VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

VÍCEKANÁLOVÁ MĚŘÍCÍ SOUSTAVA PRO MĚŘENÍ RELATIVNÍ INTENZITY SVĚTLA

THE MULTI-CHANNEL MEASURING SYSTEM FOR MEASUREMENT OF THE RELATIVE INTENSIVE OF LIGHT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Štěpán Damajka

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Štěpán Damajka ***ID:*** 158114
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Vícekanálová měřicí soustava pro měření relativní intenzity světla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace převodníku intenzity světla na napětí, volba vhodné měřicí metody a komponent s ohledem na vzorkovací frekvenci měření a linearitu.

1. Proveďte literární rešerši v oblasti měření intenzity světla a metodiky převodu intenzity světla na napětí.
2. Navrhněte převodník s možností nastavení úrovně výstupního napětí v co největším rozsahu při zachování linearity a stability systému.
3. Navrhněte způsob detekce PWM modulace a její indikace uživateli.
4. Navrhněte obvod, který umožní ověřovací měření linearity převodníku (při zanedbání vlivu degradace LED).
5. Realizujte navržený převodník. Zvažte možnost použití měřicích přístrojů Keithley 2700 s měřicími kartami s ohledem na počet kanálů, rychlost měření a kompatibilitu s SW EMC 32 od firmy Rohde and Schwarz.
6. Sestavte měřicí přípravek a proveďte ověřovací měření.
7. Diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Doleček J. - Moderní učebnice elektroniky - 5. díl. BEN technická literatura. 2007 ISBN 978-80-7300-187-2

Termín zadání: 6. 2. 2017 ***Termín odevzdání:*** 29.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
Konzultant: Ing. Jiří Zlámal

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Ústav automatizace a měřicí techniky

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace vícekanálové měřící soustavy pro měření intenzity světla. V první kapitole jsou uvedeny základní světelné veličiny a jejich snímače. V následující kapitole je samotný návrh měřící soustavy. Ta byla navrhnuta na základě vstupních požadavků. Mezi hlavní požadavky patří možnost nastavit co největší rozsah výstupního napětí, linearita systému, měření stejnosměrného i střídavého signálu a detekování přebuzení signálu. Výsledkem práce je funkční měřící soustava schopná měřit 8 kanálů zároveň.

Klíčová slova

Měřící soustava, fotodioda, převodník, PWM signál.

Abstract

The aim of the bachelor´s thesis is design and realization of multi-channel measuring system for relative light intensity measurement. The first part of the thesis is devoted to introduction into basic light and its sensor. The next point is to design of measuring system. This system was proposed in respect of input requirements include the ability to set as high as possible level of output voltage, system linearity, DC and AC measurement and signal overload detection. The result of the thesis is fully functional measuring system, which is able to measure 8 channels simultaneously.

Keywords

Measuring system, photodiode, converter, PWM signal.

Bibliografická citace:

DAMAJKA, Š. *Vícekanálová měřící soustava pro měření relativní intenzity světla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 42s. Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Vícekanálová měřící soustava pro měření relativní intenzity světla jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **29. května 2017**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **29. května 2017**

……
podpis autora

Obsah

1 Úvod 1
2 Měření intenzity světla 2
2.1 Základní veličiny 2
2.2 Typy snímačů 4
3 Návrh převodníku 7
3.1 Snímací prvek 7
3.2 I/U převodník 9
3.3 Demodulátor 10
3.4 A/D převodník + zobrazovač 12
3.5 Detekce přebuzení, signalizace 14
3.6 Napájení 16
3.7 Ověření linearity převodníku 17
3.8 Detekce PWM 19
4 Realizace převodníku 20
4.1 Ověřovací měření 25
5 Závěr 27

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Vlnové spektrum [11] 2
Obr. 2-2 Intenzita světla[2] 3
Obr. 2-3 a) Závislost odporu na osvětlení b) reálný fotorezistor [5] 5
Obr. 2-4 a) VA charakteristika b) struktura fototranzistoru 5
Obr. 2-5 a) VA charakteristika b) struktura fotodiody [5] 6
Obr. 3-1 Blokové schéma 7
Obr. 3-2 SFH250V [6] 8
Obr. 3-3 a) Spektrální citlivost b) Závislost proudu na intenzitě osvětlení 8
Obr. 3-4 Převodník 9
Obr. 3-5 Demodulátor 10
Obr. 3-6 Amplitudová a fázová charakteristika 11
Obr. 3-7 Časová analýza 12
Obr. 3-8 NI USB-6000 13
Obr. 3-9 LED Display [9] 13
Obr. 3-10 Přebuzený PWM signál 14
Obr. 3-11 Signalizace přebuzení 15
Obr. 3-12 Vstupní obvod 17
Obr. 3-13 Obvod k ověření linearity 18
Obr. 3-14 SFH756V 18
Obr. 3-15 Detekce PWM 19
Obr. 3-16 Časový diagram detekce PWM 19
Obr. 4-1 Kompletní schéma jednoho kanálu 20
Obr. 4-2 Layout – vrstva BOTTOM 22
Obr. 4-3 Layout – vrstva TOP 23
Obr. 4-4 Zadní panel 24
Obr. 4-5 Přední panel 24
Obr. 4-6 VirtualBench 25
Obr. 4-7 Graf – linearita 26

Seznam tabulek

Tabulka 1 Doporučené hodnoty intenzit osvětlení [2] 4
Tabulka 2 Parametry fotodiody [6] 8
Tabulka 3 Seznam součástek pro jeden kanál 21
Tabulka 4 Ověřovací měření 26

1 ÚVOD

Projekt byl realizován ve firmě HELLA AUTOTECHNIK NOVA s.r.o. nacházející se v Mohelnici. Tato společnost se zaměřuje na vývoj a výrobu světelné techniky do automobilového průmyslu. Hlavními produkty jsou přední a zadní světlomety aut. K vývoji světel neodmyslitelně patří i jejich měření. S rostoucí technologií automobilových světlometů se zvyšují testovací požadavky. Proto firma disponuje měřícím oddělením, které se specializuje na chemické, mechanické, teplotní, a především, elektrické zkoušky.

Skrz rozvoj elektroniky se více dbá na působení rušivých vlivů v elektrotechnice. Tedy o elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). Elektromagnetická kompatibilita se dělí na měření emisí a měření imunity. Jde o to, aby výsledný produkt neovlivňoval svým vyzařováním okolní systémy a zároveň, aby byl dostatečně odolný vůči jejich rušení. Tato měření se nejčastěji realizují v EMC komoře, tedy v komoře, která je dokonale odrušená od okolního záření.

Při měření imunity je důležité sledovat výstupní veličinu, tedy světlo ze světlometu, jestli není ovlivňované definovaným rušením. Během měření není možné měřící systém umístit přímo do komory, proto je nutné, aby světlo, které je předmětem měření bylo vyvedeno a dále zpracováváno mimo komoru. To se děje pomocí optických vláken, kterých vzhledem ke složitosti dnešních světlometů, může být i víc než deset.

Měřící soustava bude sloužit k usnadnění práce testovacího inženýra. Místo několika různých přípravků bude stačit pouze jeden. Velkou výhodou přístroje bude jeho univerzálnost a jednoduché ovládání.

V druhé kapitole jsou popsány základní veličiny popisující světlo a základní světelné snímače. V následující je kompletní návrh jednoho kanálu převodníku, ve finále je vše 8x nakopírováno.

2 MĚŘENÍ INTENZITY SVĚTLA

Obor, který se zabývá měřením světelné energie v oblasti viditelného záření, se nazývá fotometrie. Metody měření světelných veličin se dělí na subjektivní a objektivní. Subjektivní či vizuální metody využívají vlastností lidského zraku. Objektivní nebo také fyzikální metody využívají k vyhodnocení měření fotoelektrické snímače.

Měření lze dále dělit na měření osvětlení, měření jasu, měření svítivosti a laboratorní měření. [2]

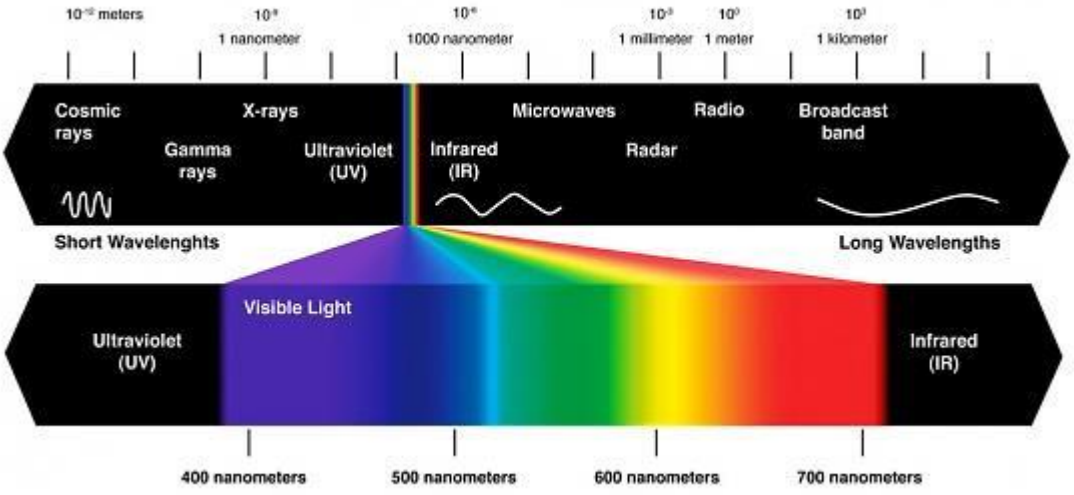
2.1 Základní veličiny

Světlo patří mezi elektromagnetické záření vnímatelné lidským okem. Toto záření lze charakterizovat vlnovou délkou λ nebo frekvencí f. Vlnová délka se vypočítá pomocí jednoduchého vztahu:

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{c}{f}\ [m]} \tag{1}$$

Kde c je rychlost světla ve vakuu, přibližně 3.10^8 m.s^{-1} a f je frekvence světla s jednotkou Hz.

Lidské oko dokáže pracovat a rozeznat barvy ve světelném intervalu o vlnové délce přibližně od 400 po 700 nm, tak jak je zobrazeno na Obr. 2-1. Před tímto intervalem se jedná o krátké vlny, mezi které patří např. ultrafialové a kosmické záření. Za intervalem se jedná o infračervené a rádiové vlny.



Obr. 2-1 Vlnové spektrum [11]

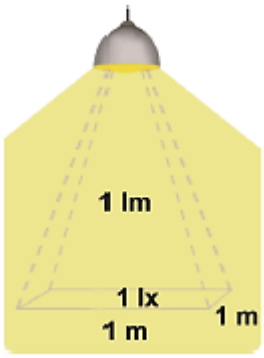
Světelný tok ϕ vyjadřuje, kolik množství světelné energie vyzáří zdroj do svého okolí za 1 sekundu. Jedná se tedy o velikost výkonu, kterou zářivý tok přenáší, vysílá nebo přijímá. Jeho jednotkou je lumen (lm). [2]

Svítivost I lze definovat jako množství světelného toku vyzářeného v určitém úhlu do určitého směru. Jinými slovy veličina udává hustotu světla, kterou vyzařuje zdroj světla. Jednotkou svítivosti je kandela (cd). Střední hodnota se určí ze vztahu:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \ [cd] \tag{2}$$

Kde ϕ se rovná světelnému toku a Ω je prostorový úhel, kam je zářivý tok vyzařován. [2]

Intenzita světla E neboli osvětlenost. Tato veličina udává poměr světelného toku k osvětlené ploše.



Obr. 2-2 Intenzita světla[2]

Jednotkou intenzity světla je lux (lx), 1 lx je osvětlení způsobené světelným tokem 1 lm na plochu 1 m^2 a platí vztah:

$$E = \frac{\phi}{A} \ [lx] \tag{3}$$

Intenzita světla se často používá k doporučení hodnot pro různá pracoviště a úkony na nich. Kvalitní osvětlení má zabezpečit dostatečné množství světelné energie a také vhodné časové rozložení. Čím obtížnější pracovní úkon, tím by měla být osvětlenost větší, tak jak se udává v následující tabulce. [2]

Tabulka 1 Doporučené hodnoty intenzit osvětlení [2]

Osvětlenost (lx)	Prostor, místo, druh činnosti
20 – 30 - 50	základní zraková orientace v prostředí (schodiště)
50 – 75 – 100	jednoduchá orientace, kratší doba, jednoduché činnosti (toalety)
100 – 150 – 200	prostory, které nejsou dlouhodobě užívány pro pracovní účely (šatny)
200 – 300 – 500	Zraková místa pro běžné pracovní úkoly (kanceláře, školy)
500 – 750 - 1000	Zraková místa pro náročnější déle trvající pracovní úkony
1000 – 1500 – 2000	Zvláště náročné zrakové úkoly (laboratoře)
2000 a více	Velmi náročné zrakové úkoly (operační stoly)

Fotoelektrický jev zkráceně fotoefekt nastává, když se energie elektromagnetického záření předává elektronu z absorbujícího materiálu. Fotoefekt se dělí na vnější a vnitřní.

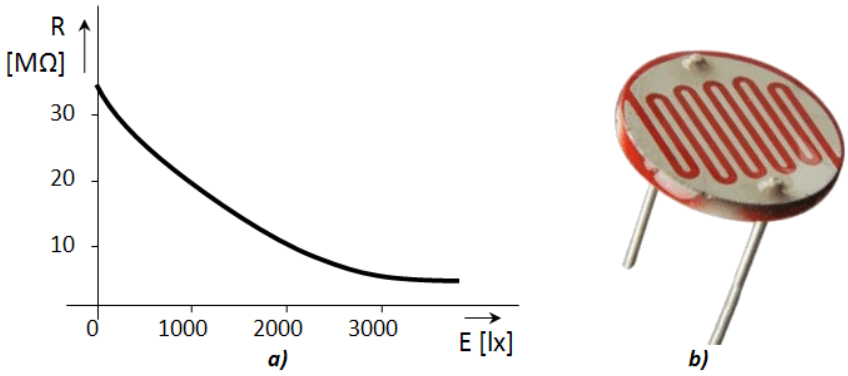
Během vnějšího fotoelektrického jevu se elektrony uvolňují z povrchu látky do okolí. U vnitřního fotoefektu děj probíhá uvnitř materiálu. Díky energii ze záření se dostanou elektrony z valenčního do vodivostního pásu, čímž dojde ke zvýšení vodivosti materiálu.

2.2 Typy snímačů

V této kapitole budou uvedeny nejčastěji používané optoelektronické součástky ke snímání světla. Všechny následující součástky spojuje to, že jsou založeny na vnitřním fotoelektrickém jevu.

Fotorezistor

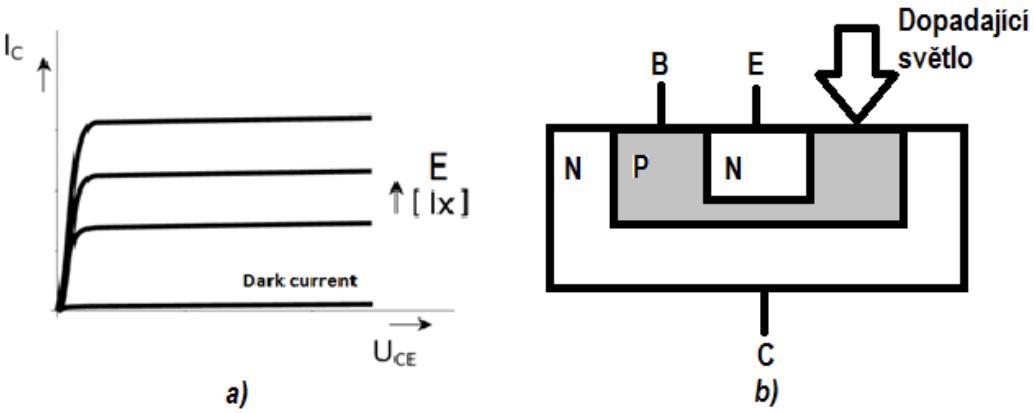
Vyrábí se pomocí napaření polovodičového materiálu (CdS nebo CdSe) na keramickou podložku. Fotorezistory reagují na světlo tak, že při osvětlení citlivé vrstvy dochází ke generování párů elektron – díra, v důsledku čehož klesá odpor součástky. Pro větší hodnotu odporu se polovodičová vrstva nanáší ve tvaru meandru. Nevýhodou je velká časová konstanta a vysoká teplotní závislost. [3] [4]



Obr. 2-3 a) Závislost odporu na osvětlení b) reálný fotorezistor [5]

Fototranzistor

Funguje jako klasický bipolární tranzistor, ale místo řídícího proudu přivedeného do báze, se využívá světelné energie. Dopadá-li světlo na oblast báze, dochází v této oblasti ke generování páru nosičů náboje. Tyto nosiče ovládají podstatně větší proud kolektoru. Některé fototranzistory mohou mít vyvedenou bázi k nastavení pracovního bodu. Výhodou fototranzistorů je vysoká citlivost, nevýhodou nelineární charakteristika proto je jeho nejčastější použití při konstrukci optočlenů. [4]



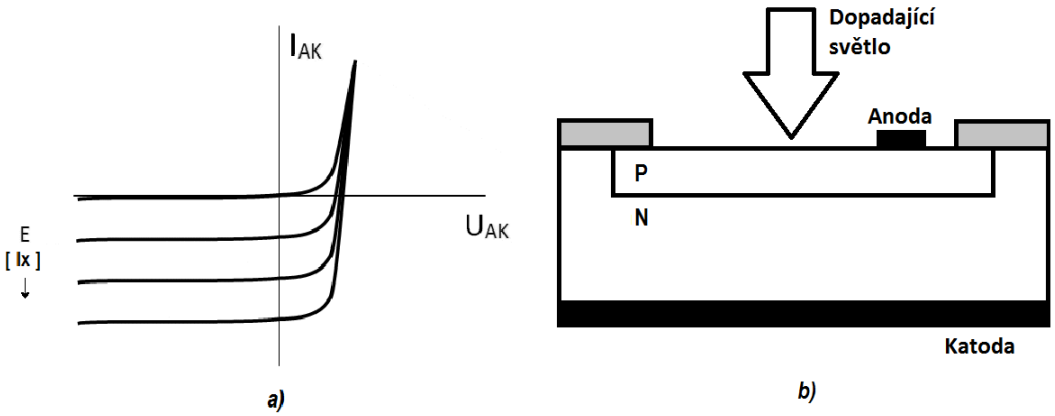
Obr. 2-4 a) VA charakteristika b) struktura fototranzistoru

Fotodioda

Jedná se o polovodičovou součástku konstrukčně upravenou tak, aby do PN přechodu pronikalo světlo. Pokud není přechod PN osvětlen, tak se součástka chová jako běžná plošná dioda. Fotodioda se vyrábí z křemíku a používá se ve dvou režimech, a to v propustném, respektive závěrném směru.

V propustném směru se při dopadajícím světle uvolňují elektrony a díry, ty jsou odpuzovány difuzním napětím a mohou téct obvodem, jinými slovy fotodioda vyrábí elektrickou energii. Tohoto jevu se využívá např. v kalkulačkách nebo fotovoltaických elektrárnách.

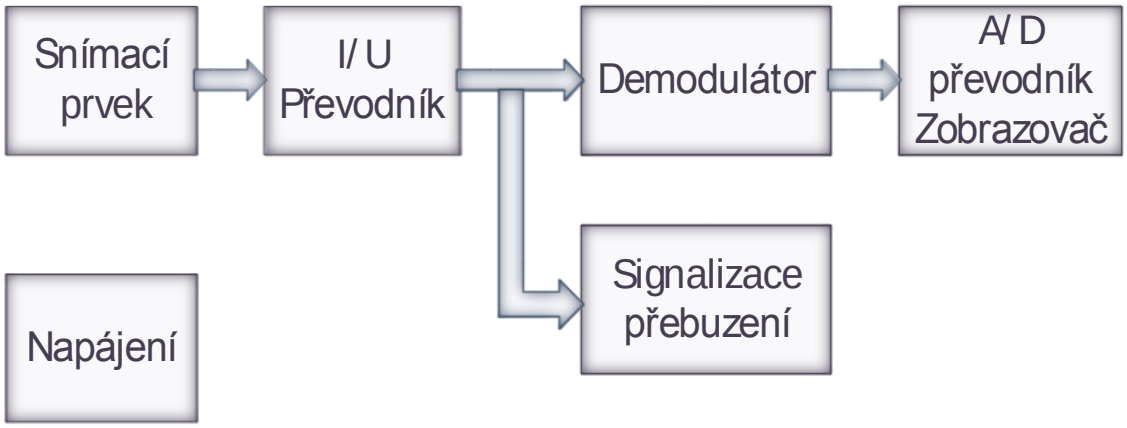
V závěrném směru teče fotodiodou určité množství proudu I_0 i při nulovém osvětlení. Tento proud se nazývá „dark current“ v překladu tzv. proud za tmy. Při zvětšujícím se osvětlení součástky, dochází k téměř lineárnímu nárůstu proudu. Díky této vlastnosti se fotodiody využívají v měřících aplikacích, jako jsou například luxmetry a jasoměry. [3] [4]



Obr. 2-5 a) VA charakteristika b) struktura fotodiody [5]

3 NÁVRH PŘEVODNÍKU

Uvedené blokové schéma (Obr. 3-1) popisuje kompletní zapojení převodníku. Schéma se skládá ze šesti základních bloků. Do snímacího prvku je, pomocí optického vlákna, přiveden vstupní signál, který je dále zpracováván v I/U převodníku, kde je převeden na napětí a zesílen na vhodnou napěťovou úroveň. Z převodníku je veden na demodulátor a detekci přebuzení. Demodulátor slouží k převodu střídavého signálu na stejnosměrný. Dál už je signál veden na displej a A/D převodník. Z převodníku už je výstupní hodnota zpracovávána softwarově. Napájení převodníku je řešeno 12 V adaptérem.



Obr. 3-1 Blokové schéma

Bloky budou detailně popsány v následujících kapitolách.

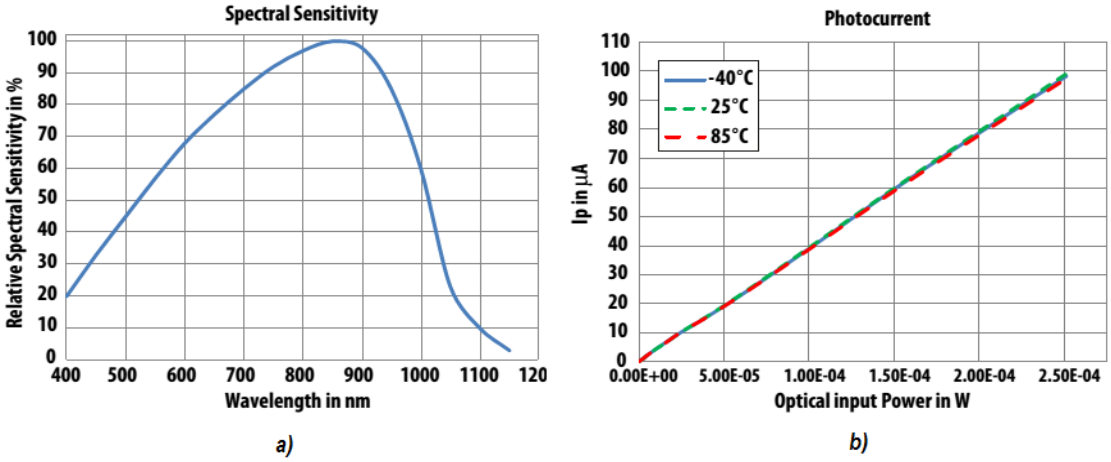
3.1 Snímací prvek

Vstupní součástkou měřicího přístroje je křemíková fotodioda typu SFH250V od výrobce Broadcom Limited. Ta se nejčastěji používá pro optický přenos dat z polymerního optického vlákna. Její výhody jsou:

- rychlý čas přepínání,
- citlivost ve viditelném a blízkém IR rozsahu,
- vysoká linearita,
- plastový konektor s upevňovacím šroubem.

Obr. 3-2 SFH250V [6]

Přijímač SFH250 má největší spektrální citlivost na vlnové délce 850 nm. Fotodioda může být použita pro přenosové rychlosti až 100 MBd. [6]



Obr. 3-3 a) Spektrální citlivost b) Závislost proudu na intenzitě osvětlení

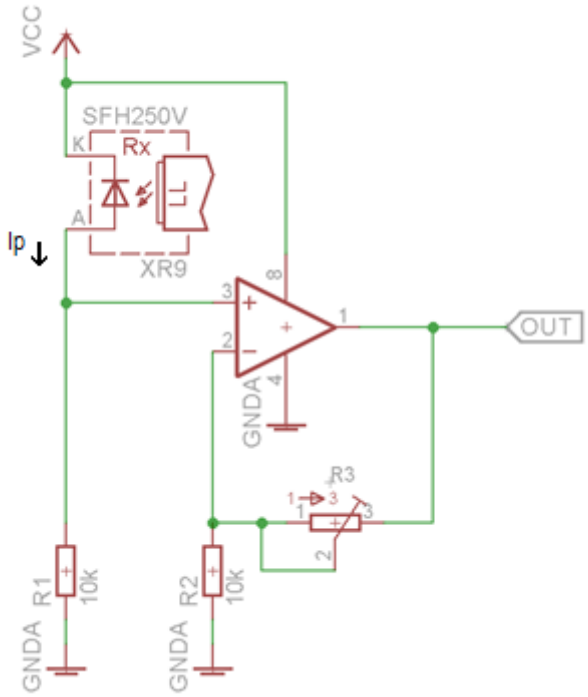
Součástka byla zvolena skrz vysokou linearitu a rychlost. V tabulce 2 jsou uvedeny důležité parametry vybrané fotodiody.

Tabulka 2 Parametry fotodiody [6]

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Maximální citlivost při vlnové délce	λ_{SMAX}	850	nm
Rozsah vlnové délky při 80%	λ_S	400 - 1100	nm
Dark current	I_R	1	nA
Kapacita	C_S	11	pF
Fotoproud	I_P	4,4	µA
Citlivost	R_{IP}	440	µA/mW
Závěrné napětí	V_R	30	V
Výkonová spotřeba	P_{tot}	100	mW
Teplotní koeficient	T_{IP}	-0,03	%/K

3.2 I/U převodník

Tento obvod detekce světla využívá operační zesilovač (OZ) s proudovou zpětnou vazbou.



Obr. 3-4 Převodník

Zesilovač je zapojen v neinvertujícím režimu. Výstupní napětí převodníku se vypočítá pomocí následujícího vzorce:[1]

$$\boldsymbol{U_{OUT} = I_P \cdot R1 \cdot \left(1 + \frac{R3}{R2}\right)\ [V]} \tag{4}$$

Pomocí zatěžovacího odporu R1 a fotodiody je na neinvertujícím vstupu OZ přiváděn signál v řádu stovek mV. Rezistence R3 je v reálném zapojení laditelný potenciometr s rozsahem od 100 Ω do 1 MΩ. Kombinace odporu R2, potenciometru a OZ vytváří rozsah zesílení od 1 po 100násobné.

Pro tuto aplikaci je zvolen operační zesilovač LM2904N, kvůli následujícím parametrům:[7]

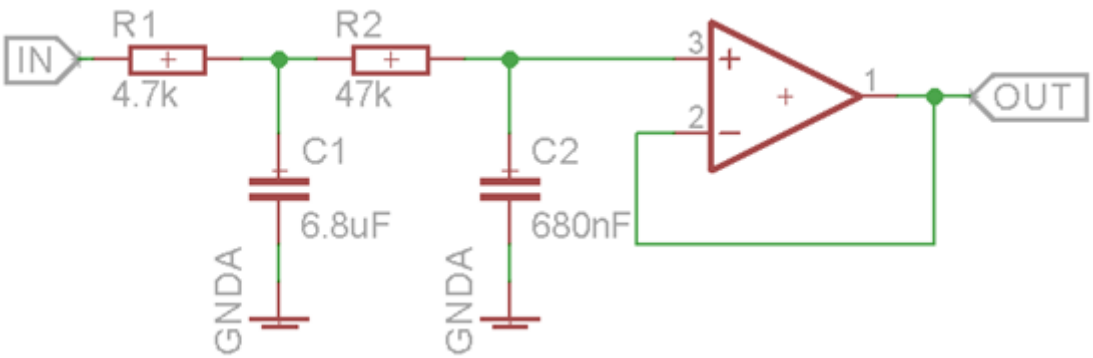
- Nesymetrické vstupní napájení 3 V až 26 V,
- Nízké offsetové napětí, pouze 2 mV,
- Vysoké zesílení (100 dB),
- Široký rozsah napětí (1 MHz),
- Vnitřní frekvenční kompenzace.

3.3 Demodulátor

Tento prvek slouží k zpracování PWM modulace a jsou na něj kladeny následující požadavky:

- Vyfiltrovat frekvence od 5 Hz,
- Nezdeformovat stejnosměrný signál,
- Výstupní zvlnění do 1 %.

Navrhnutý demodulátor se skládá ze sledovače a filtru (Obr. 3-5). Na vstup do kladné větve OZ je připojený dvoustupňový RC článek. Napěťový sledovač se využívá hlavně k oddělení vysokoimpedančního vstupu s nízkoimpedančním výstupem. Napětí na vstupu sledovače je stejné jako na výstupu. Použitý OZ je LM2904N, ten je detailněji popsán v předešlé kapitole.

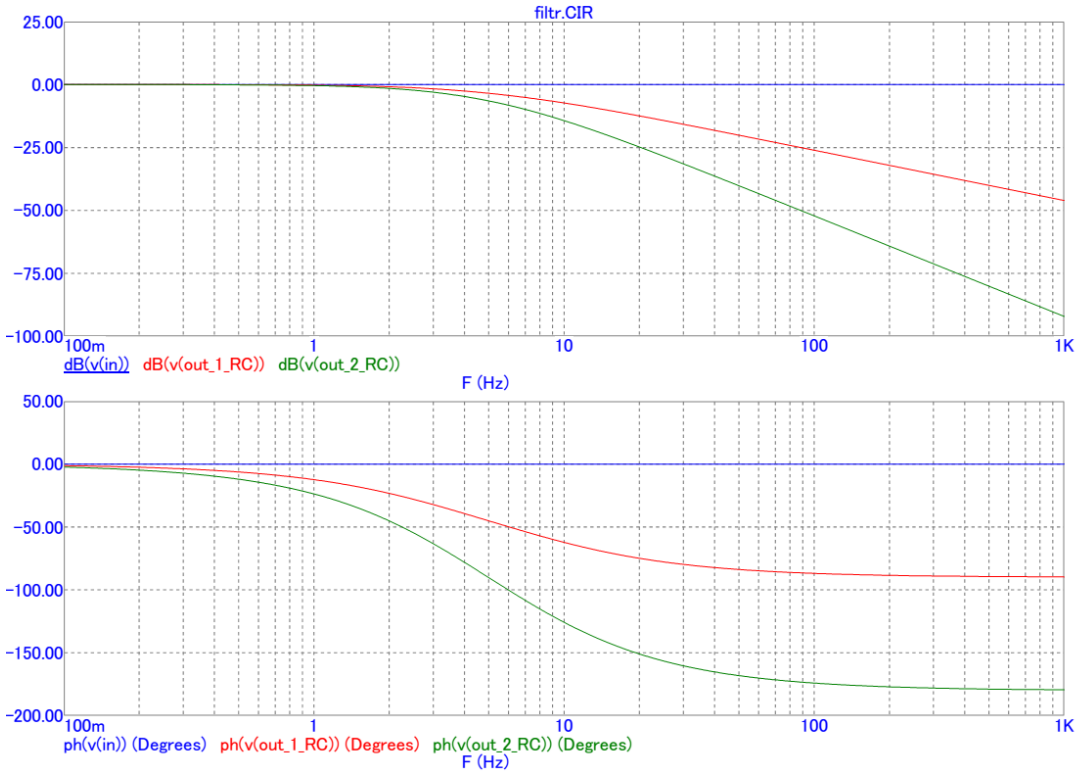


Obr. 3-5 Demodulátor

K návrhu filtru byl použit software Micro-Cap 10. Tento program slouží k simulaci analogových a digitálních obvodů a k jejich následné analýze.

Pro odfiltrování vyšších frekvencí se používá filtr typu dolní propust. Nejjednodušším typem je RC článek. Strmost amplitudové charakteristiky pro dolní propust (DP) prvního řádu je -20 dB na dekádu, pro druhý stupeň je strmost -40 dB na dekádu. Z toho vyplývá, že čím vyšší stupeň filtru, tím větší utlumení frekvence.

Pro tuto aplikaci je vyhovující filtr druhého řádu. Na (Obr. 3-6) jsou zobrazeny amplitudové a fázové charakteristiky filtru prvního řádu (červená barva) a druhého řádu (zelená barva).



Obr. 3-6 Amplitudová a fázová charakteristika

Následující RC člen se doporučuje zvolit tak, aby měl hodnoty R2=R1x10 a C2=C1/10. To z důvodu, aby další člen nezatěžoval předchozí stupeň a nesnižoval žádoucí signál. Hodnoty součástek jsou zvoleny dle vstupních požadavků.

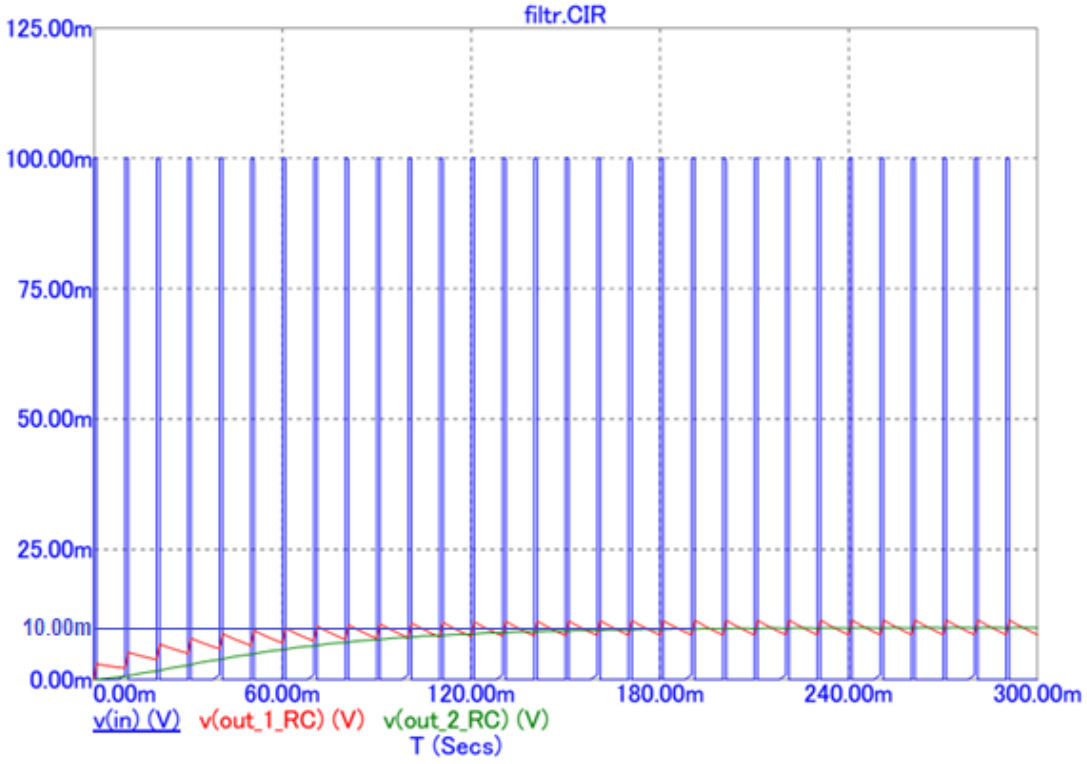
Mezní frekvence druhého řádu se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$f_{mez} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}} \ [Hz] \tag{5}$$

Vzorec s dosazenými hodnotami:

$$f_{mez} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{4{,}7 \cdot 10^{3} \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 47 \cdot 10^{3} \cdot 0{,}68 \cdot 10^{-6}}} \tag{6}$$

Výsledkem rovnice je f_{mez} = 4,98 Hz. Obrácenou hodnotou mezní frekvence je v tomto případě ustálení výstupního signálu a to přibližně 200 ms. Na (Obr. 3-7) je zobrazena časová analýza finálního filtru. Vstupním signálem je PWM signál o amplitudě 100 mV a střídě 10 %. Výstupem by tedy měl být usměrněný signál s amplitudou 10 mV. Z grafu je patrné že se po ustálení, už uvedených 200 ms, na tuto hodnotu dostane. Pro zajímavost je zobrazena i červená křivka filtru prvního řádu, ta je už od pohledu silně zvlněna a pro převodník nepoužitelná.



Obr. 3-7 Časová analýza

3.4 A/D převodník + zobrazovač

Za demodulátorem je vyveden výstup z DPS. Na výstup je připojen A/D převodník a zobrazovač. Úkolem A/D převodníku je konvertovat spojitou hodnotu signálu na digitální, a to pro její další zpracování.

K tomuto účelu se vybíralo mezi dvěma zařízeními. Prvním je multimetr Keithley 2700. Jedná se velice přesné zařízení, s rozlišovací schopností 22 bitů, s rozsáhlým spektrem využití. Zařízení má 2 sloty na měřící karty. Jedna karta dokáže snímat až 40 kanálů, kde každý kanál může být použit pro jinou funkci. Komunikaci je zajištěna přes RS-232 nebo GPIB.[12]

Druhým zařízením je NI USB-6000 od firmy National Istrument. Toto zařízení má rozlišovací schopnost o 12 bitech, dále disponuje 8 vstupními analogovými kanály a 4 digitálními kanály, ty mohou být použity jako vstupy, respektive i výstupy. Zařízení používá USB sběrnici, přes kterou je i napájeno.[8]

Rozdíl mezi produkty je značný. Keithley se vyznačuje vysokou přesností a multifunkčností. Jeho nevýhody, oproti USB-6000, jsou velikost, externí napájení, nižší snímací rychlost a komunikační rozhraní. V dnešní době lze připojit USB téměř kamkoli. Tím, jak je USB-6000 malé, lze vložit do kovové krabičky k DPS a jen vyvést USB kabel. Proto bylo vybráno právě toto zařízení.

Obr. 3-8 NI USB-6000

Jako zobrazovač byl vybrán digitální voltmetr s LED displejem o třech číslicích. Z voltmetru jsou vyvedeny 3 přívodní kabely, z nich 2 slouží k napájení přístroje a třetí je snímaný signál. Vlastnosti zvoleného voltmetru jsou:[9]

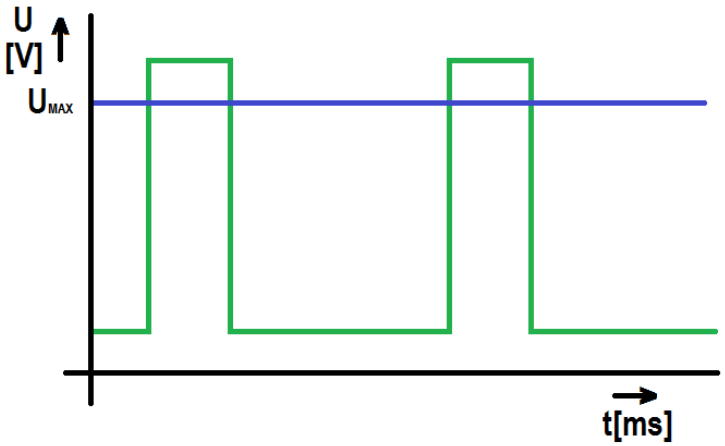
- Rozsah napájení od 3 V po 30 V,
- Měřící rozsah: DC 0 až 99,9 V,
- Přesnost měření 1 %,
- Obnovení hodnot každých 500 ms,
- Pracovní rozsah teplot od -10 °C po 65 °C.

Obr. 3-9 LED Display [9]

Na tuto součástku se nekladou příliš vysoké nároky. Hlavní funkce voltmetru bude k nastavení přibližné úrovně napětí před zahájením měřícího testu. Poté už bude napěťová hodnota sledována pomocí specializovaného softwaru EMC32.

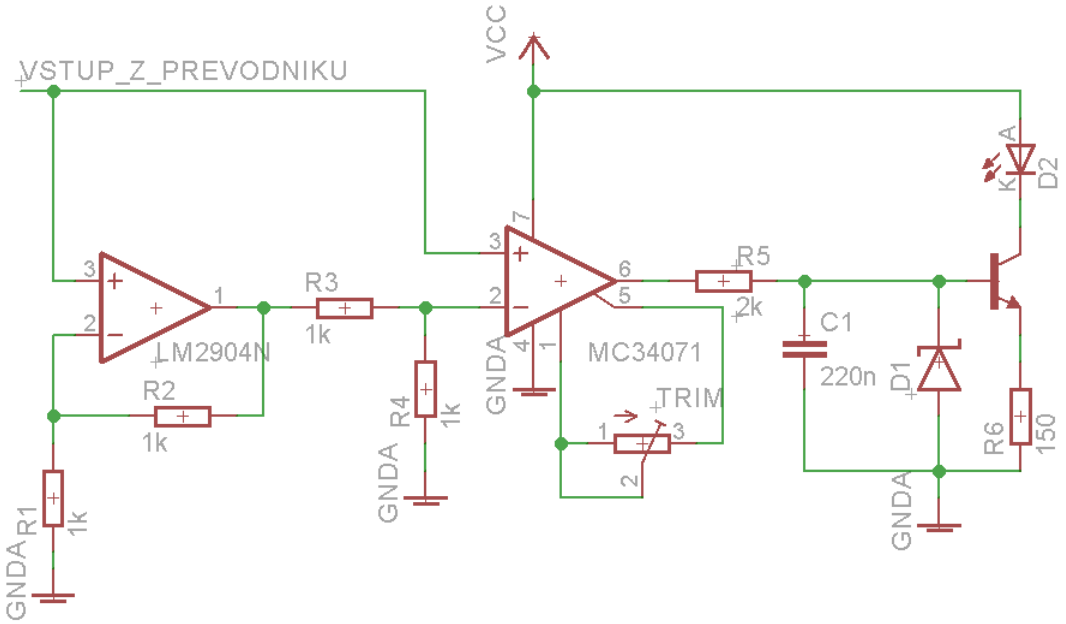
3.5 Detekce přebuzení, signalizace

Tato funkce slouží jako doplněk k měření. Je určena k indikaci přebuzeného signálu. Může se stát, že vstupní I/U převodník ořízne signál přivedený z fotodiody a tím ho zkreslí. Tato situace může velice snadno nastat u PWM signálu, tak jak je zobrazeno na Obr. 3-10. Modrá křivka značí maximální saturační napětí operačního zesilovače. Zelená křivka znázorňuje přebuzený PWM signál. Takový signál OZ nezesílí, ale ořízne ho na své saturační napětí. To způsobí změnu střední hodnoty napětí a vznik zkresleného signálu.



Obr. 3-10 Přebuzený PWM signál

Při měření se doporučuje nastavit výstupní napětí maximálně na 50 % napájecího napětí převodníku. Tento krok zaručuje to, že je v obou směrech dostatečná dynamika světla. Dalším důvodem k nastavení poloviční úrovně napětí převodníku jsou tolerance od zákazníka. Ty jsou nejčastěji voleny 10 % a 30 %. Za pomocí těchto podmínek je řešena signalizace přebuzení PWM signálu.



Obr. 3-11 Signalizace přebuzení

Signalizační obvod se skládá z 3 částí. V první části se signál násobí, v druhé se naopak dělí a ve třetí se porovnává a vyhodnocuje. Vstupní signál z převodníku je přiveden napřímo na invertující vstup komparátoru. Ten stejný signál je veden na zesilující obvod, který ho násobí dvěma. Poté je přiveden na dělič napětí, tam je dvěma vydělen. Z děliče je přiveden na druhý vstup komparátoru. Logicky vyplývá, že by tento signál měl mít stejnou hodnotu jako signál, který je přiveden napřímo. Avšak pokud má větší hodnotu než 50% maximálního, saturačního, napětí a následně je vynásoben dvěma, tak je ořezán, protože nemůže mít více než 100 %. Poté co je vydělen dvěma se tedy dostane na 50% saturačního napětí. Z čehož vyplývá, že je signál na invertujícím vstupu větší než na neinvertujícím a komparátor dává logickou jedničku. Tímto krokem se zmenší výstupní napěťový rozsah, je však jistota, že převodník pracuje s původním přivedeným signálem.

Zesílení signálu je řešeno pomocí operačního zesilovače zapojeného v neinvertujícím režimu. Výpočet tohoto zapojení je:[1]

$$\boldsymbol{U1 = U_{IN} \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2} \right)\ [V]} \tag{7}$$

V tomto případě stačí zvolit odpory se stejnou hodnotou, aby byl signál násoben dvěma. U děliče napětí, který je na Obr. 3-11 znázorněn odpory R3 a R4, se výstupní napětí vypočítá ze vzorce:

$$\boldsymbol{U2 = U1 \cdot \left(\frac{R3}{R3 + R4} \right)\ [V]} \tag{8}$$

Opět je důležité zvolit rezistory se stejným odporem, aby byla ve výsledku žádaná hodnota dělená dvěma.

Jak už bylo zmíněno, tak komparátor porovnává vzájemně vstupní signály. Pokud je na invertujícím vstupu větší napětí než na neinvertujícím, je na výstupu kladné saturační napětí. V opačném případě tam je nulové napětí. V případě, že by byl komparátor napájen symetricky. Na výstupu by bylo záporné saturační napětí.

Jako komparátor je použit OZ typu MC34071ADG. Hlavní důvod jeho použití byl skrz nesymetrické napájení a vnější nulování offsetu. Toho se docílí pomocí dolaďovacího trimru připojeného mezi piny 1 a 5.

Za komparátorem je vložen rezistor, ten slouží k oddělení výstupu komparátoru s bází tranzistoru. Dalším prvkem je kondenzátor k vyfiltrování šumu. Tato kombinace zaráz tvoří RC článek typu dolní propust. Při sestavení převodníku vznikl problém, kdy signál vedený napřímo byl rychlejší než upravený signál. Skrz tento jev vznikla na výstupu komparátoru napěťová špička, o délce 20μs. Ta dokázala otevřít tranzistor a lehce rozsvítit LED. Skrz tento parazitní jev byla zvolena hodnota kondenzátoru 220 nF a mezní frekvence filtru 360 Hz.

Dále za RC článkem je připojena Zenerova dioda typu BZX84C na 5,1 V. Ta je určená k tomu, aby na bázi nebylo kompletní saturační napětí komparátoru, ale přibližně polovina. Dioda je spínána pomocí tranzistoru BCP 56-16.
Signalizační dioda je červené barvy, má jmenovité napětí 2,1V a odebíraný proud 20 mA. Výpočet rezistoru R6 pro diodu:

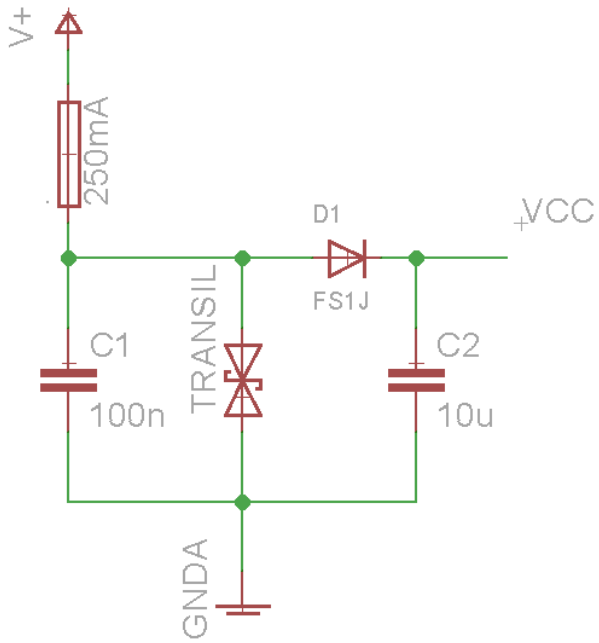
$$\boldsymbol{U_R = U_Z - U_D = 5,1 - 2,1 = 3\ V} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{U_R}{I_D} = \frac{3}{20 \cdot 10^{-3}} = 150\ \Omega} \tag{10}$$

Jmenovité napětí signalizační diody se odečte od toho na Zenerově diodě. Z výsledného napětí a odebíraného proudu diody se podle Ohmova zákona zjistí hodnota rezistoru.

3.6 Napájení

Důležitou částí přesného měřicího přístroje je stabilizované napětí. Převodník je napájen pomocí adaptéru typu DA12-M. Adaptér převádí střídavě napětí 230 V ze zásuvky, na stejnosměrné výstupní napětí 12 V s maximálním proudem 1 A. Adaptér disponuje ochranou proti přetížení, zkratu a také vestavěným EMI filtrem. Z adaptéru je napětí přivedeno přes pojistku na DPS a displeje.

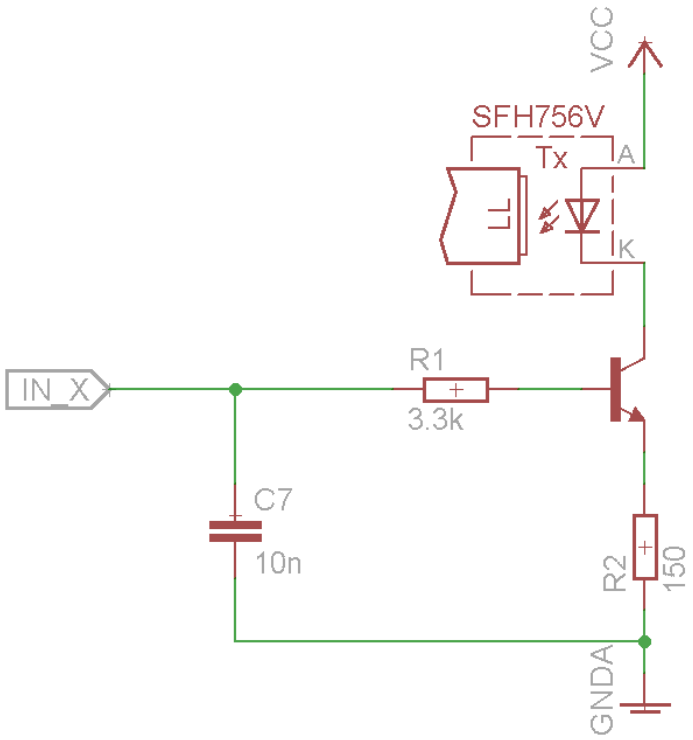


Obr. 3-12 Vstupní obvod

Ochranný obvod DPS je tvořen tavnou pojistkou na 250 mA, transilem a usměrňovací diodou FS1J. Transil je součástka konstruována na velké impulzní proudy. Po větším přetížení se zkratuje a tím ochrání připojené zařízení před zničením, je tedy spolu s pojistkou veden jako přepěťová ochrana. Dioda slouží k ochraně zařízení proti přepólování. Kondenzátor C1 slouží k filtraci šumu a rušení ve vedení. Kondenzátor C2 slouží jako krátkodobý zdroj energie při rychlé změně zatěžovacího proudu obvodu.

3.7 Ověření linearity převodníku

Tento blok slouží k ověření linearity převodníku. Funguje na jednoduchém principu, kdy je tranzistor zapojen jako regulátor kolektorového proudu. Tento proud mění intenzitu záření připojené diody.



Obr. 3-13 Obvod k ověření linearity

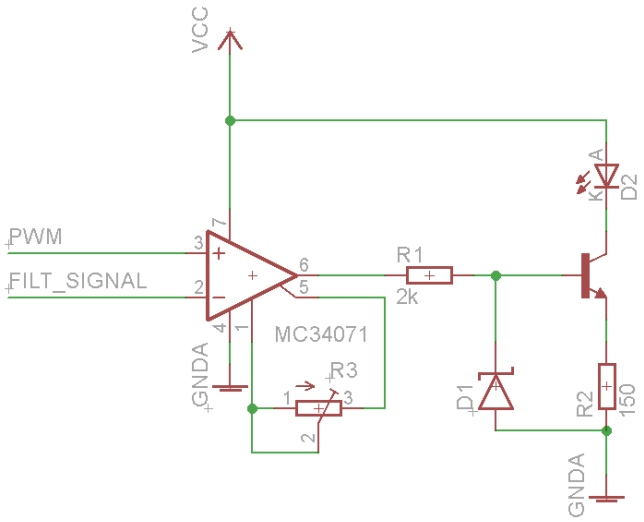
Do vstupu IN_X je, přes BNC konektor, přiveden ověřovací signál z funkčního generátoru. Kondenzátor slouží k zachycení a odfiltrování šumu. Odpor R1 k oddělení báze a generátoru. Se změnou proudu se mění intenzita záření diody SFH756V. Z této diody je vedeno optické vlákno, na jehož druhém konci je ověřovaná fotodioda.

Obr. 3-14 SFH756V

Dioda pracuje na vlnové délce 660 nm se spektrálním rozsahem 25 nm. Její jmenovité napětí jsou 3 V a odebírá proud 50 mA.

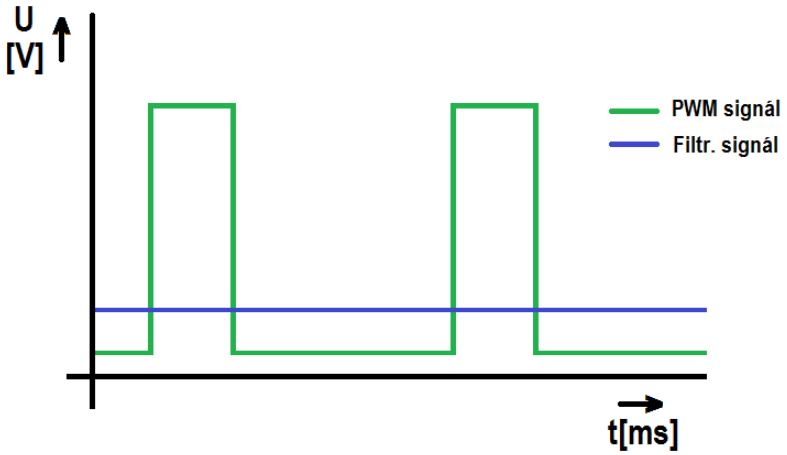
3.8 Detekce PWM

Lidský zrak rozpozná frekvence zhruba do 30 Hz. Vše, co je nad tuto hodnotu, mu přijde jako konstantní. V automotive průmyslu se nejčastěji vyskytují frekvence o 100 Hz a 200 Hz. Takže pokud LED bliká o frekvenci 100 Hz. Lidské oko toto blikání vnímá jako konstantní svícení.



Obr. 3-15 Detekce PWM

Na tomto principu je vyřešena detekce PWM. Do komparátoru je přiveden filtrovaný, usměrněný, signál. V tomto případě je brán jako referenční napětí. Druhým vstupním signálem je PWM signál, který rozsvěcuje signalizační LED. Zapojení za komparátorem je detailně popsáno v kapitole 3.5.

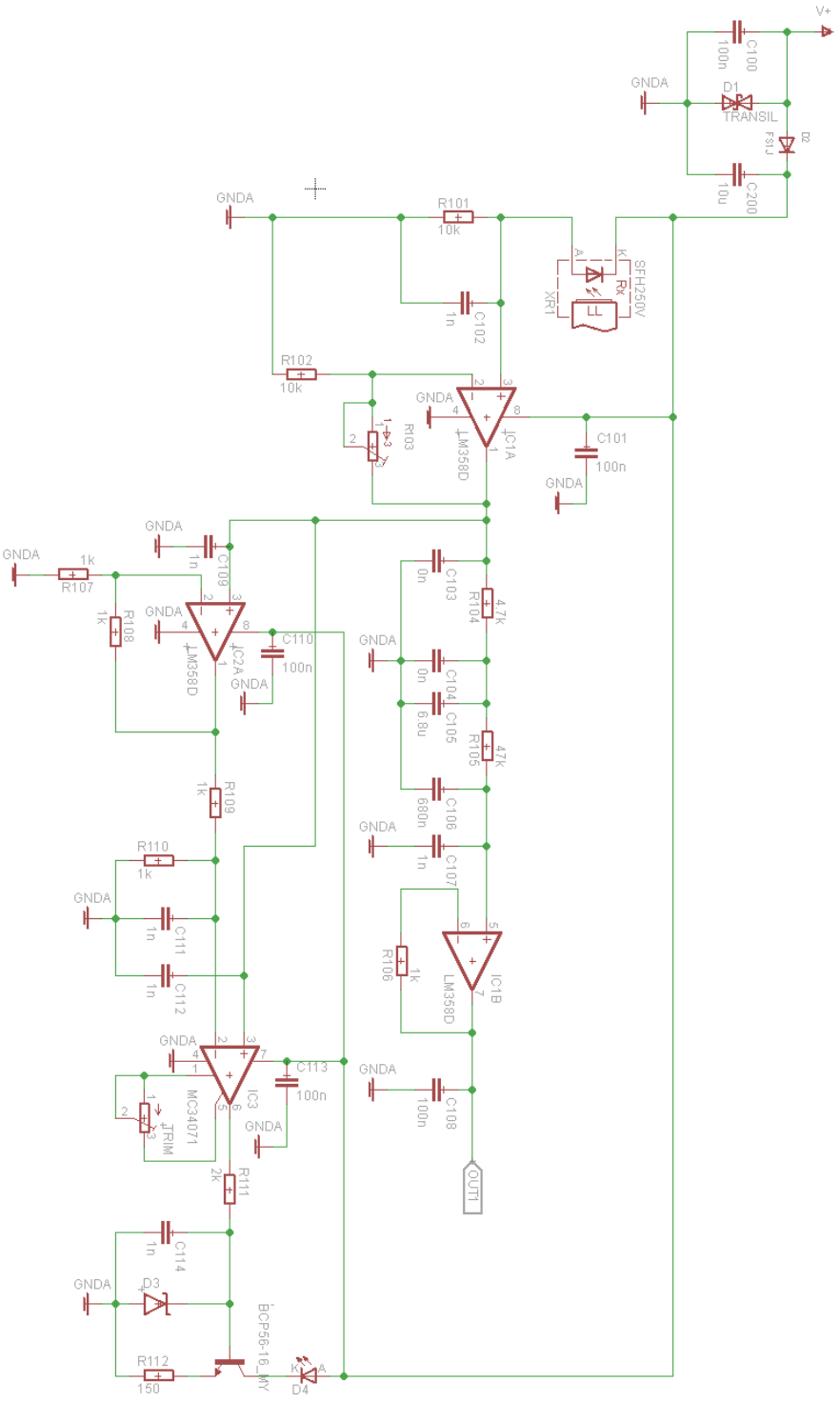


Obr. 3-16 Časový diagram detekce PWM

Detekce PWM v přístroji nakonec není použitá, místo ní je zvolena detekce přebuzení. Ta se po konzultaci ve firmě určila jako důležitější prvek. Zde je tato kapitola uvedena skrz splnění bodu č. 3 ze zadání.

4 REALIZACE PŘEVODNÍKU

Pro tvorbu schématu a následně DPS byl použit program EAGLE 6.4.0. Kompletní schéma zapojení všech součástek je uvedeno v příloze 2. Zde je zobrazeno schéma jednoho kanálu doplněné o vstupní obvod a blokovací kondenzátory.



Obr. 4-1 Kompletní schéma jednoho kanálu

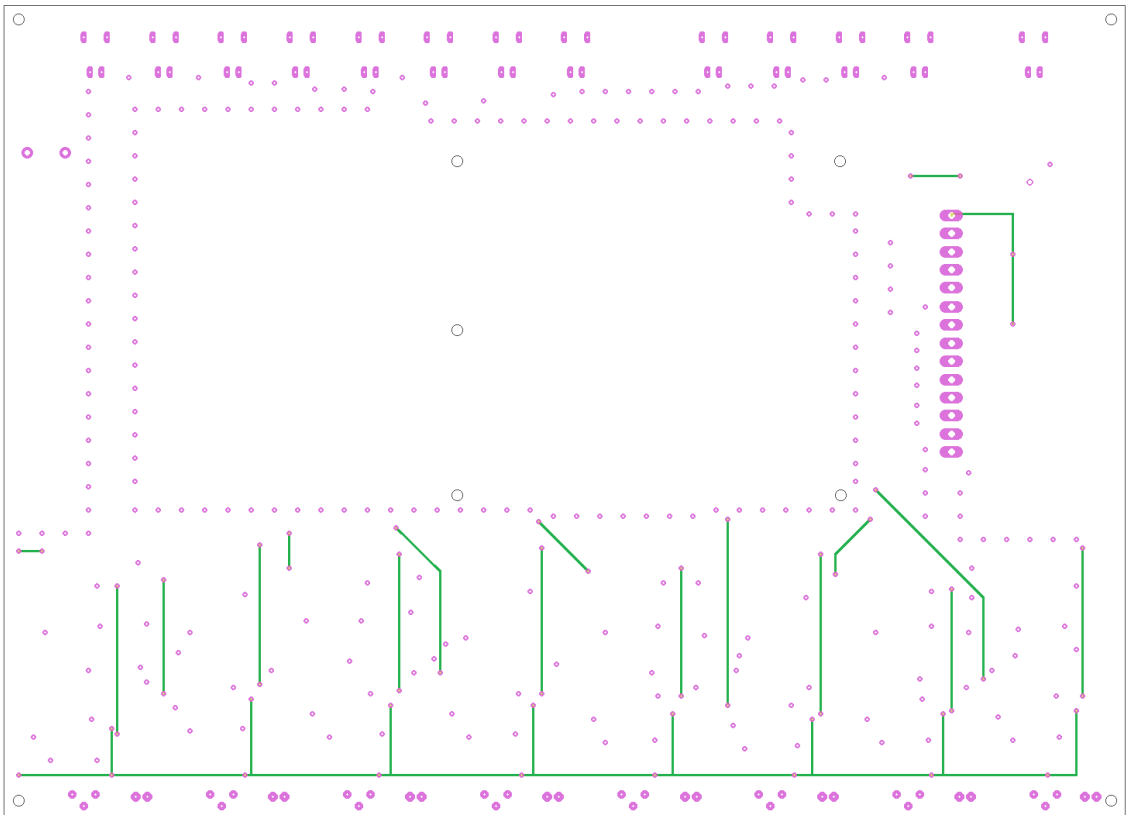
Tabulka 3 Seznam součástek pro jeden kanál

Part	Value	Device	Package
BCP56-16		Tranzistor	SOT223
C100	100n	Kondenzátor	SMD0805
C101	100n	Kondenzátor	SMD0603
C102	1n	Kondenzátor	SMD0603
C103	0n	Kondenzátor	SMD0805
C104	0n	Kondenzátor	SMD0805
C105	6.8u	Kondenzátor	SMD0805
C106	680n	Kondenzátor	SMD0805
C107	1n	Kondenzátor	SMD0603
C108	100n	Kondenzátor	SMD0603
C109	1n	Kondenzátor	SMD0603
C110	100n	Kondenzátor	SMD0603
C111	1n	Kondenzátor	SMD0603
C112	1n	Kondenzátor	SMD0603
C113	100n	Kondenzátor	SMD0603
C114	1n	Kondenzátor	SMD0603
C200	10u	Kondenzátor	SMD0805
D1	TRANSIL	15KEXXC	CB429-1
D2	FS1J	DIODE	SMA
D3	5V1	BZX84C	SOT23
D4	2V1	LED	5MM
IC1	LM2904N	LM2904N	SO08
IC2	LM2904N	LM2904N	SO08
IC3	MC34071	MC34071ADG	SO08
R101	10k	Rezistor	R0603
R102	10k	Rezistor	R0603
R103	1M	Potenciometr	3386H
R104	4.7k	Rezistor	R0603
R105	47k	Rezistor	R0603
R106	1k	Rezistor	R0603
R107	1k	Rezistor	R0603
R108	1k	Rezistor	R0603
R109	1k	Rezistor	R0603
R110	1k	Rezistor	R0603
R111	2k	Rezistor	R0603
R112	150	Rezistor	R1206
TRIM	10k	TRIMR	TC33X
XR1	SFH250V	Fotodioda	SFH-V

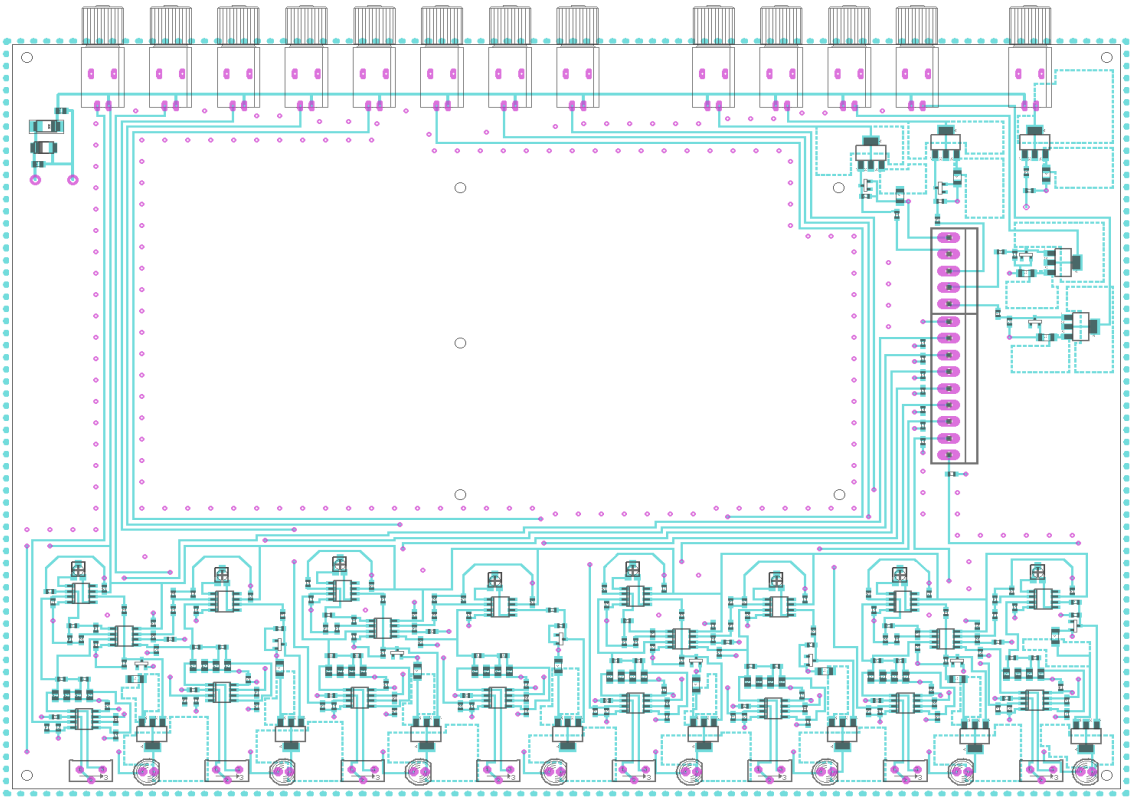
Všechny uvedené součástky byly zakoupeny z internetového obchodu Farnell. Kompletní seznam všech použitých součástek je uveden v příloze 6.

Při návrhu desky je vhodné přidávat filtrační a lokální blokovací kondenzátory. Filtrační kondenzátory slouží k zamezení šíření šumu a rušení po vodičích. Lokální kondenzátory se chovají jako blízké a rychlé zdroje pro použité součástky. [13]

Při návrhu DPS se dbalo na základní pravidla z hlediska elektromagnetické kompatibility. Mezi ty patří především minimalizace hodnot proudu a proudových smyček. Skrz toto doporučení je nejdůležitější vhodně rozmístit součástky, použít rozlévanou měď a zemnění. Dále by se mělo zvolit vhodné stínění k potlačení vyzařování a zvýšení odolnosti. Skrz toto doporučení je DPS vložena v kovové krabici. Důležité je vybrat vhodné součástky, doporučuje se maximální využití SMD součástek, a to kvůli příznivějším parazitním vlastnostem a ušetření prostoru.



Obr. 4-2 Layout – vrstva BOTTOM

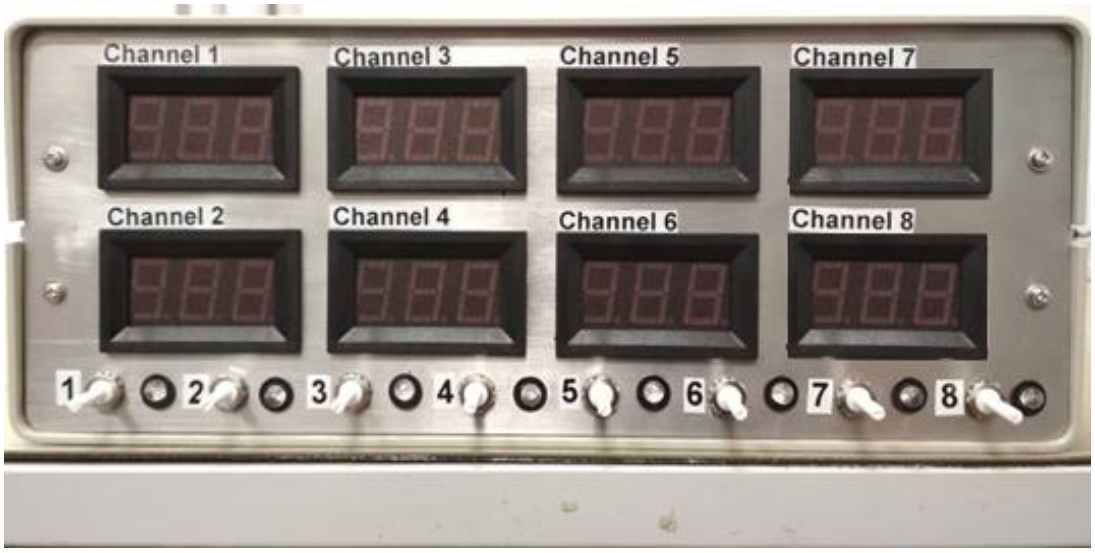


Obr. 4-3 Layout – vrstva TOP

DPS má rozměry 245 x 177 mm. Deska má z obou stran rozlévanou měď. Protože se jedná v celku o složitou aplikaci, jsou použity obě strany DPS. Spodní vrstva, BOTTOM (Obr. 4-2), není osazená a je určená k vedení spojů, které by se na vrchní vrstvě křížily.

Na vrchní vrstvě, označením TOP, je umístěno všech 310 pájecích součástek. Některé součástky, které by mohly být náchylné na teplo, z toho důvodu jsou umístěny na chladících ploškách. Jedná se především o tranzistory a odpory u signalizačních diod. Součástky jsou situovány tak, aby z jedné strany přístroje byla veškerá kabeláž, tedy vstupní konektory, napájecí konektor, vyměnitelná pojistka a fotodiody (Obr. 4-4). Druhá strana přístroje slouží k ovládání a signalizaci. Zde jsou vyvedeny potenciometry k zesílení napětí, zobrazovací voltmetry a signalizační diody (Obr. 4-5).

Obr. 4-4 Zadní panel



Obr. 4-5 Přední panel

Na zadním panelu jsou, kromě dříve popsaných vývodů, ještě 4 digitální výstupy. Ty jsou vyvedeny z NI USB-6000, a to k plnému využití všech funkcí přístroje. Dále je zde ještě umístěno 8 vstupních BNC konektorů. Ty slouží k měření pomocí Langer systému. Toto měření je určeno k měření proudu a probíhá přes odpor s nízkou hodnotou, např. 0,1 Ω. Ten se nazývá „shunt“.

4.1 Ověřovací měření

Měření probíhalo na přístroji NI VirtualBench. Toto zařízení spojuje osciloskop, funkční generátor, digitální multimetr a zdroj stejnosměrného napětí do jednoho přístroje.

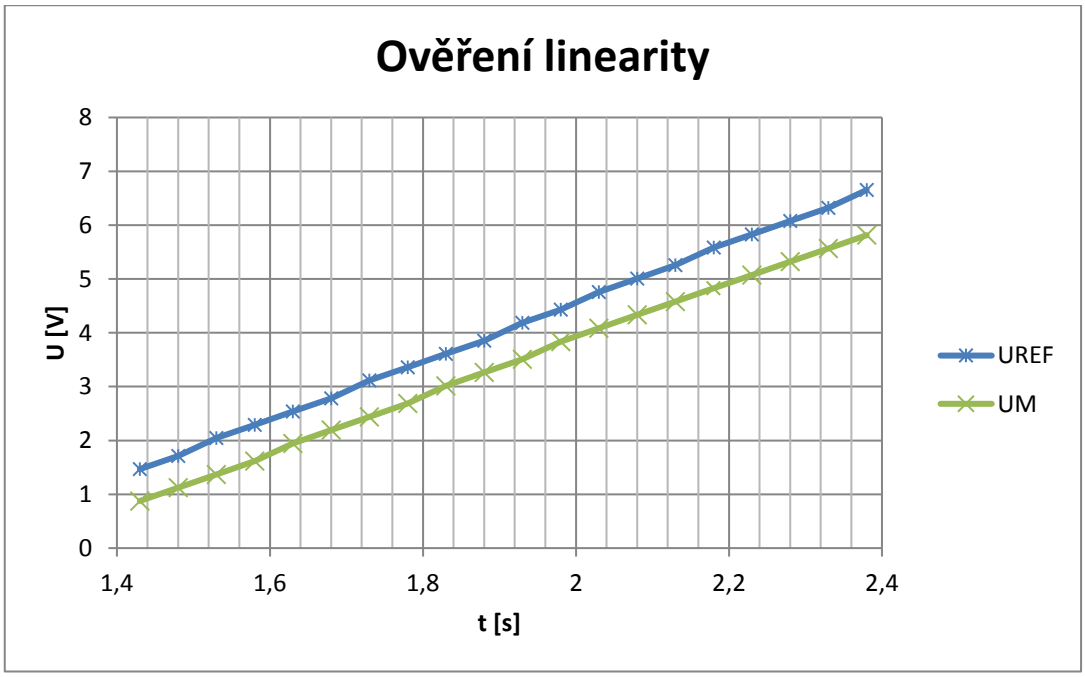
Linearita přístroje se ověřovala vizuálně pomocí osciloskopu. Jako vstupní signál byla přivedena napěťová pila, červená křivka, o periodě 2 s. Výstupní signál je zobrazen jako žlutá křivka. Z grafu je patrné, že výstupní signál kopíruje vstupní a jejich zlomy jsou na stejných místech, rozdíl je v napěťové úrovni.

Obr. 4-6 VirtualBench

Ze zobrazených průběhů z Obr. 4-6 jsou vyexportována data do Excelu, ty jsou připojena v příloze 7. Protože se jedná o soubor, kde bylo vyexportováno několik tisíc hodnot, tak je do tabulky 4 vybrána jen jedna část signálu s nástupnou hranou a k tomu každá desátá hodnota. Z tabulky je vytvořen graf (Obr. 4-7) k ověření linearity. Obě křivky jsou rovnoběžné přímky. Při detailnějším zkoumání si lze všimnout mírného zvlnění. Jednou z možností, kde může vzniknout tato chyba, je šum a okolní světelné vlivy, jako jsou třeba zářivky v laboratoři.

Tabulka 4 Ověřovací měření

Č.měření	t[s]	U_{REF} [V]	U_M [V]
1	1,43	1,467	0,875
2	1,48	1,714	1,122
3	1,53	2,044	1,369
4	1,58	2,290	1,616
5	1,63	2,537	1,945
6	1,68	2,784	2,192
7	1,73	3,113	2,439
8	1,78	3,360	2,686
9	1,83	3,607	3,015
10	1,88	3,854	3,262
11	1,93	4,183	3,509
12	1,98	4,430	3,838
13	2,03	4,760	4,085
14	2,08	5,006	4,332
15	2,13	5,253	4,579
16	2,18	5,583	4,826
17	2,23	5,830	5,072
18	2,28	6,076	5,319
19	2,33	6,323	5,566
20	2,38	6,653	5,813



Obr. 4-7 Graf – linearita

5 ZÁVĚR

V první části bakalářské práci byla zpracována literární rešerše zabývající se měřením intenzity osvětlení. Dále v této kapitole jsou shrnuty snímače pracující na základě vnitřního fotovoltaického jevu. Pro tuto práci byla zvolena fotodioda pro její linearitu.

Druhá část práce obsahuje návrh měřícího převodníku. Návrh začíná blokovým schématem a podrobným popisem jednotlivých bloků. Nejdůležitější částí tohoto zařízení je právě převodník světla na proud, v tomto případě tedy fotodioda, jejíž parametry ovlivňují parametry celé soustavy. Dalším popsaným prvkem v zapojení je napěťový převodník, sloužící k převedení proudu na napětí a k zesílení vstupního signálu. Z tohoto prvku je signál veden na demodulátor, v tomto případě filtr typu dolní propust, a signalizaci přebuzení. V původním návrhu měl převodník obsahovat detekci PWM signálu. V průběhu práce však vyvstaly požadavky, aby se na místo detekce PWM umístila signalizace přebuzení vstupního signálu. V bakalářské práci jsou popsány oba návrhy.

V další kapitole je podrobný popis návrhu DPS a zkompletování převodníku. Deska byla tvořena na základě pravidel z hlediska elektromagnetické kompatibility, jedním z nich je například vylévaná zem. Dalším opatřením je použití kovové krabice.

Posledním bodem práce je popis ověřovacího měření. V tom bylo nejdůležitější prozkoumat linearitu převodníku.

Největší prací na tomto přístroji bylo jeho slazení se všemi požadavky. K tomu patří mnoho hodin se simulačním programem MicroCap. Po finálním návrhu byl zhotoven prototyp jednoho kanálu. Po ověření jeho funkčnosti byla navržena DPS v programu Eagle.

Práce byla splněna ve všech bodech zadání. Vznikl funkční měřící přípravek, který se využívá pro měření v EMC laboratoři firmy Hella Autotechnik Nova s.r.o. v Mohelnici.

Literatura

[1] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-187-2.

[2] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.

[3] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. 4. vyd., v Idea servis 2. vyd. Praha: Idea servis, 1997. ISBN 80-859-7020-1.

[4] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení.* Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0123-3.

[5] DIVIŠ, Josef. *Součástky řízené světlem* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/neelektricke.html

[6] *Photodiode Detector* SFH250V [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/629393.pdf?_ga=2.262118157.1056082 75.1494435096-816552618.1488227007

[7] Operational amplifier: LM2904N. *Farnell* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1902748.pdf?_ga=2.255513359.683157129.14 95617694-816552618.1488227007

[8] Multifunction DAQ Device: NI USB 6000. *National Instruments* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/manuals/373921a.pdf

[9] Voltage meter. *Alliexpress* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://bit.ly/2rSWBFB

[10] Operational amplifier: MC34071ADG. *Farnell* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1841983.pdf?_ga=2.24471290.1162417357.14 95619901-816552618.1488227007

[11] AUDIOLIGHT. *Elektrické přípojky* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://c.audiolightservice.cz/images/Spektrum.png

[12] Multimeter: Keithley 2700. *Tektronix* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/document/resources/2700_Brochure.pdf

[13] POUŽITÍ BLOKOVACÍCH KONDENZÁTORŮ PŘI NÁVRHU DPS*: Ing. Ondřej Čožík* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: http://www.slaboproudyobzor.cz/files/20130308.pdf

Seznam zkratek

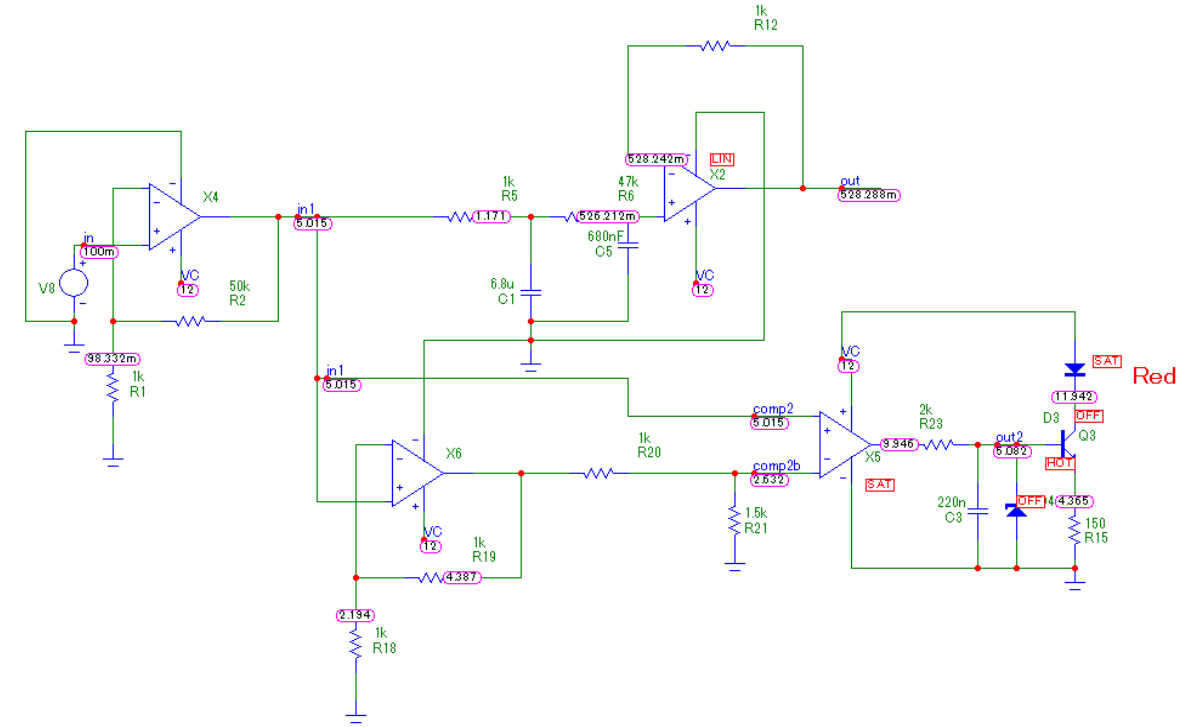
PWM	-	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
LED	-	Light Emitting Diode (dioda vyzařující světlo)
DIO	-	Digital input, output
OZ	-	Operační zesilovač
DPS	-	Deska plošných spojů
A/D	-	Analogově / Digitální
NI	-	National Instruments
SMD	-	Surface Mound Device (součástka pro povrchovou montáž)
EMC	-	Elektromagnetická kompatibilita
DP	-	Dolní propust

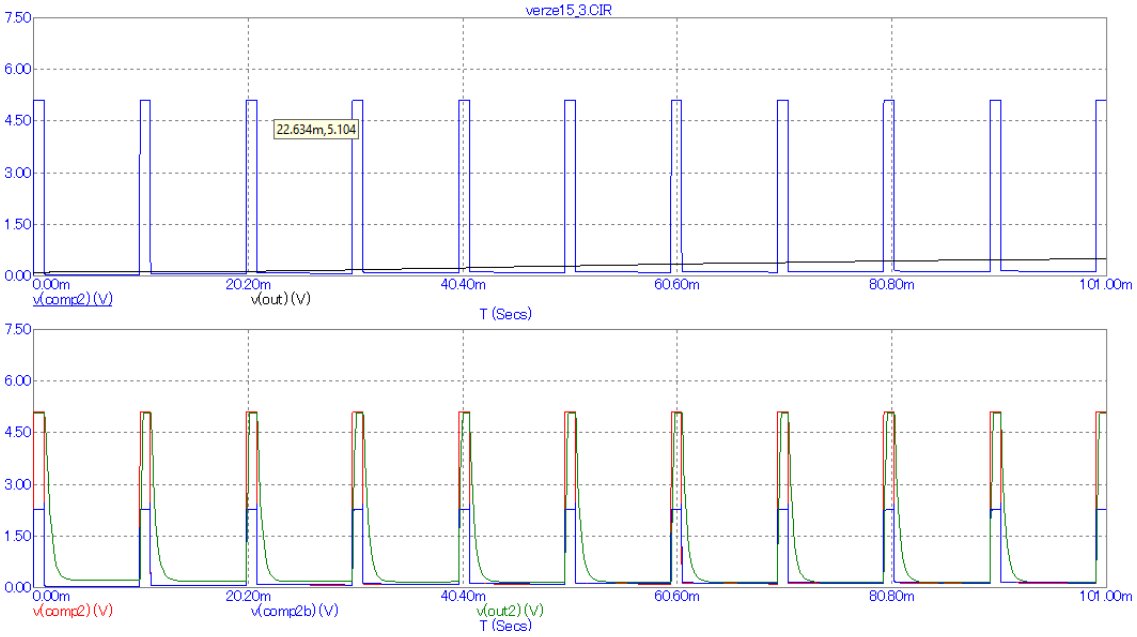
Seznam příloh

Příloha 1	Simulace celého obvodu
Příloha 2	Kompletní schéma zapojení
Příloha 3	Layout TOP, BOTTOM
Příloha 4	Osazená DPS
Příloha 5	Vnitřní zapojení
Příloha 6	Seznam součástek
Příloha 7	Naměřená data
Příloha 8	Osazovací návrh

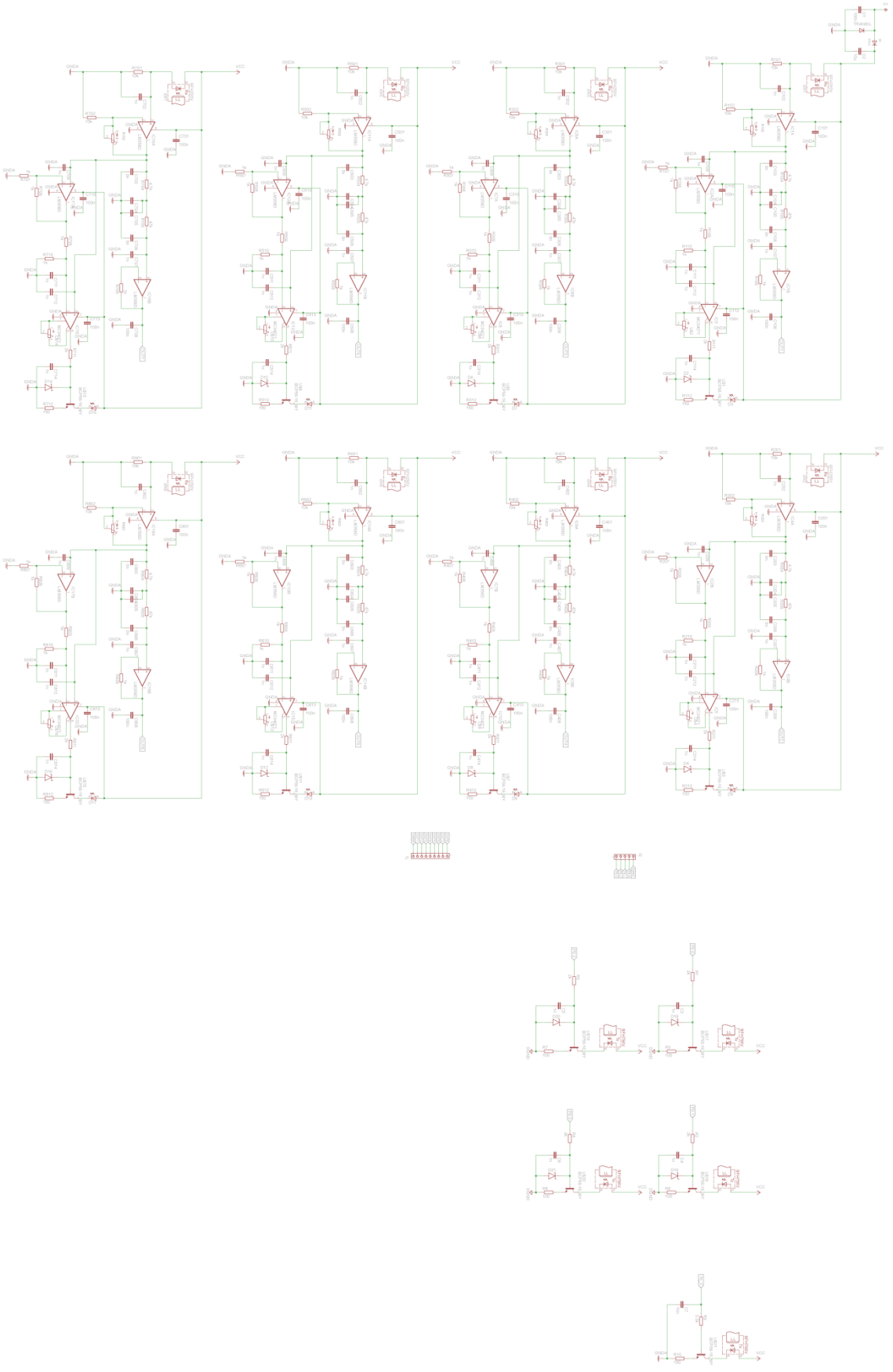
Příloha 1

Simulace celého obvodu v prostředí Micro-Cap + časové průběhy



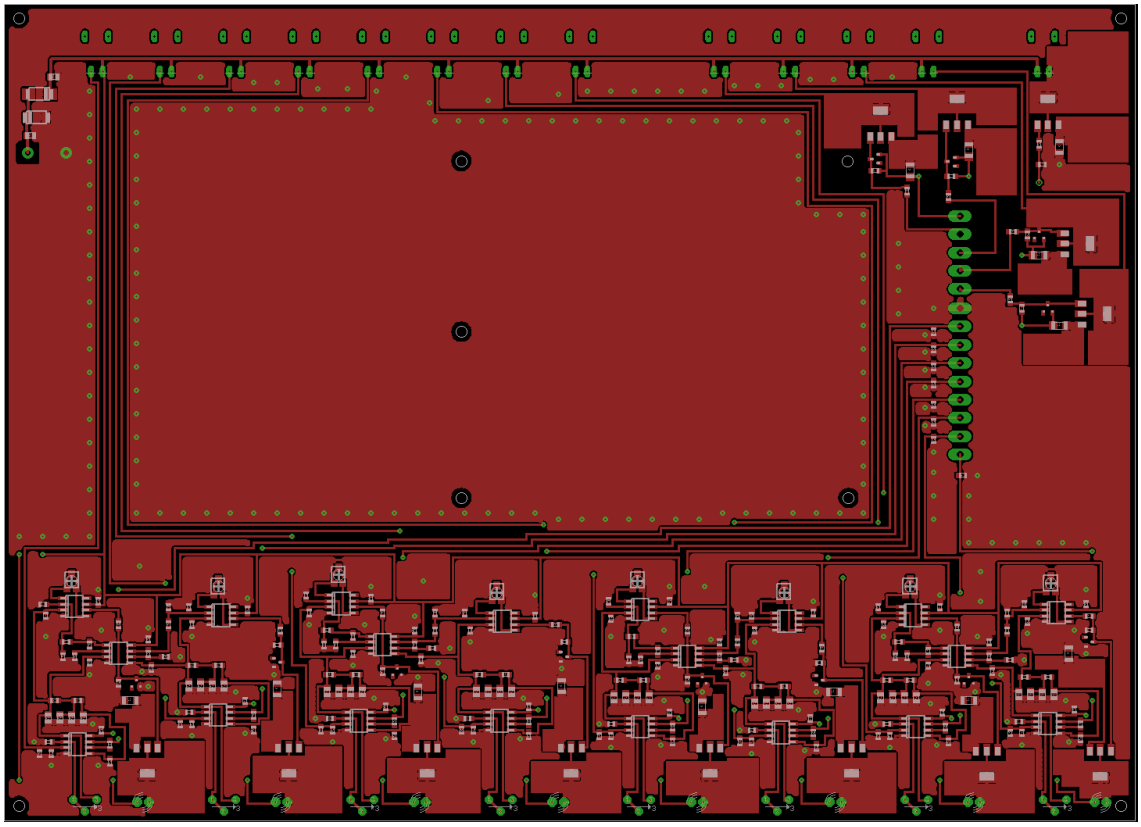


Příloha 2 – Kompletní schéma zapojení

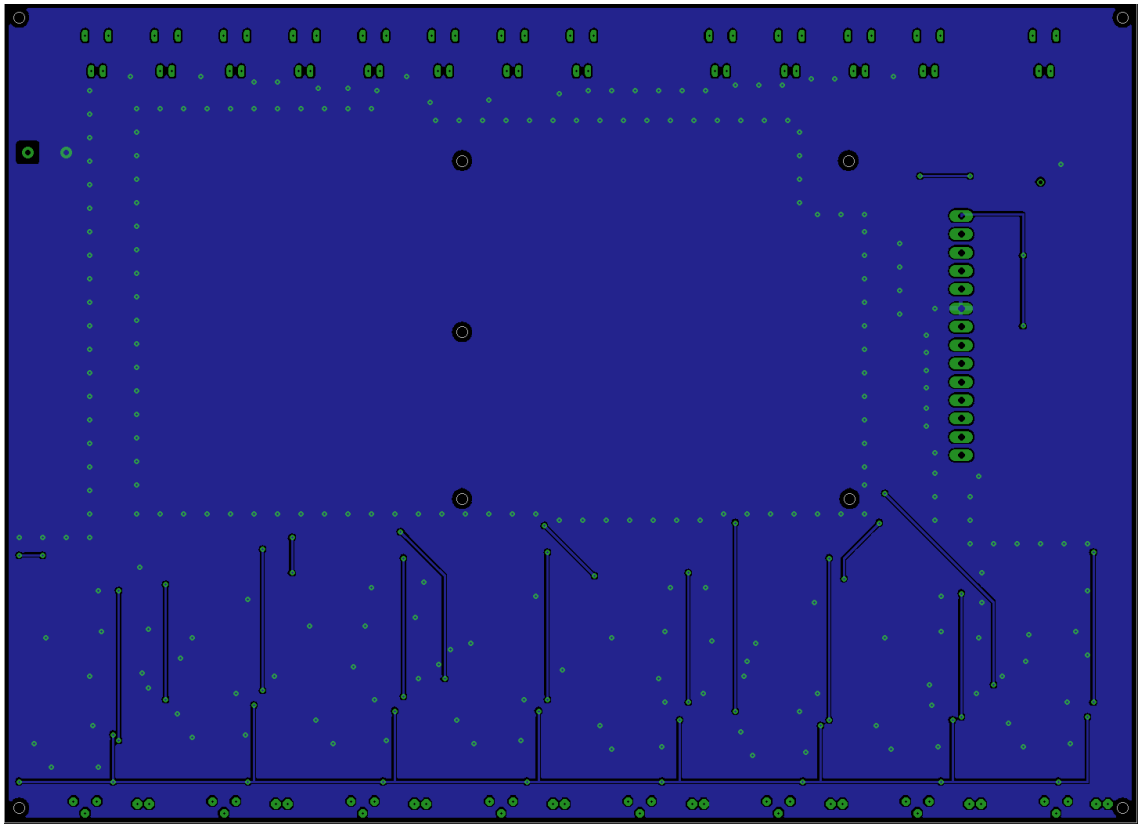


Příloha 3 – Finální Layout DPS z obou stran

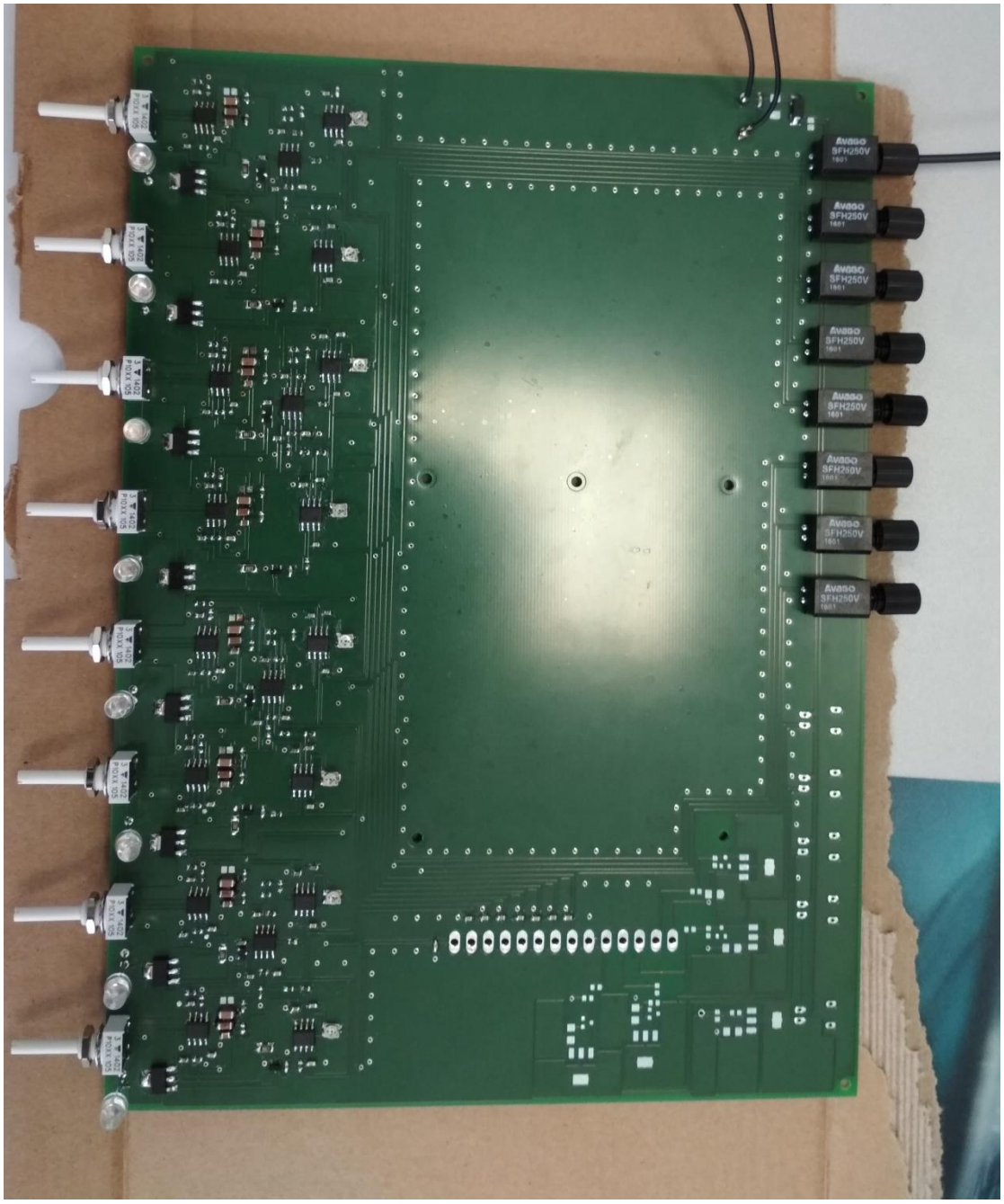
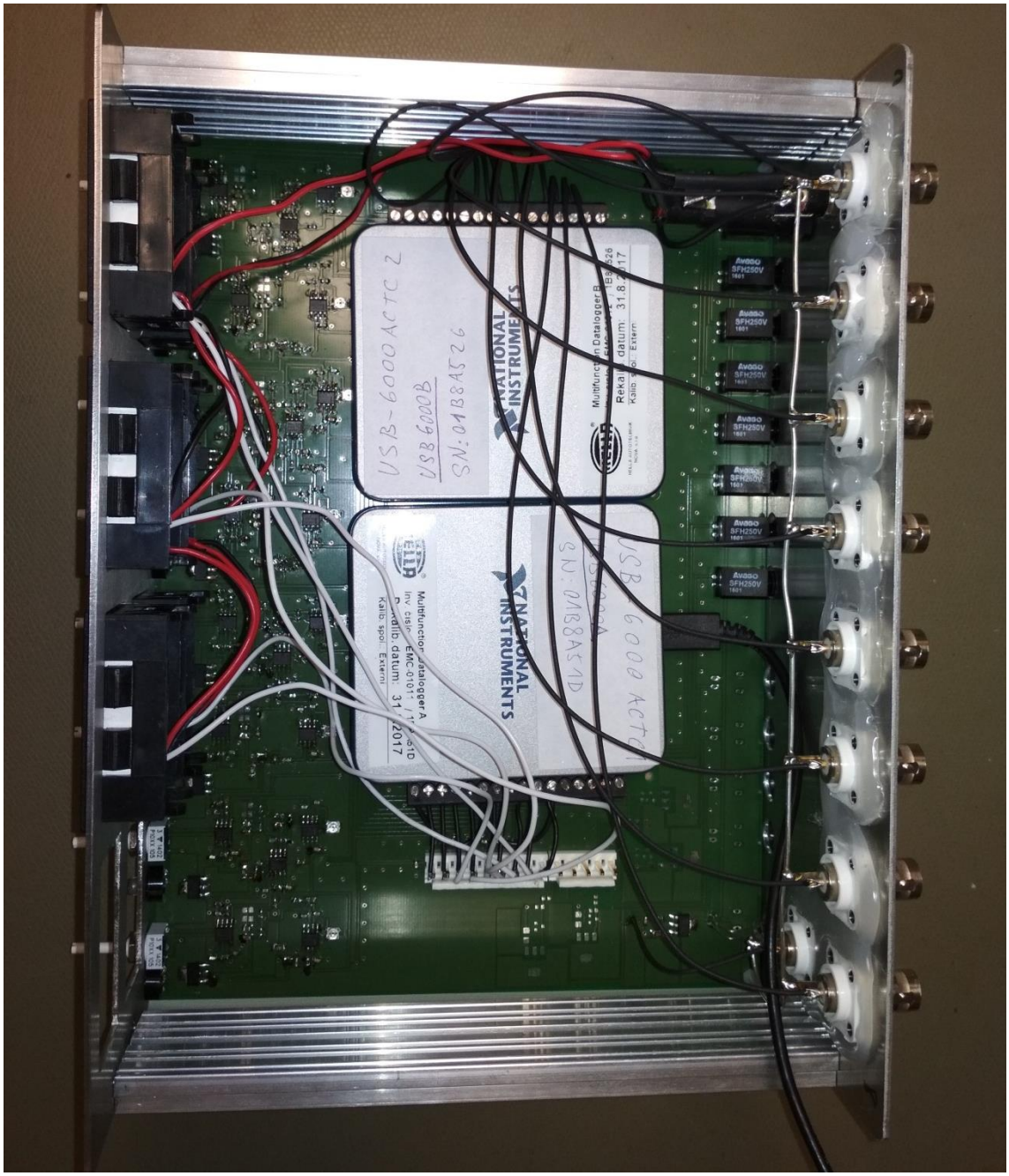
Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM



Příloha 4 - Osazená DPS



Příloha 5 – Vnitřní zapojení převodníku