák, J. *Normy pro IR datový přenos*. [online]. C1997-2002, [cit. 2005-2-11]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/docs/ir_prenos/ir_protokoly.html>
- (18) Fotocitlivé prvky, principy, funkce, vlastnosti, použití [online]. [cit. 2005-2-11]. Dostupné z: <<http://www.sweb.cz/jjohnyk/elektronika/06.htm>>
- (19) Vaculín, T. *Optický bezkabelový spoj v atmosférickém přenosovém prostředí* [online]. C2003, [cit.2005-2-12]. Dostupné z :<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03014/>>.
- (20) Šára, Z , Řehák, J. *Teorie IR datového přenosu a jeho dosah*. [online]. C1997-2002, [cit.2005-2-18]. Dostupné z : < http://www.hw.cz/docs/ir_prenos/ir_prenos.html>.
- (21) *Optoelektronika*. [online]. C2001, [cit. 2005-2-18]. Dostupné z : < <http://www.sous.cz/struna/en4/optika.htm>>.
- (22) *Diody*. [online]. [cit. 2005-3-12]. Dostupné z : < <http://www.volny.cz/diody/html/data.html>>.
- (23) *Diody*. [online]. [cit. 2005-3-12]. Dostupné z : < <http://www2.webpark.cz/diodys/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A.....	Amper – jednotka elektrického proudu
Au	zesílení zesilovače
AGC	Auto Gain Control
APD	Avalanche PhotoDiode - fotodioda
BNC	konektor
C	elektrická kapacita
C _D	kapacita fotodiody
C _F	zpětnovazební kapacita
C _{IN}	vstupní kapacita
Ez.....	zářivý výkon
F	Farad – jednotka kapacity
f	frekvence
f _D	dolní mez šířky pásma
f _H	horní mez šířky pásma
GBW	Gain – BandWith – součin zisku a šířky pásma, jakost zesilovače
Hz	Hertz – jednotka frekvence
h	Planckova konstanta
I	elektrický proud
I _{in}	vstupní proud
I _z	intenzita záření
IR	InfraRed – infračervené záření
LED	Light Emitting Diod - elektroluminiscenční dioda
OTI	Operational TransImpedance amplifier – transimpedanční zesilovač
OZ	Operační Zesilovač
PIN	Positive Intrinsic Negative - fotodioda
R _{IN}	vstupní odpor
R _F	zpětnovazební odpor
RTG.....	Röntgenovo záření
SNR	Signal to Noise Ratio – poměr signálu k šumu
TIA	TransImpedance Amplifier – transimpedanční zesilovač
U	elektrické napětí
U _{out}	výstupní napětí
U _{REF}	referenční napětí
U _š	šumové napětí
UV	UltraViolet – ultrafialové záření
V	Volt – jednotka elektrického napětí
VIS	viditelné záření
v	rychlost vlnění
α	úhel natočení detektoru ke zdroji záření
ε	permeabilita prostředí
λ	vlnová délka
μ	permitivita prostředí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Rozdělení elektromagnetického spektra.....	7
Obr. 2. Ozařování hlavičky světelným svazkem, U je úhlová šířka svazku.....	8
Obr. 3. Skladba hlavic otevřeného optického spoje.....	9
Obr. 4. Metody klíčování IR přenosu.....	10
Obr. 5. Závislost propustnosti atmosféry na vlnové délce procházejícího záření.....	12
Obr. 6. Fotoemise.....	13
Obr. 7. Schematická značka a fyzický vzhled LED diody.....	13
Obr. 8. VA-charakteristiky LED diod.....	13
Obr. 9. VA-charakteristika fotodiody.....	16
Obr. 10. Struktura PIN fotodiody.....	16
Obr. 11. Schematické a blokové znázornění OZ.....	17
Obr. 12. Amplitudová a fázová frekvenční.....	18
Obr. 13. Principiální zapojení TIA.....	19
Obr. 14. Upravené zapojení TIA.....	20
Obr. 15. Fotodetektor LCA-S-400K-SI od firmy FEMTO.....	21
Obr. 16. Zesilovač LCA-30-1T od firmy FEMTO.....	22
Obr. 17. Možná zapojení zesilovače LCA - 30 - 1T.....	22
Obr. 18. Vnější vzhled a vnitřní struktura TZA3033 firmy Philips.....	23
Obr. 19. Fotodetektor T-11-155-G-AGC firmy Optronics International Corp.	24
Obr. 20. Schéma zapojení zesilovače.....	25
Obr. 21. Schéma zapojení napájecího zdroje.....	26
Obr. 22. Návrh plošného spoje napájecího zdroje.....	27
Obr. 23. Osazení plošného spoje napájecího zdroje.....	28
Obr. 24. Návrh plošného spoje zesilovače.....	28
Obr. 25. Osazení plošného spoje zesilovače.....	29
Obr. 26. Popis krabičky zesilovače.....	30
Obr. 27. Montáž plošného spoje napájecího zdroje.....	31
Obr. 28. Osazený plošný spoj zesilovače.....	31
Obr. 29. Kompletní montáž plošných spojů.....	32
Obr. 30. Pohled na přední stranu přístroje.....	32
Obr. 31. Pohled na zadní stranu přístroje.....	33
Obr. 32. Frekvenční charakteristika zesilovače s vazebním kondenzátorem.....	35
Obr. 33. Frekvenční charakteristika zesilovače bez vazebního kondenzátoru.....	35
Obr. 34. Měření citlivosti v závislosti na úhlu natočení.....	37
Obr. 35. Závislost citlivosti zesilovače na úhlu natočení.....	38

SEZNAM TABULEK

Tab. I	Ideální a reálný OZ.....	18
Tab. II	Hodnoty referenčního napětí pro jednotlivá zesílení	34
Tab. III.	Velikost šumového napětí pro jednotlivá zesílení.....	36
Tab. IV.	Naměřené hodnoty napětí v závislosti na úhlu natočení.....	37

SEZNAM PŘÍLOH

- P 1 : Tabulka měření šířky pásma zesilovače při použití vazebního kondenzátoru
- P 2 : Tabulka měření šířky pásma zesilovače bez vazebního kondenzátoru
- P 3 : CD-ROM

P 1 Tabulka měření šířky pásma zesilovače při použití vazebního kondenzátoru

Zesílení	100	10	1	100	10	1
f [kHz]	U [V]	U [V]	U [V]	U/Uref [-]	U/Uref [-]	U/Uref [-]
1	1,80	0,180	0,0180	0,60	0,60	0,60
2	2,10	0,210	0,0210	0,70	0,70	0,70
3	2,25	0,225	0,0225	0,75	0,75	0,75
4	2,40	0,240	0,0240	0,80	0,80	0,80
5	2,50	0,250	0,0250	0,83	0,83	0,83
10	2,70	0,270	0,0270	0,90	0,90	0,90
20	2,85	0,285	0,0285	0,95	0,95	0,95
30	2,97	0,297	0,0297	0,99	0,99	0,99
40	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
50	2,94	0,300	0,0300	0,98	1,00	1,00
60	2,80	0,300	0,0300	0,93	1,00	1,00
70	2,60	0,300	0,0300	0,87	1,00	1,00
80	2,50	0,297	0,0297	0,83	0,99	0,99
90	2,40	0,294	0,0294	0,80	0,98	0,98
100	2,30	0,288	0,0288	0,77	0,96	0,96
120	2,10	0,282	0,0282	0,70	0,94	0,94
140	1,90	0,275	0,0275	0,63	0,92	0,92
160	1,75	0,270	0,0270	0,58	0,90	0,90
180	1,60	0,260	0,0260	0,53	0,87	0,87
200	1,40	0,250	0,0250	0,47	0,83	0,83
220	1,30	0,245	0,0245	0,43	0,82	0,82
240	1,20	0,241	0,0241	0,40	0,80	0,80
260	1,10	0,239	0,0239	0,37	0,80	0,80
280	0,95	0,235	0,0235	0,32	0,78	0,78
300	0,85	0,228	0,0228	0,28	0,76	0,76
320	0,80	0,226	0,0226	0,27	0,75	0,75
340	0,70	0,220	0,0220	0,23	0,73	0,73
360	0,64	0,210	0,0210	0,21	0,70	0,70
380	0,60	0,200	0,0200	0,20	0,67	0,67
400	0,52	0,190	0,0190	0,17	0,63	0,63
420	0,50	0,180	0,0180	0,17	0,60	0,60
440	0,46	0,175	0,0175	0,15	0,58	0,58
460	0,42	0,170	0,0170	0,14	0,57	0,57
480	0,40	0,165	0,0165	0,13	0,55	0,55
500	0,36	0,165	0,0165	0,12	0,55	0,55

P 2 Tabulka měření šířky pásma zesilovače bez vazebního kondenzátoru

Zesílení	100	10	1	100	10	1
f [kHz]	U [V]	U [V]	U [V]	U/Uref [-]	U/Uref [-]	U/Uref [-]
1	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
2	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
3	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
4	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
5	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
10	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
20	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
30	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
40	3,00	0,300	0,0300	1,00	1,00	1,00
50	2,94	0,300	0,0300	0,98	1,00	1,00
60	2,80	0,300	0,0300	0,93	1,00	1,00
70	2,60	0,300	0,0300	0,87	1,00	1,00
80	2,50	0,297	0,0297	0,83	0,99	0,99
90	2,40	0,294	0,0294	0,80	0,98	0,98
100	2,30	0,288	0,0288	0,77	0,96	0,96
120	2,10	0,282	0,0282	0,70	0,94	0,94
140	1,90	0,275	0,0275	0,63	0,92	0,92
160	1,75	0,270	0,0270	0,58	0,90	0,90
180	1,60	0,260	0,0260	0,53	0,87	0,87
200	1,40	0,250	0,0250	0,47	0,83	0,83
220	1,30	0,245	0,0245	0,43	0,82	0,82
240	1,20	0,241	0,0241	0,40	0,80	0,80
260	1,10	0,239	0,0239	0,37	0,80	0,80
280	0,95	0,235	0,0235	0,32	0,78	0,78
300	0,85	0,228	0,0228	0,28	0,76	0,76
320	0,80	0,226	0,0226	0,27	0,75	0,75
340	0,70	0,220	0,0220	0,23	0,73	0,73
360	0,64	0,210	0,0210	0,21	0,70	0,70
380	0,60	0,200	0,0200	0,20	0,67	0,67
400	0,52	0,190	0,0190	0,17	0,63	0,63
420	0,50	0,180	0,0180	0,17	0,60	0,60
440	0,46	0,175	0,0175	0,15	0,58	0,58
460	0,42	0,170	0,0170	0,14	0,57	0,57
480	0,40	0,165	0,0165	0,13	0,55	0,55
500	0,36	0,165	0,0165	0,12	0,55	0,55