

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Fotosnímač s nízkým rozlišením**





## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na seznámení se základy snímací techniky a optiky. Tyto principy jsou dále použity k návrhu jednoduchého snímacího zařízení s nízkým rozlišením a na zobrazovací stranu. Oba návrhy jsou poté realizovány.

## **Klíčová slova**

Fotodioda, Fotocitlivá matice, Fotosnímač, Zobrazovač

**Abstract**

The bachelor's theses is focused on explanation of basics of photodetection technology and optics. These principles are used in proposal of simple low resolution photodetection device and display side of the device. Both proposals are realized afterwards.

**Key words**

Photodiode, Photosensitive matrix, Photosensor, Display

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

David Antal

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Fiřtovi, Ph.D. a Ing. Michalovi Kubíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Žahourovi za celkový dohled nad praktickou částí práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 FOTOSNÍMAČE</b> .....	<b>11</b>
1.1 FOTOLEKTRICKÝ JEV .....	11
1.2 HISTORIE FOTOSNÍMAČŮ .....	11
1.3 DRUHY DNEŠNÍCH FOTOSNÍMAČŮ .....	13
<b>2 OPTIKA</b> .....	<b>16</b>
2.1 VZNIK OBRAZU.....	16
2.2 SYSTÉMY OPTIKY .....	17
2.3 DÍRKOVÁ KOMORA.....	17
2.4 OBJEKTIV .....	18
<b>3 NÁVRH FOTOSNÍMAČE</b> .....	<b>20</b>
3.1 FOTODIODY .....	20
3.2 TRANZISTORY .....	24
3.3 OPERAČNÍ ZESILOVAČE .....	25
3.4 MIKROPROCESOR .....	26
3.5 KONEKTORY.....	27
3.6 NAPÁJENÍ A ROZHRANÍ MEZI USB A UART .....	27
3.7 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	28
<b>4 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU</b> .....	<b>29</b>
4.1 MULTIPLEX SIGNÁLU .....	29
4.2 ALGORITMUS ZPRACOVÁNÍ .....	30
<b>5 NÁVRH ZOBRAZOVAČE</b> .....	<b>31</b>
5.1 LED DIODY .....	31
5.2 VÝSTUPNÍ SPÍNACÍ TRANZISTORY.....	32
5.3 DPS ZOBRAZOVAČ .....	33
<b>6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI</b> .....	<b>34</b>
6.1 MĚŘENÍ SNÍMÁNÍ.....	34
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>36</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>37</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
PŘÍLOHA A - SCHÉMA FOTOSNÍMAČE .....	1
PŘÍLOHA B - HORNÍ STRANA DESKY FOTOSNÍMAČE.....	2
PŘÍLOHA C - SPODNÍ STRANA DESKY FOTOSNÍMAČE .....	3
PŘÍLOHA D - DESKA ZOBRAZOVAČE .....	4



## Úvod

Tato bakalářská práce má za cíl navrhnout a realizovat snímací zařízení, které by bylo vhodnou pedagogickou pomůckou, na kterém by bylo možné ukázat jednotlivé principy snímací techniky. Také zde navrhnu zobrazovací stranu, aby bylo možné funkčnost demonstrovat. Fotosnímačů obecně je již velká řada, ale pro jejich minimální rozměry je nepraktické cokoliv na nich vysvětlovat nebo předvádět. Praktické výukové zařízení neexistuje.

Práci jsem rozdělil na 6 částí, v úvodu se budu zabývat základními principy z oblasti optiky a snímací techniky, následně uvedu vlastní návrh fotosnímače, zdůvodnění zvolených snímacích prvků, řešení hardwarové i softwarové části a v poslední části se budu věnovat zobrazovací straně zařízení a nakonec i výsledné funkčnosti celého projektu.

## Seznam symbolů a zkratek

<i>A/D</i> .....	Analogově - digitální (převodník)
<i>BSI(CMOS)</i> .....	CMOS snímač se zpětným osvětlením
<i>C</i> .....	Kondenzátor
<i>D</i> .....	Průměr plně otevřené clony
<i>DNI</i> .....	Součástka nebude osazena
<i>f</i> .....	Ohnisková vzdálenost
<i>I</i> .....	Proud
<i>LED</i> .....	Dioda emitující světlo
<i>OZ</i> .....	Operační zesilovač
<i>PWM</i> .....	Pulzně šířková modulace
<i>R</i> .....	Odpor
<i>SMD</i> .....	Součástka pro povrchovou montáž plošných spojů
<i>THT</i> .....	Součástka s drátovými vývody
<i>U</i> .....	Napětí
<i>VA(charka)</i> .....	Volt-Ampérová (charakteristika)

# 1 Fotosnímače

Fotosnímač je součástka nebo obvod, který je citlivý na viditelné, infračervené nebo ultrafialové světlo. Ve většině případů se jedná o klasické fotodiody a fototranzistory, které se od klasických diod a tranzistorů liší tím, že mají vytvořený průhled na přechod mezi polovodičovými materiály. Díky tomu dokážou ovlivnit jejich vlastnosti v závislosti na velikosti osvětlení daného fotodetektoru. Tohoto chování je docíleno fotoelektrickým jevem.

## 1.1 Fotoelektrický jev

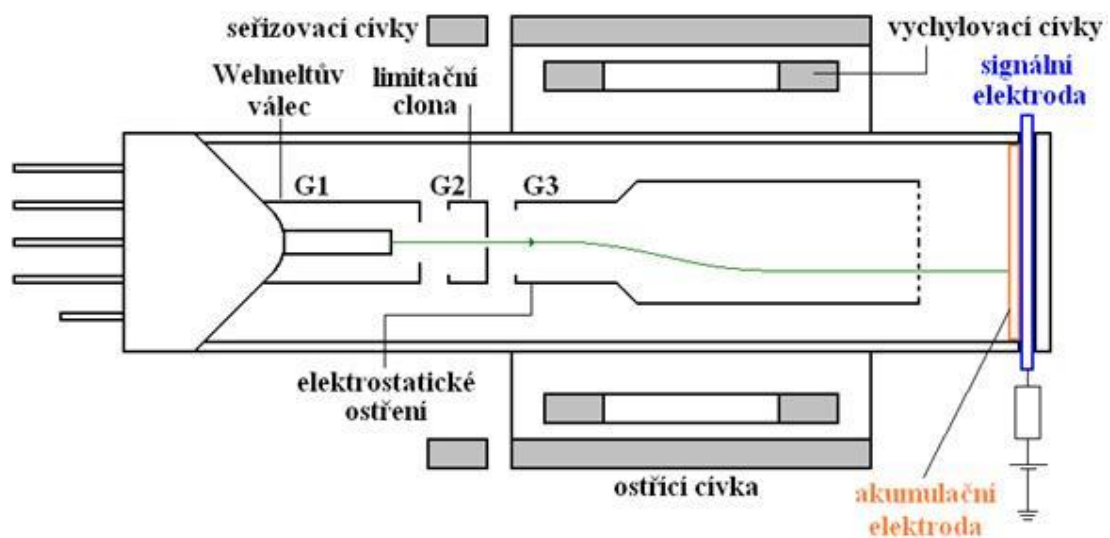
Nastává po dopadu elektromagnetického záření, například viditelného světla, na povrch látky (polovodiče, kovu). V důsledku absorpce tohoto záření jsou z látek uvolňovány elektrony, které pak mohou přenášet elektrický proud. Z hlediska způsobu, jakým elektron vzniká se rozděluje fotoelektrický jev na vnější fotoefekt – elektron je uvolněn z povrchu materiálu do okolí a na fotoefekt vnitřní – elektron zůstává v látce jako vodivostní elektron. Toho je využíváno u polovodičových prvků a u moderních snímacích prvků typu CCD a CMOS.

## 1.2 Historie fotosnímačů

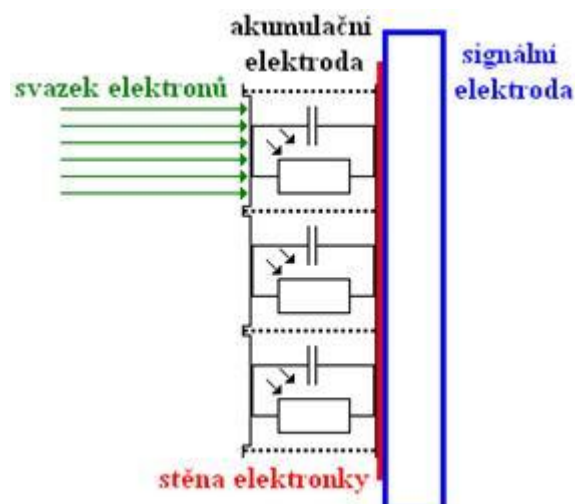
Počátek snímací techniky byl založen na elektronkách, které mají vhodně upravené elektrody. První snímací elektronka nesla název ikonoskop. Pracovala na principu fotoemise elektronů. Tato elektronka měla malou citlivost, takže bylo nutné snímanou scénu velmi osvětlit. Po ikonoskopu následovala elektronka jménem ortikon, která byla již citlivější. Ortikon díky nestabilnímu provozu nebyl moc rozšířen. Větší úspěch měl superikonoskop, který se používal v 50 letech 20. století v televizní technice. Jednalo se o ikonoskop s přidaným elektronovým zesilovačem obrazu. Později se objevil superortikon. Tato elektronka byla velmi citlivá oproti svým předchůdcům a používala se i při nižším osvětlení. Superortikon byl používán během černobílého vysílání.

### 1.2.1 Vidikon

Jedná se o snímací obrazovou elektronku, která funguje na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Díky dopadajícímu světlu se mění odpor bodů fotovrstvy. Po příchodu elektronového paprsku se mění proud v obvodu akumuláční elektrody (Obr. 2), na němž se přes kondenzátor snímají obrazové signály. K zesílení slouží rozkladová elektroda. Rozkladová elektroda se skládá ze signální elektrody a akumuláční elektrody, obě elektrody jsou na obrázku číslo 1 a 2 vyznačeny barevně. Klasický vidikon má rozkladovou elektrodu vyrobenou ze sulfidu antimonitého, díky čemuž má i velikou setrvačnost. Vysoká setrvačnost se projeví například jako "stopy" v obrazu při pohybu světlých detailů obrazu.[4]



Obr. 1 Elektronka typu Vidikon s magnetickým vychylováním a magnetickým ostřením[3]



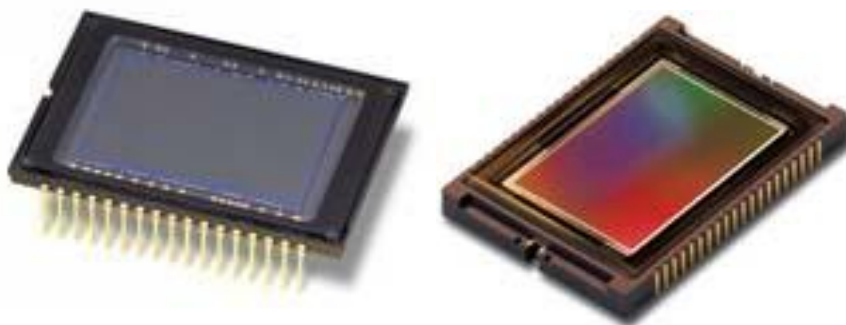
Obr. 2 Bližší pohled na elektrody Vidikonu [3]

### 1.2.2 Plumbikon a jiné verze vidikonu

Firma Philips přišla s lepším řešením na principu Vidikonu, nazvala jej Plumbikon. Tato elektronka se liší materiálem, z kterého je vyrobena akumulární elektroda. Oproti vidikonu je zde použit oxid olovnatý. Také jsou zde použity fotodiody, zapojené v závěrném směru. Tyto fotodiody nahrazují fotorezistory, které najdeme u vidikonu na Obr. 2. Je zde ještě celá řada dalších elektronek, které vycházejí z vidikonu. Vylepšují jejich vlastnosti, jako například možnost snímat infračervené záření nebo mají například mnohem vyšší citlivost. Heslovitě to byl Kvartikon, Saticon, Newvicon a další. Tyto elektronky nahradil až dnes již hojně používaný CCD.[4]

### 1.3 Druhy dnešních fotosnímačů

V dnešní době jsou hlavními druhy fotosnímačů typy CCD, CMOS a jejich modifikace (Foveon, BSI CMOS atd.).



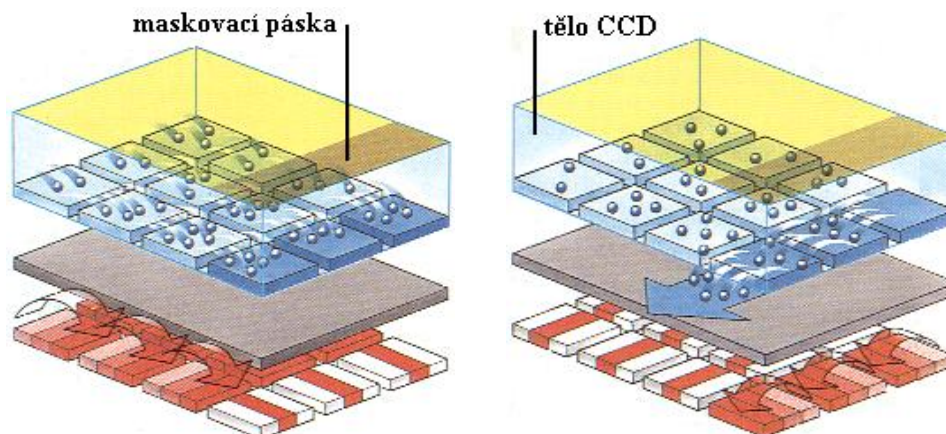
Obr.3 Levý snímač typu CCD, napravo je ukázka typu CMOS [6]

#### 1.3.1 CCD senzory

CCD neboli zařízení s vázanými náboji, je druh senzoru, který pracuje na principu vnitřního fotoefektu. CCD mají elektrodu izolovanou od polovodiče. K izolaci se používá tenká vrstva oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Díky izolaci se elektrony vzniklé při fotoefektu nedostanou pryč. Takto vzniklý náboj je posouván sloupcově pro další zpracování. Je zde velmi omezený počet výstupních vodičů, často dokonce pouze jeden. Výstup CCD senzorů je analogový, takže je nutno jej poté digitalizovat.[5, 7]

### 1.3.2 Struktura CCD senzoru

Senzor CCD se skládá ze 3 hlavních částí: fotocitlivá část, která je tvořena polem fotocitlivých buněk, neboli pixelů. Toto pole snímá dopadající elektromagnetické záření. Čtecí část se stará o přenos vytvořeného elektrického náboje z fotocitlivé části do části pro zpracování. Část pro zpracování se skládá z obvodů, které převádí náboj na veličinu, s kterou budeme pracovat (například napětí). Signál poté převedeme pomocí analogově-digitálního převodníku, čímž dostaneme informaci ze senzoru do digitální podoby.[1]



Obr. 4 Základní struktura a princip posuvu náboje u CCD struktury [22]

No obrázku 4 je znázorněna struktura CCD senzoru. Modrá vrstva představuje vrstvu oxidu křemičitého. Šedá vrstva znázorňuje izolaci. Červená vrstva poukazuje na jeden z možných principů zpracování náboje, konkrétně posun náboje ve sloupci a následný posun řády k výstupnímu vodiči.

### 1.3.3 CMOS senzory

CMOS senzory také využívají vnitřní fotoelektrický jev. Rozdíl oproti CCD sensorům je, že každý pixel má vlastní tranzistor, který přímo zesiluje získaný elektrický náboj. Každá obrazová buňka se vyhodnotí samostatně, protože má potřebné obvody přímo u sebe. Zajišťuje také převod náboje na číslo. Díky tomu jsou CMOS rychlejší a z energetického hlediska úspornější. Oproti CCD jsou zde miliony vývodů, pro každou buňku zvlášť, což se uplatní například při sekvenčním snímání. Sekvenční snímání je pořizování mnoha snímků s minimální časovou prodlevou. [5, 6]

### 1.3.4 Struktura CMOS senzoru

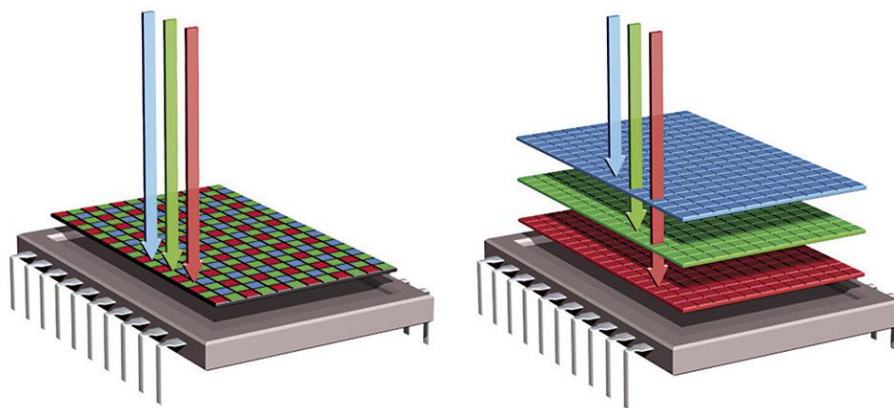
Senzory CMOS se skládají z fotocitlivé oblasti, která je tvořena stejně jako u CCD maticí fotocitlivých bodů, a z oblasti transportní. Transportní oblast tvoří obvody přepravující elektrickou veličinu. Tato veličina je úměrná dopadajícímu elektromagnetickému záření. Následuje zpracování již digitálního signálu.

### 1.3.5 Porovnání CMOS a CCD

CMOS senzory jsou levnější a nejsou tak náročné na výrobu. Jsou dnes nejrozšířenějším druhem snímacích čipů v digitálních fotoaparátech, ačkoliv původně převládaly CCD snímače. Je to proto, že hodně vad se již dokázalo opravit různými modifikacemi, jakými jsou například BSI CMOS (back-side illumination). Obecně lze považovat CMOS senzory za lepší volbu v mnoha ohledech. Jsou ale jisté aplikace, kde se CCD senzory ukázaly být lepší volbou než CMOS. Jedním z příkladů jsou senzory, které jsou navrženy na citlivost v oblasti infračerveného záření. [7]

### 1.3.6 CMOS Foveon X3

Tento snímač využívá technologie CMOS, jméno Foveon je po firmě, která snímač vyvinula. Podstatné u něj je to, že oproti CCD nebo CMOS snímačům dokáže zaznamenat kompletní barevnou informaci pro každý pixel. Založen je na tom, že každá vlnová délka proniká do různé hloubky křemíkové vrstvy. Proto je tento čip složen ze tří vrstev pixelů, umístěných pod sebou. Každá vrstva zachycuje danou barvu. Algoritmus následně zpracuje informace ze všech 3 vrstev a vytvoří tak kompletní informaci o barvě daného pixelu. [6, 8]

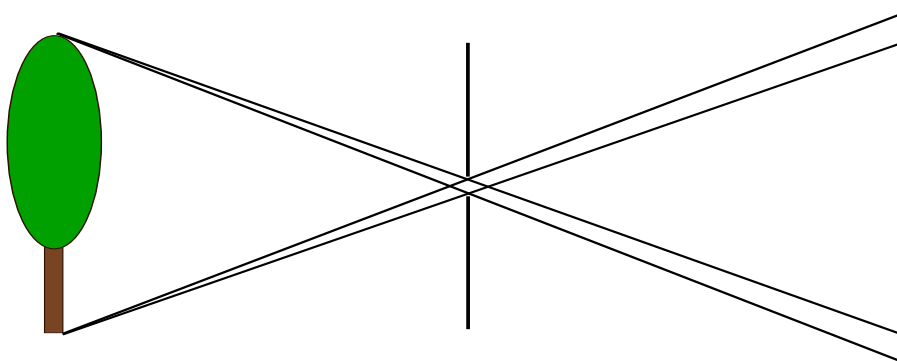


Obr. 5 Ukázka principu barevného snímání (Technologie Foveon je vpravo)[9]

## 2 Optika

### 2.1 Vznik obrazu

Základem vzniku obrazu je světlo, ať už přímo vytvořené nebo odražené od předmětů, dopadající na jakékoliv záznamové zařízení, jako je film, fotosnímač, nebo i třeba pouhé stínítko. Je důležité si uvědomit, že světlo dopadá na plochu ze všech směrů. Pokud chceme zaznamenat určitý pohled, je potřeba ostatní zdroje světla zastínit. K tomu lze použít jakýkoliv neprůsvitný materiál. U fotoaparátů se o tuto funkci stará clona, která je na rozdíl od obyčejného průzoru nastavitelná. Obrázek č. 7 poukazuje na vliv velikosti průzoru. Pokud by byl otvor pro světlo příliš široký, tak by mohl být předmět neostrý, protože by prošly 2 různé obrazy téhož předmětu.[10]



Obr. 7 Vznik neostrosti na stínítku

#### 2.1.1 Zdroje světla

Zdroje světla lze rozdělit do 2 kategorií – primární zdroje, což jsou zdroje, které světlo přímo produkují. Takovým zdrojem je například žárovka, LED dioda nebo slunce. Druhou kategorií jsou sekundární zdroje – tyto zdroje světla pouze odrážejí primární zdroje, jsou to běžné věci všude kolem nás, které samy nesvítilí.

#### 2.1.2 Vlnová délka světla

Vlnová délka určuje, jak se nám předmět bude jevit z hlediska barvy. Lidské oko je schopno vnímat právě barvy v rozsahu 380 – 740 nm. Nejcitlivější je lidské oko na 555nm, což odpovídá žlutozelené barvě.



Tab. 1 Rozdělení vnímaných barev podle vlnové délky

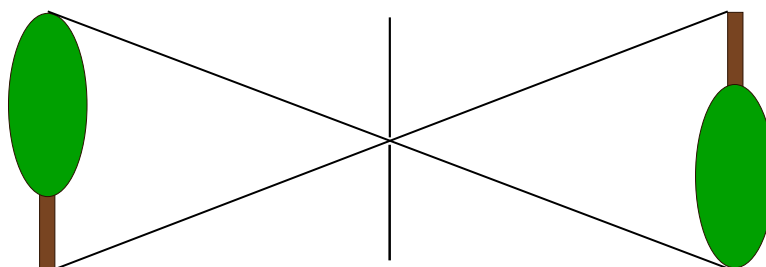
Barva	Vlnová délka [nm]	Frekvence
červená	625-740	480-405
oranžová	590-625	510-480
žlutá	565-590	530-510
zelená	520-565	580-530
azurová	500-520	600-580
modrá	430-500	700-600
fialová	380-430	790-700

## 2.2 Systémy optiky

Mezi základní systémy optiky lze určitě zařadit dírkovou komoru. V dnešní době je pro focení s vysokou kvalitou nevhodná, ale hrála velkou roli v počátcích fotografie a stále s ní lze vyfotit nečekaně kvalitní fotografii. Pro kvalitnější fotografie existuje celá řada objektivů s obecným použitím nebo i velmi specifické objektivy typu "rybí oko".

## 2.3 Dírková komora

Jedná se o jednoduché optické zařízení. Využívá se uzavřeného prostoru ve tmě, a malého otvoru v jedné stěně, skrz kterou může projít světlo a vytvořit obraz na stěně protější. Tento obraz můžeme zaznamenat například na film, nebo použít snímače obrazu. Takto vzniklý obraz je převrácený. Tohoto principu se využívá právě pro ostrost obrazu.



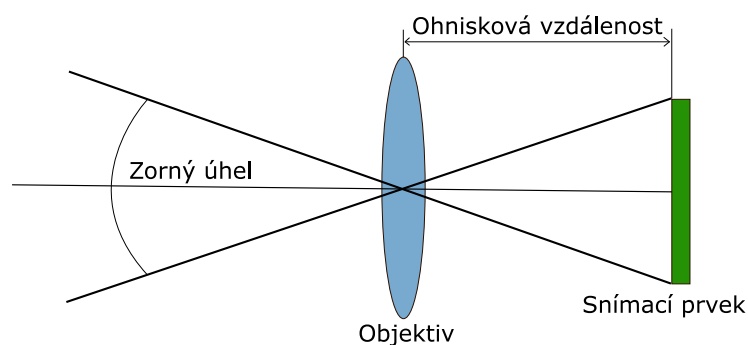
Obr. 8 Otočení obrazu skrz otvor

## 2.4 Objektiv

Objektiv je zařízení, které obsahuje velké množství optických členů. Jeho hlavním úkolem je upravit procházející světlo vhodným způsobem pro následné zaznamenání na fotosenzoru.

### 2.4.1 Ohnisková vzdálenost

Ohnisková vzdálenost přímo určuje, jak velká část plochy před objektivem se zaznamená přes fotosenzor. Ohnisko označuje výřez scény, který zaznamenáme. Objektiv může mít ohniskovou vzdálenost například 18-35mm, což odpovídá snímacímu úhlu  $100^\circ - 62^\circ$ . Lidskému oku odpovídá ohnisková vzdálenost 50mm. Platí, že čím větší je ohnisková vzdálenost, tím je úhel záběru nižší.[2]



Obr. 9 Ukázka, jak ohnisková vzdálenost určuje úhel záběru.

### 2.4.2 Maximální clonové číslo

Jedná se o vlastnost objektivu, která udává maximální přívření clony, aby se omezil průchod světla na fotocitlivý senzor. Toto číslo je důležité pro snímání s dlouhou expozicí v denním světle, kde by bez přívření clony byl obraz přесvícený nebo úplně bílý. Clonové číslo je také potřeba při focení makrofotografie, kde je malá hloubka ostrosti a díky tomu je zde zapotřebí vysoké clonové číslo.[2]

### 2.4.3 Světelnost

Světelnost udává kolik světla daný objektiv propustí na fotosenzor. Tato hodnota je uvedena u každého objektivu. Pokud objektiv disponuje zoomem, tak jsou zde hodnoty

světelnosti – první pro širokoúhlý záběr a druhé pro maximální optické přiblížení. U běžných objektivů se při použití zoomu snižuje průchod světla. Hodnota světelnosti je definována jako poměr ohniskové vzdálenosti, značené  $f$ , a průměr maximálně otevřené clony  $D$ . [2]

$$\text{Světelnost} = \frac{f}{D}$$

Tato hodnota nás zajímá zejména při zhoršených podmínkách, kde je větší světelnost velikou výhodou.

#### 2.4.4 Vady objektivů

Mezi základní vady objektivů patří chromatická aberace, ke které dochází při průchodu světla objektivem, respektive po průchodu čočkou. Vzniká díky různým vlnovým délkám procházejícího světla, protože různé barvy světla se lámou jinak. Na výsledné fotografii lze nalézt barevné přechody, mezi tmavými a světlými místy. Konstrukce objektivu nese ještě jednu vadu, a tou jsou vinětace. Díky válcovému tvaru objektivů se světlo nedostává z větších úhlů na snímací čip a vytváří tak tmavé okraje. Další vadou objektivů je sférické zkreslení. Na fotografiích lze pozorovat prohnuté zdi, vodní plochy a jiné normálně rovné struktury. Vinětace i sférické zkreslení vzniká u širokoúhlých objektivů, a pokud zvolíme ohniskovou vzdálenost větší než 30 mm, tak by měly být tyto jevy zanedbatelné. [2]



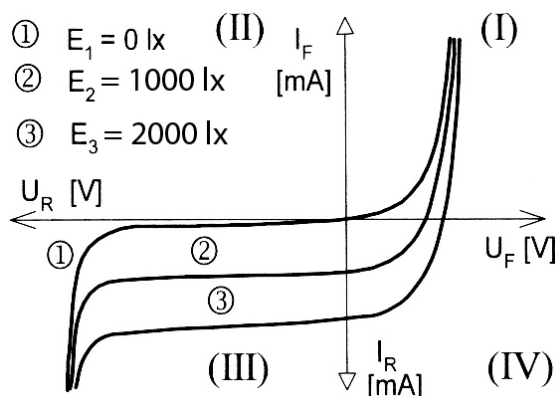
Obr. 10 Zobrazující vliv vinětace na fotografii. [11]

### 3 Návrh fotosnímače

Pro vlastní návrh fotosnímače jsem se snažil vyjít z již známých řešení pro zachycení obrazu. Použity jsou klasické fotodiody, u kterých jsem kladl důraz na to, aby byly citlivé na podobné vlnové délky jako lidské oko. Tyto fotodiody jsou zapojené do matice 4x4. Využil jsem tranzistorů jako spínačů, pro možnost vyčítat jednotlivé řádky matice. Vzniklý proud z fotodiody je veden přes operační zesilovač, který zastává funkci převodu proudu na napětí. Toto napětí přivádím na A/D převodník. Pro celkovou praktičnost a říditelnost celého zařízení jsem zvolil cestu převodu na digitální signál a zpracování obrazového signálu za pomoci mikropočítače.

#### 3.1 Fotodiody

Fotodiody je polovodičová součástka, která pracuje na základě vnitřního fotoelektrického jevu. Pokud chceme fotodiodu použít jako zdroj elektrické energie, tak musíme využít IV. kvadrant VA charakteristiky. Ve III. kvadrantu se chová jako rezistor, který mění odpor v závislosti na světle.[11]



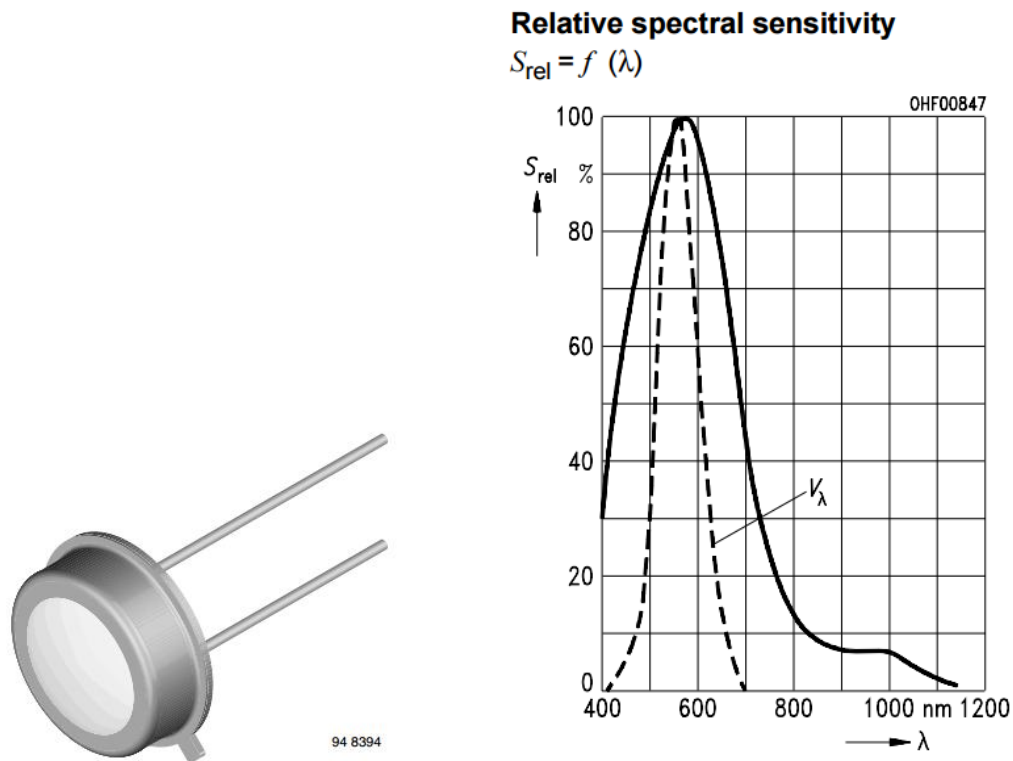
Obr. 11 VA charakteristika Fotodiody[12]

##### 3.1.1 Výběr snímacích součástek

Při výběru vhodného snímacího prvku jsem bral v potaz hlavně spektrální citlivost. Velikou roli hraje i praktičnost zapojení, takže jsem volil SMD součástky. V neposlední řadě bylo potřeba zohlednit i cenu těchto prvků, která se ve větším počtu může vyšplhat nezanedbatelně vysoko. Pro demonstraci základních principů je plně dostačující zvolit levnější variantu při zohlednění podstatnějších parametrů. Z veliké škály, kterou dodavatelé fotodiody nabízejí, jsem vybral 3 zástupce těchto fotodiody.

### 3.1.2 BPW21R

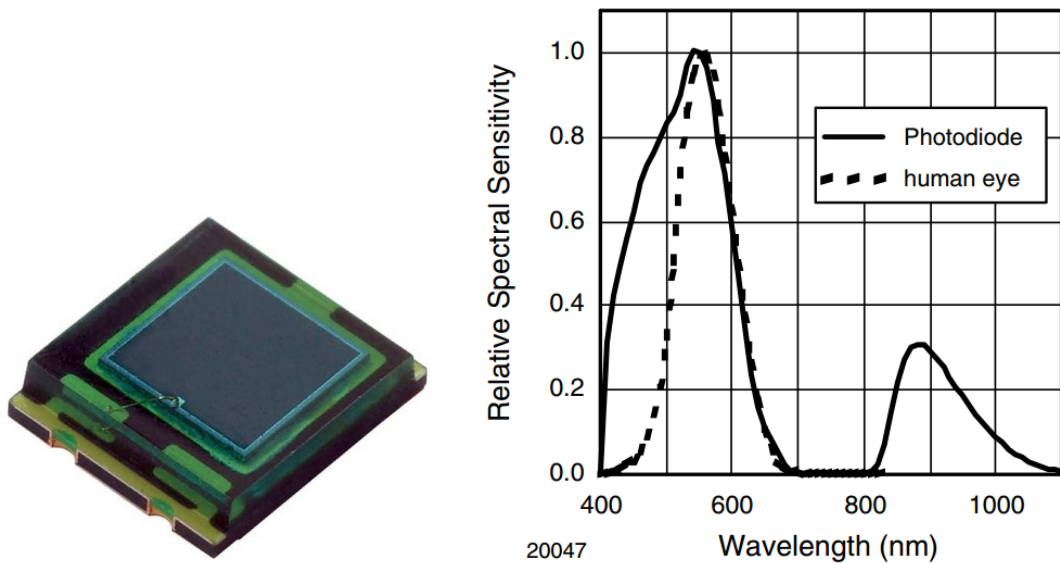
BPW21R je silikonová PN fotodioda v hermeticky uzavřeném pouzdře typu TO-5, speciálně navrženém pro velmi přesné lineární aplikace. Součástka je vybavena vestavěným korekčním filtrem, který upravuje spektrální charakteristiku na takovou, jakou má i lidské oko. [13]



Obr. 12 Vlevo je ukázka fotodiody BPW21R, napravo je její spektrální charakteristika.[13]

### 3.1.3 TEMD5510FX01

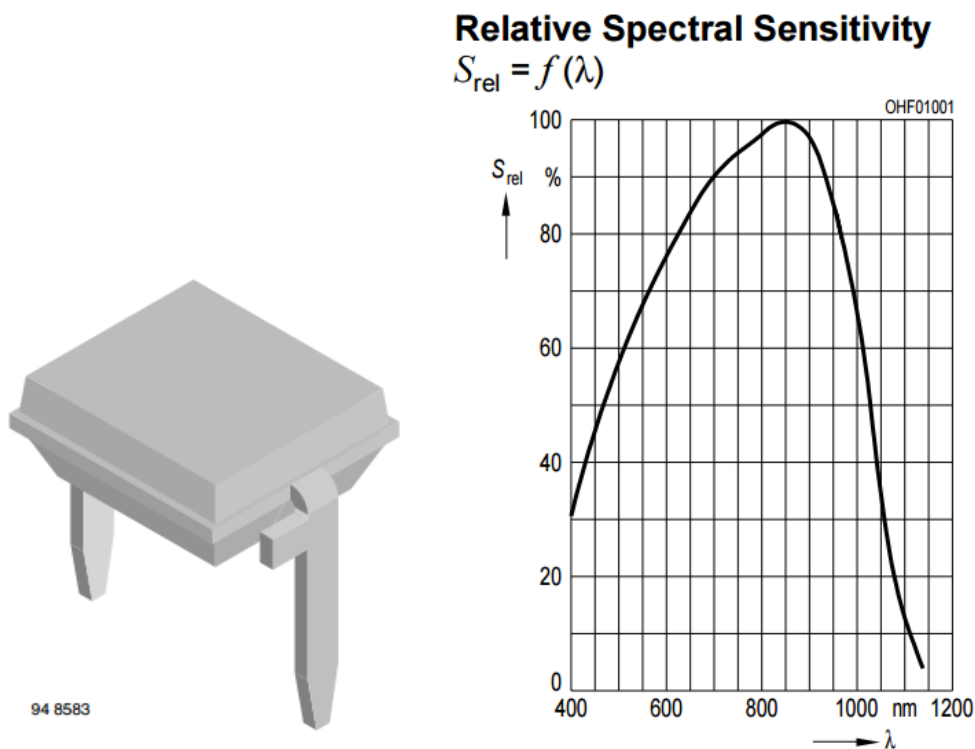
Senzor okolního světla TEMD5510FX01 má vysokou fotocitlivost v miniaturním SMD provedení. Detekční čip má citlivou plochu o velikosti  $7,5\text{mm}^2$ . Má velmi podobnou citlivost jako lidské oko se špičkou citlivosti na 540nm. [14]



Obr. 13 Vlevo je ukázka fotodiody TEMD5510FX01, napravo je její spektrální charakteristika.[14]

### 3.1.4 BPW34

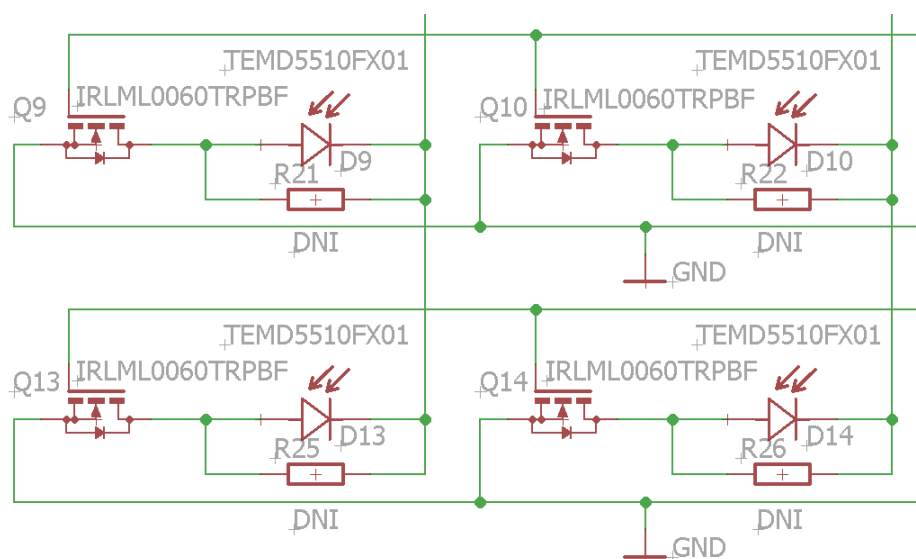
BPW34 je PIN vysokorychlostní dioda, která je vysoce citlivá na viditelné a blízké infračervené záření. Tato dioda nemá filtr. Doporučené využití je jako vysokorychlostní fotodetektor.[15]



Obr. 14 Tvar fotodiody BPW34 a napravo je její spektrální charakteristika.[15]

### 3.1.5 Zvolená fotodioda

Ve svém návrhu jsem zvolil fotodiodu TEMD5510FX01. Fotodiody BPW21R a TEMD5510FX01 si byly velice podobné z hlediska spektrální citlivosti, protože obě fotodiody jsou navrženy pro použití jako senzory viditelného světla. Vzhledem k tomu, že jsem se celý obvod snažil udržet v SMD provedení, tak byla vhodnější TEMD5510FX01. Podstatným rozdílem byla i cena, zatímco TEMD5510FX01 je k sehnání za 73,71 Kč za kus při množství 1- 99ks, tak fotodioda BPW21R je při odběru 10-24ks za cenu 260,61 Kč za kus. Ve svém návrhu používám 4x4 matici, takže výsledný rozdíl v ceně jen za fotodiody činí 2 990kč. Fotodioda BPW34 byla cenově nejpřijatelnější - cena 20,73 Kč za kus při odběru 10-24ks. Nebyla ale ideální pro demonstraci funkčnosti mého snímače, vzhledem k tomu, že měla špičkovou senzitivitu na 900nm. Zaznamenávala by tak i záření, které lidské oko neregistruje a výsledná prezentace na LED matici by mohla být matoucí.



Obr. 15 Vlastní fotodiodová matice z programu Eagle ( výřez 2x2 ze schématu )

Ve schématu lze vidět kromě fotodiód TEMD5510FX01 i rezistory připojené paralelně ke každé fotodiodě - tyto rezistory nemají význam pro funkci. Na výsledné desce nebudou osazeny, proto mají hodnotu DNI. Jejich plošky budou využity pro testování funkčnosti fotodiód. Ve výřezu lze vidět i tranzistory které popíši v další kapitole.

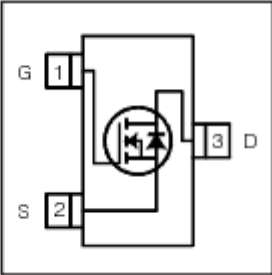
### 3.2 Tranzistory


Tranzistor je aktivní nelineární polovodičová součástka tvořená dvojicí PN přechodů. Jejich využití je rozsáhlé, například jako zesilovače, spínače nebo invertory. Tranzistory jsou součástí většiny integrovaných obvodů, najdeme je například u pamětí a procesorů. Tranzistorů je velké množství, základní rozdělení je na tranzistory bipolární a unipolární. Rozdíl je hlavně v řízení. Bipolární řídíme proudem do báze, kdežto unipolární je řízen přiloženým napětím na řídicí elektrodě. Tuto elektrodu nazýváme gate, což je obdoba báze. Unipolární tranzistory se dále dělí například na JFET, MOSFET s indukovaným kanálem, MOSFET s vodivým kanálem apod. Liší se zásadním způsobem například v přenosových charakteristikách. [1][3]

V mém návrhu používám tranzistory ke spínání jednotlivých fotodiod v návrhu fotosnímače, toto zapojení lze vidět na obr. 3.4. Takto zapojené tranzistory mi umožňují aktivovat pouze jednu řadu fotodiod a zpracovávat informace pouze z těchto fotodiod. Pokud by tam nebyly, tak by se na každý OZ dostal výsledný signál z celé řady fotodiodové matice. Nebylo by tedy možné konkrétní body reprodukovat. K řízení tranzistorů jsou použity 4 výstupy z mikroprocesoru, konkrétně z portu B.

K těmto účelům jsem vybral tranzistory IRLML0060TRPbF, jejich předností je velmi nízký  $R_{DS(on)}$ .  $R_{DS(on)}$  je odpor mezi Drain a Source v sepnutém stavu. Tento parametr je podstatný pro mé účely, protože zanáší nepřesnosti do výsledného měření. Čím vyšší by tento odpor byl, tím méně přesnou informaci bych získal z fotodiody.

$V_{DS}$	60	V
$V_{GS Max}$	$\pm 16$	V
$R_{DS(on) max}$ (@ $V_{GS} = 10V$ )	92	m $\Omega$
$R_{DS(on) max}$ (@ $V_{GS} = 4.5V$ )	116	m $\Omega$





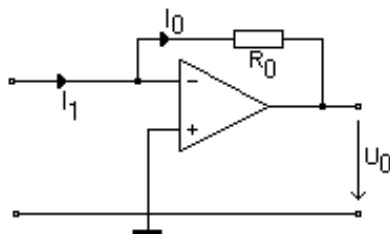
Micro3™ (SOT-23)  
IRLML0060TRPbF

Obr. 16 Parametry tranzistoru IRLML0060TRPbF, ukázka vnitřního zapojení a obalu [16]



### 3.3 Operační zesilovače

Operační zesilovače mají širokou škálu použití. Jak název napovídá, lze díky nim realizovat různé matematické operace. V obvodu je zahrnutý ze dvou důvodů. Prvním je zesílení sejmutého signálu na fotodiodě. Druhým je převod proudu na napětí, které potřebujeme pro A/D převodník.[1]

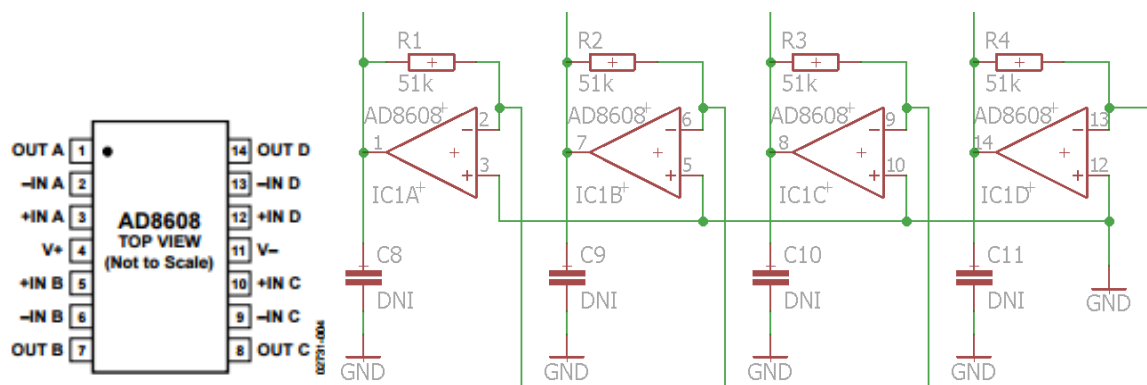


Obr. 17 Převodník proudu na napětí s OZ[17]

$$U_0 = R_0 \cdot I_1$$

Pokud uvažujeme ideální vlastnosti OZ ( $U_- = U_+ = 0$ ), pak lze vypočítat výstupní napětí jako vstupní proud  $I_1$  protékající námi zvoleným odporem  $R_0$ . Tento odpor bude sloužit jako zesilovací konstanta při převodu. [17]

Z velkého výběru operačních zesilovačů jsem zvolil typ AD8608. Jedná se o 4 zesilovače v jednom pouzdře. Jsou napájeny jediným zdrojem o napětí od 2,7 do 5,5V. Mají nízký offset napětí, maximálně  $65 \mu\text{V}$ , nízký šum a vstupní klidový proud maximálně  $1\text{pA}$ . Doporučené použití těchto operačních zesilovačů je zesílení fotodiod, pro senzory, scannery čárových kódů nebo třeba v audio aplikacích. Tento typ OZ má například verzi AD8606, která se liší jen počtem zesilovačů v pouzdře, zde jsou jen 2. Zvolil jsem matici 4x4, takže AD8608 byla ideální volba.



Obr. 18 Součástka AD8608 obsahující 4 OZ[18] a ukázka zapojení AD8608 v mém schématu.

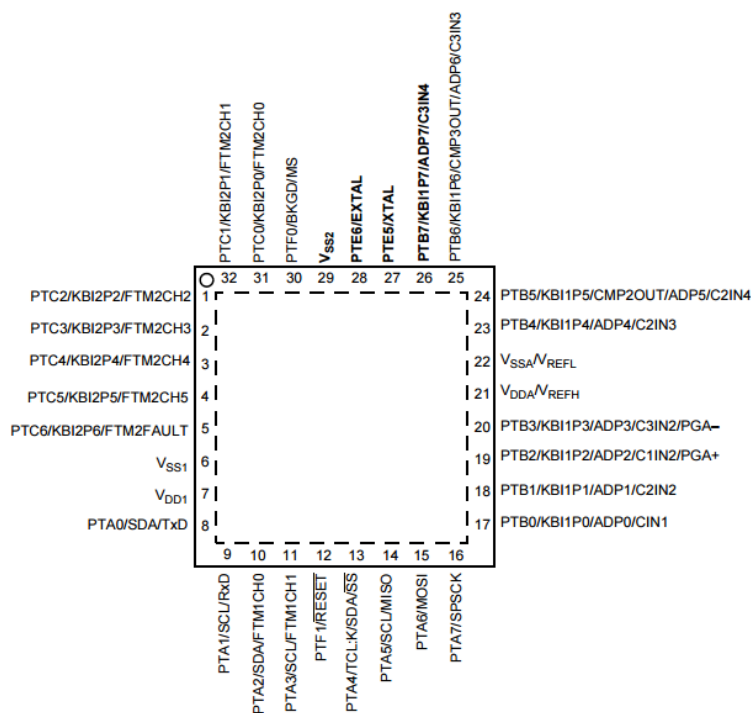
### 3.4 Mikroprocesor

Na mikroprocesor nebyly kladeny vysoké nároky. Počet ovládaných vstupů a výstupů pro funkci obou matic je 16. Velmi podstatná pro mě byla možnost programování v CodeWarrior, s kterým jsme pracovali v rámci výuky předmětu MPP.

Požadavky na mikroprocesor

- 8 výstupů pro řízení LED matice
- 4 A/D vstupy
- 4 výstupy na přepínání vyčítaných řádků
- Napájení 5V
- Programování přes CodeWarrior
- Dostupnost

Zvolen byl mikroprocesor MC9S08MP16 od firmy Freescale, který disponuje 32 piny. 4 piny pro A/D převod a také nabízí více než 12 výstupů pro řízení obou matic. Možnosti využití jednotlivých pinů mikroprocesoru jsou na obrázku 3.8. Lze ho napájet napětím -0,3 až 5,8 V. Vzhledem k původu procesoru lze použít CodeWarrior k vlastnímu programování. Také jsem využil možnost připojit externí oscilátor, který běží s frekvencí 8MHz.



Obr. 19 Funkce pinů mikroprocesoru [20]

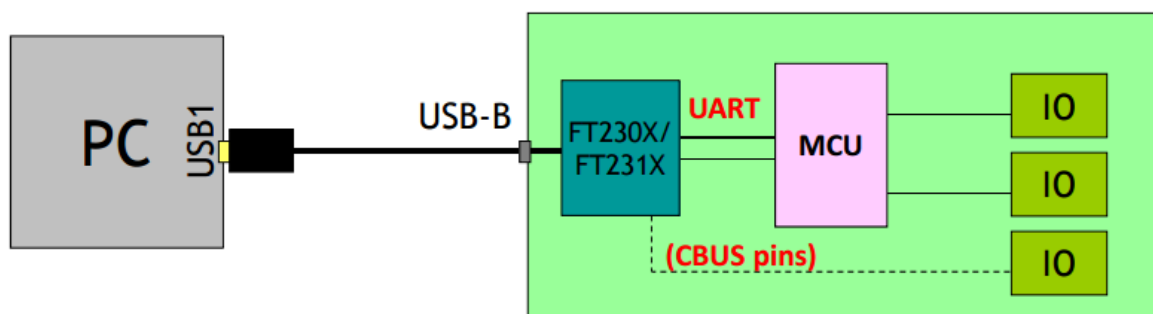
### 3.5 Konektory

Deska fotosnímače a zobrazovače je propojena klasickým 10-ti pinovým konektorem, pin 1 představuje 5V a pin 10 zem. Ovládání obou desek zařizuje jeden mikroprocesor na desce fotosnímače. Druhý konektor na desce fotosnímače má 6 pinů a slouží jako konektor k programátoru procesoru.

### 3.6 Napájení a rozhraní mezi USB a UART

Napájení pro desku bylo zvoleno 5V. Toto napětí dostaneme z USB konektoru na desce fotosnímače. USB konektor poskytuje 4 piny – 5V, zem a 2x signál.

Deska také obsahuje obvod FT230xs. Tento obvod funguje jako interface mezi USB a basic UART komunikací, která se hodí pro mnou zvolený mikroprocesor a dále rozšiřuje jeho možnosti. FT230xs pracuje mezi 2,97 – 5,5 V, disponuje 16 piny a je v balení typu SSOP.



Obr. 20 Demonstrace umístění a funkce FT230XS [21]

### 3.7 Návrh desky plošných spojů

K návrhu obou desek byla použita Light verze návrhového programu Eagle, která je volně dostupná na [19]. Tato verze je omezena pouze celkovým počtem součástek na desce a jejími rozměry. Pro návrh zařízení o mém počtu součástek i velikosti naprosto dostačuje. Rozsáhlé schéma i desku plošných spojů naleznete v příloze – Schéma příloha A. Deska plošných spojů - příloha B a C.

Následující popis odpovídá příloze B a C. Deska je navrhnutá jako oboustranná z důvodu hustoty spojů u mikroprocesoru a také z důvodu miniaturizace fotodiodové matice. Tuto matici lze vidět ve spodní části vlevo s paralelně připojenými rezistory, které jsou co nejbližší fotodiodám kvůli ověření funkčnosti a případnému měření. Na stejných místech ze spodní strany jsou spínací tranzistory. V původním návrhu byly na horní straně, ale protože bylo potřeba co nejmenších mezer mezi jednotlivými snímacími prvky, tak jsem je přesunul na spodní stranu. Celá matice tak byla miniaturizována. Součástku AD8608 lze vidět nad fotodiodovou maticí, velmi blízko této součástce jsem umístil blokovací kondenzátor pro vyhlazení napájení. Vzdálenost blokovacích kondenzátorů od napájení součástky hraje podstatnou roli. Aby měl tento kondenzátor účinek, musí být fyzicky co nejbližší dané součástce. Další dva blokovací kondenzátory jsou umístěny ihned u pinů pro napájení mikroprocesoru. Kondenzátory C7,C12 (47pF) C5,C6 (100nF) a rezistory R10,R11(27R) byly zapojeny podle doporučení oficiálního datasheetu k součástce FT230XS. Všechny konektory jsou umístěny z praktických důvodů ke krajům celé desky. Na desce lze také vidět externí oscilátor, který je pod BDM konektorem. Externí oscilátor pracuje na frekvenci 8MHz. Tento oscilátor by měl zajistit spolehlivější hodinový signál oproti vnitřním hodinám mikroprocesoru. V rozích desky jsou umístěné technologické otvory pro uchycení desky, mají průměr 3mm. Rozměry desky jsou 94mm x 70mm.

## 4 Zpracování signálu

Softwarová část návrhu spočívá v realizaci algoritmu, který bude zpracovávat signál z fotodiodové matice po jednotlivých řádcích. Důležitý je A/D převod hodnoty napětí. Na základě této převedené hodnoty bude mikroprocesor určovat, jak intenzivní se nám bude zdát svit odpovídající LED diody v matici.

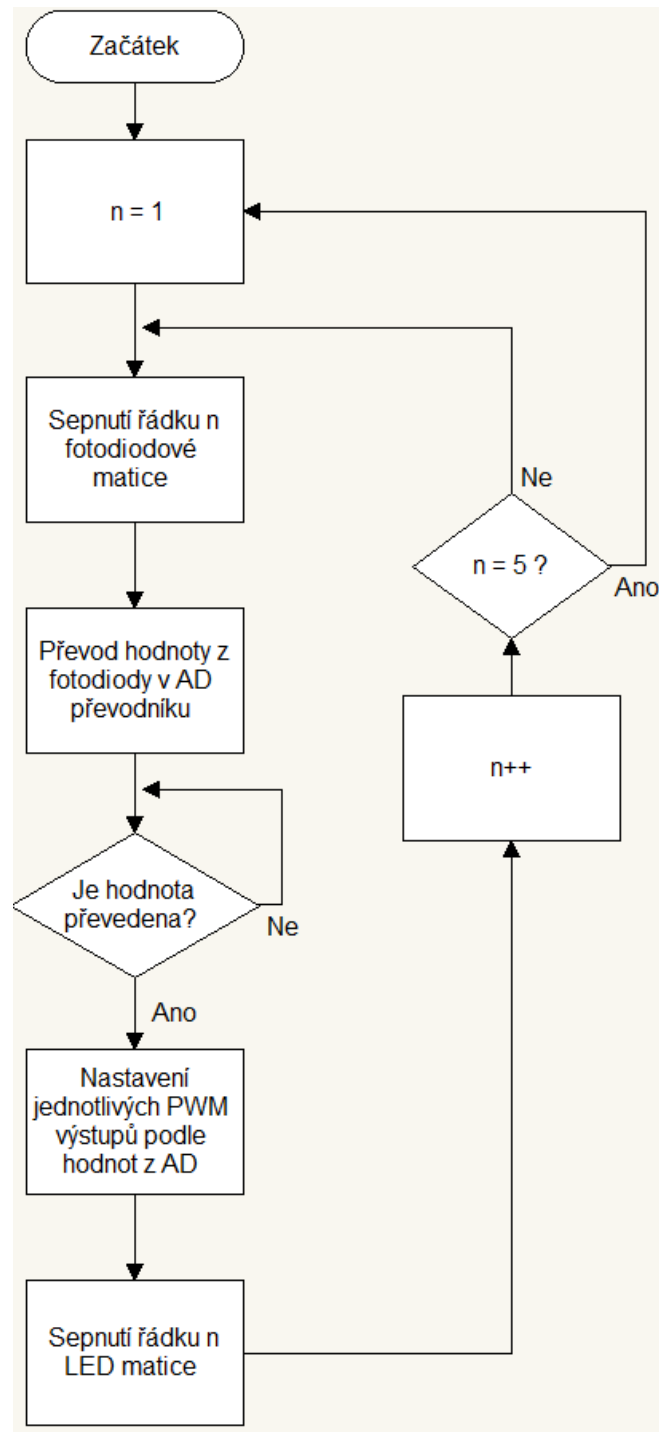
### 4.1 Multiplex signálu

Multiplex signálu je založen na setrvačnosti lidského oka. Tato vlastnost zajišťuje funkci například televizního vysílání, kdy divák sleduje stacionární snímky, které se střídají rychle za sebou a vytváří dojem pohyblivého obrazu. Tohoto principu lze využít i pro rozsvícení některých segmentů LED matice, za použití mnohem menšího množství pinů procesoru. Pokud bychom například chtěli rozsvítit pouze čtyři rohové diody, tak při sepnutí odpovídajících sloupců a řádků by se nám rozsvítil čtverec.[23]

Trik spočívá v postupném blikání jednotlivými řádky s dostatečnou frekvencí. Díky tomu lidské oko nezaznamená blikání, ale pouze rozsvícené body. Přesná frekvence závisí na konkrétním člověku. Také například na tom, jestli kouká na obraz přímo nebo periferně. Běžně volená frekvence, například u evropské televize, je 50Hz. To odpovídá 50ti změnám za sekundu. Každý stacionární snímek bude tedy svítit 0,02s.

## 4.2 Algoritmus zpracování

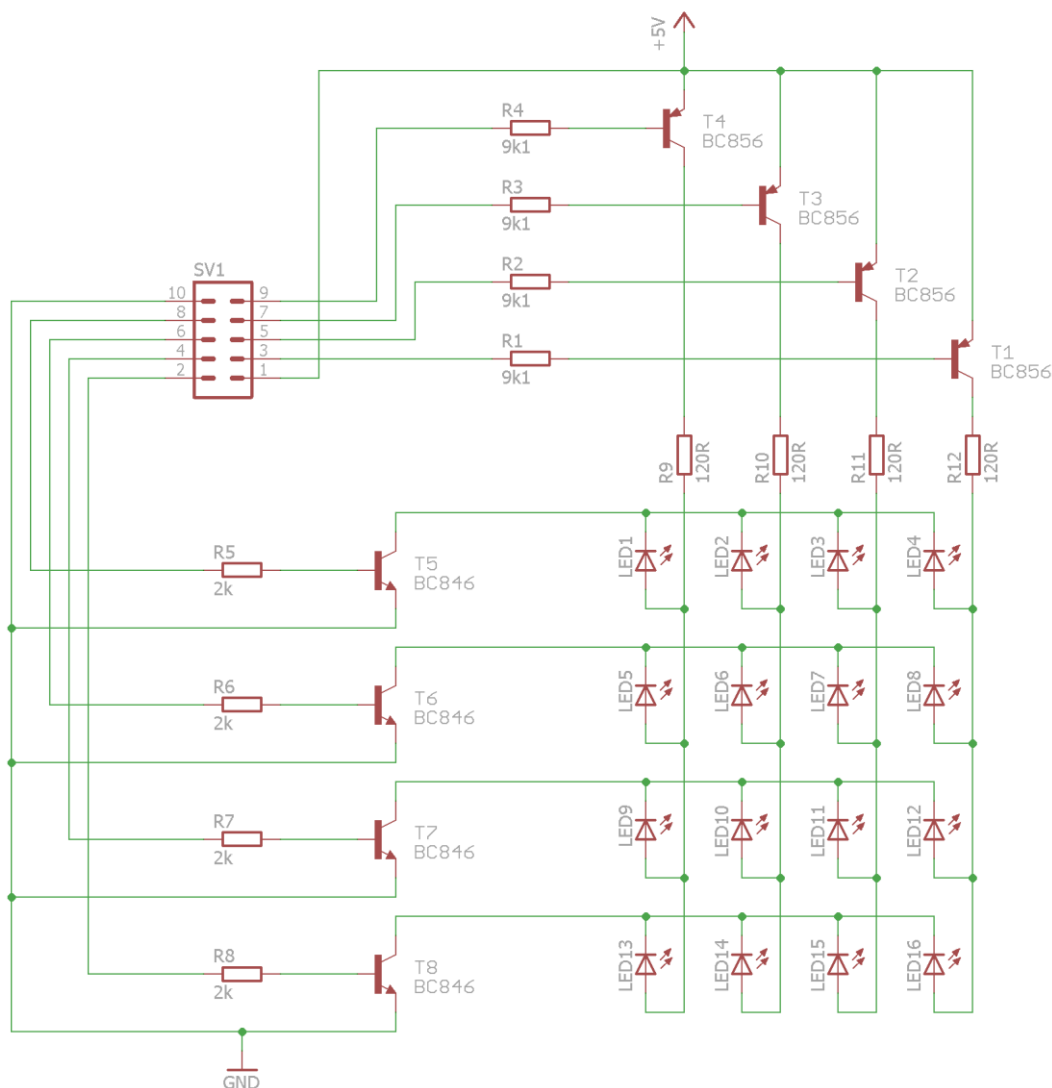
Algoritmus funguje na principu spínání jednotlivých řádků fotodiodové matice. Po sepnutí se převede hodnota z jednotlivých fotodiód jednoho řádku pomocí AD. Poté, co mikroprocesor hodnotu převede, tak ji lze použít pro nastavení PWM výstupů. Tyto výstupy již přímo ovládají LED matici, kde opět sepneme jeden řádek LED matice a pošleme na něj sloupcové hodnoty.



Obr. 22 Vývojový diagram spolupráce obou desek

## 5 Návrh zobrazovače

Navrhnutý zobrazovač obsahuje cestu z mikroprocesoru skrz konektor. Signály z mikroprocesoru ovládají tranzistory ve spínacím režimu a následně přímo rozsvěčují jednotlivé diody. Výsledný obraz dostaneme multiplexí, kterou jsem popsal v kapitole 4.1.



Obr. 23 Schéma zobrazovače

### 5.1 LED diody

Při výběru LED diod jsem bral v potaz hlavně SMD provedení. Také aby potřebné napětí na diodě odpovídalo mému napájecímu napětí 5V. Vybral jsem tedy LED diodu v provedení 0805. Protože můj display není barvený, tak jsem vybral červenou fotodiodu z důvodu dostupnosti ze školních zásob. Dioda potřebuje napětí  $U_f$  2,2V.

Diody potřebují omezení maximálního proudu diodou. K tomu slouží předřadný odpor, který lze spočítat z Ohmova zákona.

$$R = \frac{U}{I}$$

Výpočet konkrétního předřadného odporu pro LED diody. Předřadný odpor je vypočtený jako napájecí napětí zmenšené o úbytek  $U_{CESAT}$ , který je při součtu obou tranzistorů 0,4V. Od tohoto napětí odečteme požadované napětí na diodě a vydělíme maximálním proudem, který přes rezistor poteče. Dostáváme 120  $\Omega$ , tuto hodnotu nalezneme v odporové řadě E12.

$$R_{\text{předřadný}} = \frac{U - U_D - U_{CESAT}}{I_R} = \frac{5 - 2,2 - 0,4}{20 \cdot 10^{-3}} = 120 \Omega$$

## 5.2 Výstupní spínací tranzistory

Tranzistory jsou u zobrazovače použity ve spínacím režimu. Jsou zde nutné z toho důvodu, že mikroprocesor by mnou požadovanou zátěž nedokázal obsloužit. Takže je potřeba spínat přes tranzistory k napětí 5V.[1][3]

Minimální proud, který musí téct do báze, je ve vzorci 5.1 značen  $I_B$ , v praxi se tento proud násobí 3-5x jako rezerva pro jisté sepnutí tranzistoru. Tuto hodnotu vypočteme jako poměr kolektorového proudu, tento proud ve schématu představuje součet jednotlivých proudů na diodách, takže při plně rozsvíceném řádku se jedná o 4x20mA a  $h_{21E}$ .

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}}$$

Parametr  $h_{21E}$  se nazývá proudový zesilovací činitel a jeho hodnota je uváděna v datasheetu tranzistoru. Pro ukázkou výpočtu zvolím NPN tranzistor BC846 z mého návrhu. Podle datasheetu má tento tranzistor hodnotu  $h_{21E} = 110$ .

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{110} = 7,2727 \cdot 10^{-4}$$



Po zanesení rezervy, kterou jsem zvolil jako  $3x I_B$ . Dostaneme minimální proud do báze  $I_B = 2,1818 \cdot 10^{-3} \text{A}$ . Z této hodnoty dopočítáme bázevý odpor podle Ohmova zákona. Napětí  $U_B$  je možné získat jako napájecí napětí snižené o úbytek  $U_{BE}$ , který je podle datasheetu 0,66V.

$$U_B = U - U_{BE} = 5 - 0,66 = 4,34 \text{ V}$$

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{4,34}{2,1818 \cdot 10^{-3}} = 1989 \Omega$$

Nejbližší rezistor lze nalézt například v odporové řadě E12, a je to 2k  $\Omega$ .

Odpor pro druhý tranzistor vypočítáme obdobným způsobem, pouze se mění parametry tranzistoru, které jsou pro BC856 následující:  $h_{21E}=125$ ,  $U_{BE}=0,65\text{V}$ . Také je rozdíl v proudu  $I_C$ , který zde není 80mA, ale 20mA. Je to proto, že budu spínat matici po řádcích. Proud tranzistorem pro řádek je dán součtem proudu všemi 4mi diodami, kdežto proud sloupcem je vždy pouze jedna dioda. Výsledný bázevý odpor pro tranzistor BC856 jsem stanovil na 9k1  $\Omega$ .

### 5.3 DPS zobrazovač

Návrh desky zobrazovače lze vidět v příloze D. Deska je navrhnutá jako oboustranná, ačkoliv vyrobena byla jako jednostranná. Je to z důvodu nízkého počtu propojení ze spodní strany. Tyto spoje byly realizovány za pomoci připájených drátků skrz otvory. Deska obsahuje vlastní LED matici, odpory pro omezení proudů a každý řádek a sloupec má vlastní tranzistor s bázevým odporem. Tento odpor je umístěný přehledně u konkrétní řady/sloupce. Konektor je ze zadní strany desky pro možnost zabudování zobrazovače do případné dírkové komory. Díky tomu bude moci být propojena uvnitř krabičky a zároveň bude mít LED výstup směrem z krabičky. Deska opět obsahuje 4 technologické otvory na uchycení destičky. Stejně jako u desky fotosnímače mají průměr 3mm. Rozměr desky je 45mm x 51mm.

## 6 Ověření funkčnosti

Fotosnímač byl otestován za pomoci programu Putty. K otestování byl napsán program v jazyce C, který je přiložený na CD u této bakalářské práce.

Program postupně spíná řádky fotodiodové matice, a získané sloupcové hodnoty převádí v AD převodníku. Tato hodnota se odesílá po sériové komunikaci.

Díky programu Putty můžeme sledovat funkčnost snímače tím, že vystavíme senzor různým světelným podmínkám. V programu Putty nalezneme číselnou informaci (hodnotu po převodu A/D), která reprezentuje intenzitu dopadajícího světla na každou konkrétní fotodiodu.

### 6.1 Měření snímání

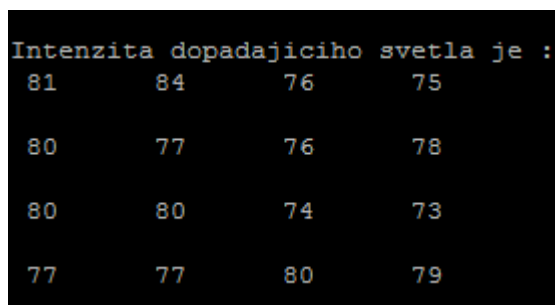
Snímač jsem testoval pro krajní hodnoty a také pro momentální denní světlo. Pro představu ukážu, jak testovací program reagoval na dané osvětlení. Výstup z programu je pro názornost seřazen stejně jako fotodiody - řádek v programu odpovídá řádku fotodiodové matice a sloupec sloupci.

Nejnižší dosaženou hodnotou byla 0, tato hodnota se dostane vždy po zakrytí snímače.

```
Intenzita dopadajiciho svetla je :  
0      0      0      0  
0      0      0      0  
0      0      0      0  
0      0      0      0
```

Obr. 24 Hodnoty po převodu - zakrytý snímač

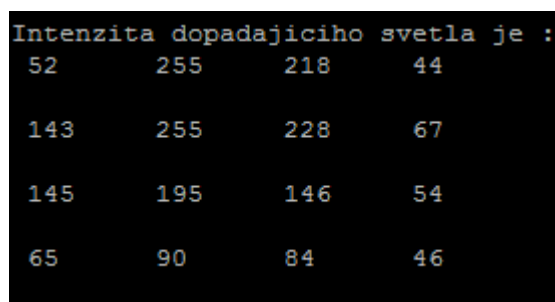
Při denním světle jsem naměřil hodnoty pohybující se kolem 80. Konkrétní převedené hodnoty z každé fotodiody ukazuje obrázek 25.



```
Intenzita dopadajiciho svetla je :
81      84      76      75
80      77      76      78
80      80      74      73
77      77      80      79
```

Obr. 25 Hodnoty po převodu - denní osvětlení

Bohužel jsem neměl k dispozici přesný zdroj světla, takže poslední měření je opravdu jen pro představu. Při vystavení fotosnímače přímému záření ze svítilny telefonu se po převodu dá dosáhnout maximální hodnoty a tou je 255. Na obrázku 26 je také vidět, že svítilna nedodala na každou fotodiodu stejnou intenzitu světla, takže převedené hodnoty se velmi liší.



```
Intenzita dopadajiciho svetla je :
52      255     218     44
143     255     228     67
145     195     146     54
65      90      84      46
```

Obr. 26 Hodnoty po převodu - přisvíceno svítlnou

## Závěr

Během práce jsem navrhnul schéma a desku plošných spojů fotosnímače, první verze měla několik vad, které se během výroby a ožívování podařilo nalézt a opravit. V práci uvádím již poslední verzi návrhu, která předešlé vady plně opravuje.

Pro konstrukci zařízení bylo potřeba zvolit vhodné součástky. Velký důraz byl kladen na fotodiody, které jsou srdcem snímače. Protože byl výrobek realizován z finančních prostředků fakulty, tak byly součástky konzultovány a vybíralo se mimo jiné i na základě dostupnosti jednotlivých kusů.

Desku fotosnímače jsem realizoval a oživil. Vzhledem k mým zkušenostem s pájením SMD součástek a několika vadám v původním návrhu výroba neproběhla úplně hladce. Tyto vady jsem při výrobě vyřešil drátovými spoji. Výsledná vyrobená deska tedy pochází z první verze návrhu. Druhá verze by měla estetičtější vzhled.

Celý projekt byl následně ožívován. Naprogramoval jsem mikroprocesor, aby se mohla ověřit celková funkce jednotlivých obvodů. Díky tomu, že jsem se dostal až k digitálnímu výstupu po sériové komunikaci lze zajisté říci, že výsledná deska fotosnímače je plně funkční.

Výsledný fotosnímač byl otestován za pomoci programu Putty. Ověřil jsem, že je fotosnímač schopen reagovat na různé expozice změnou výstupních hodnot z A/D převodníku. V práci uvádím některé ukázky z testování. Pro úplně zakrytý fotosnímač odpovídají hodnoty nule, zatímco při denním osvětlení zaznamená fotosnímač hodnoty pohybující se kolem 80. Rozsah převedených hodnot je od 0 do 255.

Zobrazovací strana zařízení byla navrhnutá, včetně návrhu desky plošných spojů. Tuto desku jsem vyrobil, ale vzhledem k časové tísně a po dohodě s vedoucím práce bylo upřednostněno oživení fotosnímače, takže zobrazovací strana zařízení nebyla plně otestována za chodu. LED diody reagují, ale spínání nebylo ověřeno. Z důvodu neověření zobrazovače jsem nemohl využít PWM výstupy mikroprocesoru ke spínání LED diod jak jsem původně plánoval.

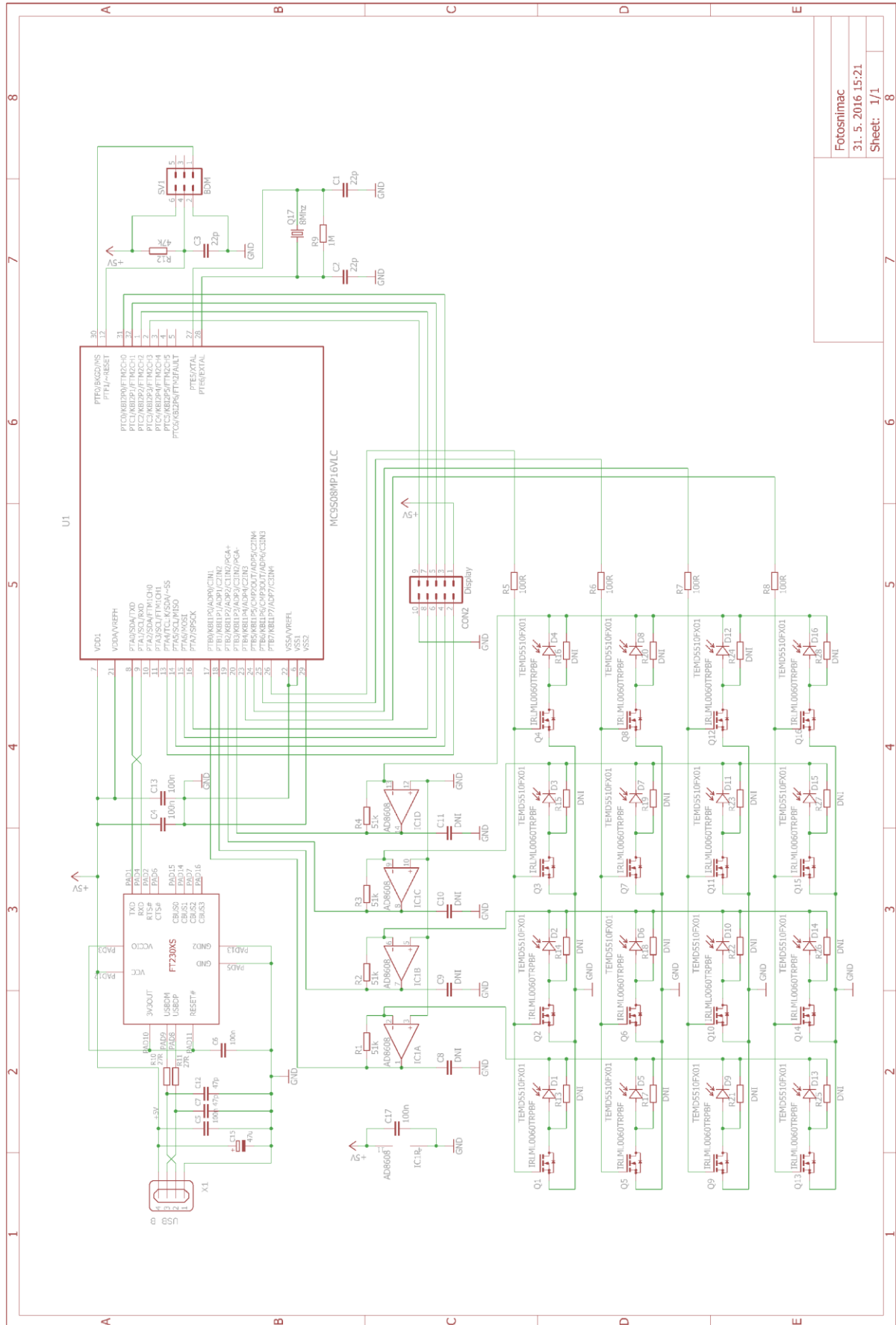
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. 3. vyd. České Budějovice: Kopp, 2008. ISBN 978-80-7232-365-4.
- [2] ŠÍSTEK, Martin. *Technika digitálních fotoaparátů*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření.
- [3] PINKER, Jiří a Václav KOUCKÝ. *Analogové elektronické systémy*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-284-5.
- [4] Snímací elektronky typu vidikon. *Encyklopedie Fyziky*. [online]. 17.5.2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1373-snimaci-elektronky-typu-vidikon>
- [5] Digitální snímače: typy a způsoby využití (3. díl). *FotoFocus*. [online]. 17.5.2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://www.fotofocus.cz/cz\\_digitalni-snimace-typy-a-zpusoby-vyuziti-\(3.,244.html](http://www.fotofocus.cz/cz_digitalni-snimace-typy-a-zpusoby-vyuziti-(3.,244.html)
- [6] AZfoto. *Snímací čip*. [online]. 17.5.2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://www.azfoto.cz/informace/digital\\_pod\\_lupou/snimaci\\_cip](http://www.azfoto.cz/informace/digital_pod_lupou/snimaci_cip)
- [7] Charge-coupled device. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled\\_device](https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device)
- [8] Foveon X3. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Foveon\\_X3](https://cs.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3)
- [9] Foveon X3 sensor: What is it and how does it work. *WhatDigitalCamera*. [online]. 20.12.2015 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://www.whatdigitalcamera.com/technology\\_guides/foveon-x3-sensor-what-is-it-and-how-does-it-work-65270](http://www.whatdigitalcamera.com/technology_guides/foveon-x3-sensor-what-is-it-and-how-does-it-work-65270)
- [10] *Vznik obrazu, dírková komora* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/5\\_Optika/2\\_Opticka\\_zobrazeni/5201\\_Vznik\\_obrazu\\_dirkova\\_komora.pdf](http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/5_Optika/2_Opticka_zobrazeni/5201_Vznik_obrazu_dirkova_komora.pdf)
- [11] Jak se testuje optická kvalita objektivů?. *Fotoaparát.cz*. [online]. ©2011 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/56/jak-se-testuje-opticka-kvalita-objektivu-2161/>
- [12] Fotodioda. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotodioda>
- [13] *BPW21R Datasheet* [online]. 2011. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>
- [14] *TEMD5510FX01 Datasheet* [online]. 2014. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81293/temd5510.pdf>

- [15] *BPW34 Datasheet* [online]. 2011. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- [16] *IRLML0060TRPbF Datasheet* [online]. 2012. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/196/irlml0060pbf-936708.pdf>
- [17] OZ jako převodník proud napětí a součtový. *dlabos*. [online]. 17.5.2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://dlabos.wz.cz/en/30-OZ\\_jako\\_prevodnik\\_proud\\_napeti\\_a\\_souctovy.html](http://dlabos.wz.cz/en/30-OZ_jako_prevodnik_proud_napeti_a_souctovy.html)
- [18] *Precision Low Noise CMOS Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifiers* [online]. 2006. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://datasheet.octopart.com/AD8608ARZ-Analog-Devices-datasheet-17207.pdf>
- [19] Eagle. *Cadsoftusa*. [online]. ©2011 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.cadsoftusa.com/download-eagle/>
- [20] *MC9S08MP16 Reference Manual* [online]. 2009. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://cache.nxp.com/files/microcontrollers/doc/ref\\_manual/MC9S08MP16RM.pdf](http://cache.nxp.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/MC9S08MP16RM.pdf)
- [21] *FT230XS Datasheet* [online]. 2008. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/602094/ETC2/FT230XS.html>
- [22] CCD – základní princip. *Encyklopedie Fyziky*. [online]. © 2006 – 2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- [23] STŘEDA, Jakub. *Využití 8x8 LED matice a MEMS senzoru pro propagační účely*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta Strojního inženýrství.

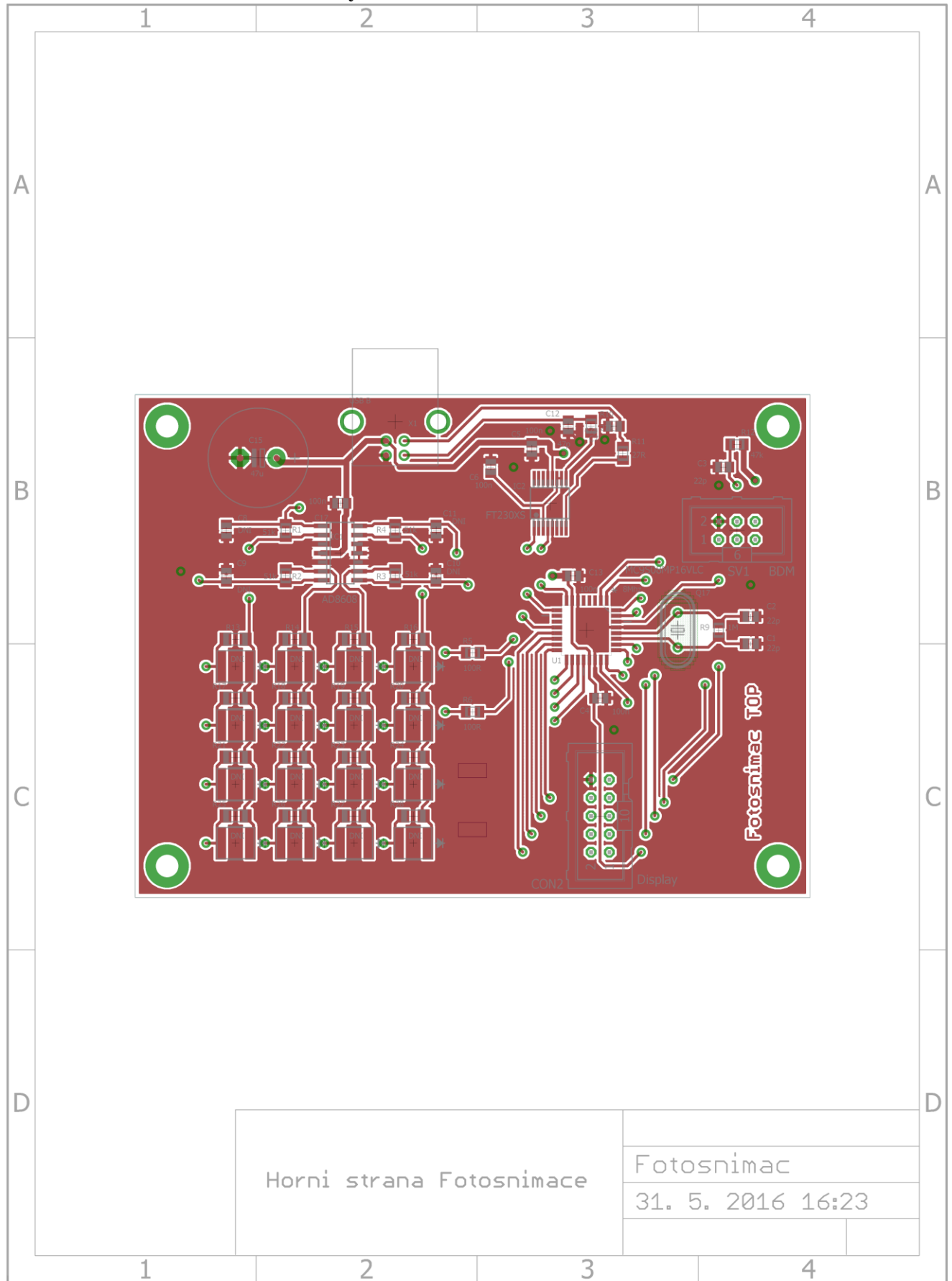
# Přílohy

## Příloha A – Schéma fotosnímače



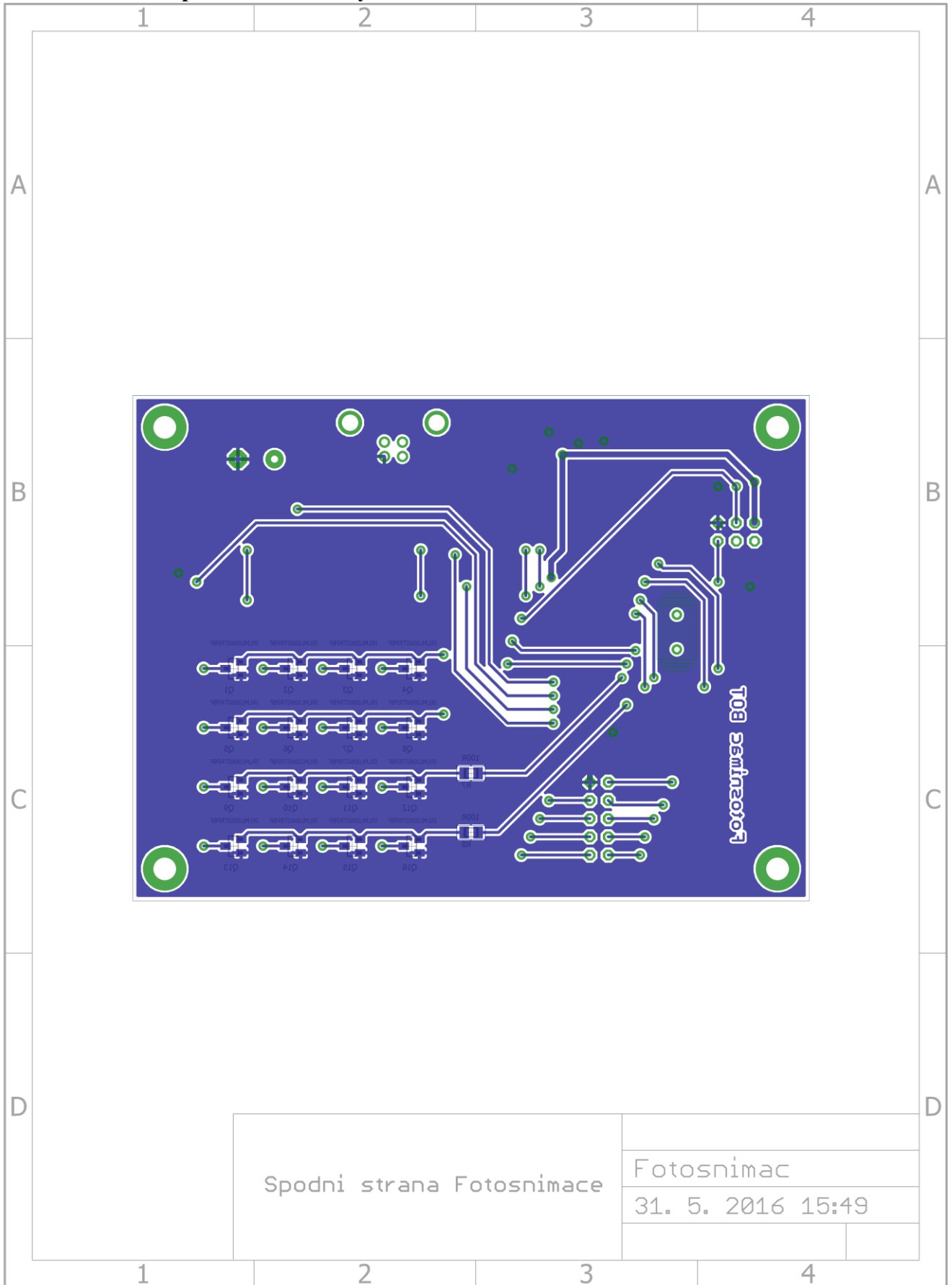
Fotosnímač
31. 5. 2016 15:21
Sheet: 1/1

**Příloha B – Horní strana desky fotosnímače**





**Příloha C – Spodní strana desky fotosnímače**



**Příloha D – Deska zobrazovače**

