

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

## Senzorový systém pro řízení a regulaci

**Petr Vilím**

Školitel: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

Obor: Aplikovaná elektronika

Zaměření: Komunikace, multimédia a elektronika

Květen 2018



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vilím** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **393020**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Senzorový systém pro řízení a regulaci**

Název bakalářské práce anglicky:

**Sensor System for Control and Regulation**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu využití inteligentních senzorů pro snímání pohybu a realizace aplikací pro řízení a regulaci, vytipujte vhodné typy senzorů a dalších integrovaných obvodů pro zpracování senzorových signálů.
2. Navrhněte senzorový systém řízený mikrokontrolérem pro vyhodnocování pohybu (gest) určených pro řízení a regulaci. Pro návrh využijte senzory, např.: VL6180X a 32-bit ARM mikrokontrolér, např. STM32L476RGT6. Systém musí umožňovat detekci pohybu v osách x, y, z a náklonu v osách x, y bez použití technicky náročnějších systémů, např. s kamerou a výpočetně náročnými algoritmy. Realizujte model navrženého systému.
3. Zjistěte základní parametry realizovaného systému, navrhněte možné úpravy pro jejich případné vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Vobecký, J., Záhlava, V.; Elektronika - Součástky a obvody, principy a příklady, Grada Publishing, Praha 2005, ISBN 978-80-247-1241-3
- [2] Záhlava, V.; Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN - technická literatura, Praha 2011, ISBN 978-80-7300-266-4
- [3] katalogové listy vývojové sady P-NUCLEO-6180X1; senzoru VL6180X; mikrokontroléru STM32L476RGT6, www.st.com

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Miroslav Husák, CSc., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

V první řadě musím poděkovat za podporu a vloženou důvěru svému vedoucímu práce prof. Ing. Miroslavovi Husákovi, CSc. a kolektivu *Laboratoří pro Vývoj a Realizaci* a *Katedry elektrotechnologie* za poskytnutí materiálních zdrojů a technického zázemí. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítovi Záhlavovi, CSc. za pomoc s návrhem tištěného spoje, Ing. Tomášovi Morongovi za asistenci s šablonou pro L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X a Ing. Pavlu Tichému, MBA. za kontrolu formálních náležitostí této práce. Velké díky náleží též mým rodičům a mojí tetě Jitce Němečkové za to že mě podporovali obzvláště v obdobích neúspěchu. Poděkování na závěr náleží Olze Srstkové a Markétě Neřoldové za emocionální podporu v momentech, kdy jsem ji nejvíce potřeboval.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 25. května 2018

.....

## Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou elektronických řídicích systémů se senzory určených pro interakci s uživatelem. V teoretické části se zabývá historickým vývojem typů senzorů, jejich vlastnostmi a základními principy měření vzdálenosti. v praktické části je prezentován koncept detekce gest pomocí matice inteligentních senzorů měřících vzdálenost a konstrukce hardwaru modelového systému. Na závěr jsou prezentovány změřené parametry a předpokládaný navazující vývoj.

**Klíčová slova:** Inteligentní senzory, senzory pro měření vzdálenosti, detekce gest

**Školitel:**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
ČVUT FEL,  
Technická 2,  
166 27 Praha 6 - Dejvice

## Abstract

This bachelor's thesis explains a development of an electronic control system with sensors for interaction with a user. The theoretical part focuses on evolution of sensors, their properties and basic principles of range measurement. Practical part explains a concept of gesture detection with a matrix of ranging sensors and hardware design of a model system. Measured characteristics and expected future development are presented in the final part of the thesis.

**Keywords:** Smart sensors, ranging sensors, gesture detection

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	8.2 Vzorkovací frekvence senzorů ...	34
<b>2 Senzory</b>	<b>3</b>	8.2.1 Závislost na vzdálenosti .....	34
2.1 Historický vývoj senzorů .....	3	8.2.2 Závislost na okolním osvětlení	34
2.1.1 První generace .....	3	8.3 Detekce gest .....	35
2.1.2 Druhá generace .....	4	<b>9 Závěr</b>	<b>37</b>
2.1.3 Třetí generace .....	4	<b>Literatura</b>	<b>39</b>
2.2 Parametry senzorů .....	5	<b>Seznam zkratk a symbolů</b>	<b>43</b>
2.2.1 Statické parametry .....	5	<b>Přílohy</b>	<b>45</b>
2.2.2 Dynamické parametry .....	9	Příloha A - funkční schéma obvodu .	45
2.2.3 Vliv prostředí .....	9	Příloha B - rozložení DPS .....	53
<b>3 Měření vzdálenosti</b>	<b>11</b>	Příloha C - zdrojový kód .....	53
3.1 Intenzita odraženého signálu ...	11	Příloha D - snímky z RTG .....	56
3.2 Triangulace .....	12		
3.2.1 PSD .....	12		
3.3 Doba letu signálu .....	13		
3.3.1 Ultrazvuk .....	13		
3.3.2 IR laser .....	14		
<b>4 Měření náklonu a detekce gest</b>	<b>15</b>		
4.1 Uspořádání senzorů .....	15		
4.2 Výpočet .....	16		
4.3 Vyhodnocení gesta .....	17		
<b>5 Problematika napájecích zdrojů</b>	<b>19</b>		
5.1 Zvlnění .....	19		
5.2 Šum .....	19		
<b>6 Hardware</b>	<b>21</b>		
6.1 Blokové schéma .....	21		
6.2 Funkční schéma .....	21		
6.2.1 Matice senzorů .....	22		
6.2.2 Mikrokontrolér .....	22		
6.2.3 Napájení .....	23		
6.2.4 Převodník logických úrovní ..	24		
6.2.5 Výstupní relé .....	24		
6.2.6 USB a sériová linka .....	24		
6.3 Návrh DPS .....	24		
6.3.1 Rozmístění senzorů .....	25		
6.4 Osazení a zprovoznění .....	27		
6.4.1 Nefunkčnost senzorů .....	27		
<b>7 Software</b>	<b>29</b>		
7.0.1 Použité nástroje .....	29		
7.0.2 Struktura programu .....	29		
<b>8 Testování parametrů systému</b>	<b>33</b>		
8.1 Napájení .....	33		
8.1.1 Zvlnění a šum .....	33		
8.1.2 Spotřeba .....	33		

## Obrázky

2.1	Senzor první generace .....	4
2.2	Inteligentní senzor .....	4
2.3	Rozsah měření senzoru .....	8
2.4	Hystereze senzoru .....	8
2.5	Výstupní impedance senzoru ....	9
3.1	Znázornění měření vzdálenosti ..	11
3.2	Vnitřní struktura PSD .....	13
3.3	ToF senzory STMicroelectronics	14
4.1	Model určování náklonu .....	15
4.2	Matice rozložení senzorů .....	16
4.3	Uspořádání senzorů v soustavě souřadnic .....	16
6.1	Blokové schéma obvodu .....	22
6.2	Boční řez senzoru VL6180X ....	26
6.3	Výsledné rozložení senzorů .....	26
7.1	Blokové schéma navrhovaného softwaru .....	30
8.1	Závislost vzorkovací frekvence na vzdálenosti .....	34
8.2	Závislost vzorkovací frekvence na osvětlení .....	35

## Tabulky

8.1	Zvlnění napětí napájecího zdroje	33
8.2	Spotřeba zařízení v různých režimech .....	34



# Kapitola 1

## Úvod

Vestavěné elektronické systémy jsou již součástí velké části komerčně dostupných zařízení a jejich využití dlouhodobě narůstá. Aktivně je rozvíjen a implementován do praxe koncept internetu věcí, přičemž je v současné době možné se setkat již s mnoha komerčními řešeními. Velkou část moderní domovní výstavby lze též zařadit do kategorie inteligentních budov.

V tomto prostředí je stále větší zájem o nové typy senzorů s nízkou spotřebou, vysokou mírou integrace, odolností proti šumu a vysokou rozlišovací schopností. Zároveň se nabízí různé možnosti využití těchto zařízení a jejich senzorů nejen pro sběr dat, ale i pro interakci s uživatelem. Mimo konvenčních řešení vyžadujících fyzickou interakci, jako jsou tlačítka, dotykové panely a jiné, se nabízí i bezdotyková řešení jako je detekce gest.

Komerčně dostupným řešením, které bych zde uvedl jako příklad, je technologie Intel<sup>®</sup> RealSense<sup>™</sup>. Tento systém je postaven na kombinaci kamer a proprietárním dedikovaném hardwaru využívajícím umělou inteligenci [31]. Do svých notebooků jej implementovala například firma Lenovo<sup>™</sup> [32].

Volně dostupné řešení představuje softwarová knihovna Tensorflow<sup>™</sup>. Tuto knihovnu původně vyvinula vývojová skupina Google Brain Team v rámci organizace Google's AI, později byla uvolněna pod licencí Apache 2.0 a nyní je používána v řadě zařízení s různými operačními systémy [33].

Ačkoliv tato řešení umožňují implementaci velkého množství funkcí, tak mají též celou řadu nevýhod, ze všeho nejvíce velké nároky na výpočetní výkon a s tím související spotřebu energie. Zároveň mají tyto systém vyšší pořizovací a provozní náklady. Řešení této situace by mohlo přinést využití systému inteligentních senzorů pro měření vzdálenosti. Cílem této práce je prozkoumání možnosti takového systému, návrh hardwaru a měření základních parametrů pro vyhodnocení potenciálu budoucího vývoje.



## Kapitola 2

### Senzory

Pro vysvětlení důvodů a motivací pro použití konkrétního typu senzoru v navrhovaném systému se nyní krátce zmíním o jednotlivých kategoriích senzorů z hlediska historického kontextu, konstrukce a funkčních parametrů. Abych v tomto směru předešel nejasnostem, tak bych si dovolil začít od samotné definice senzoru.

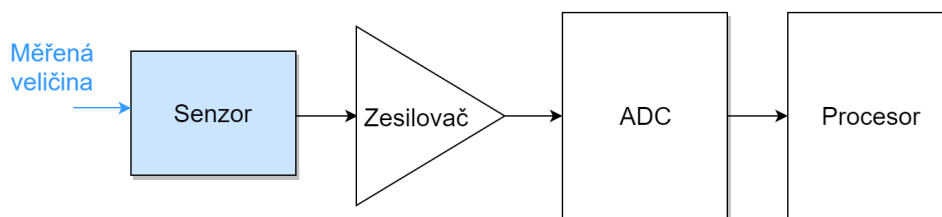
Vhodnou definicí senzoru může být následující: *senzor je zařízení, které na obdržený podnět na vstupu reaguje elektrickým signálem na výstupu* [1]. Jako senzor tedy můžeme obecně chápat jakékoliv zařízení přeměňující vstupní podněty na výstupní signál, který může být dále zpracován a analyzován. Funguje tedy jako převodník neelektrických veličin. V tomto případě je škála vstupních podnětů široká, může se jednat o záření, chemické, elektrické, tepelné, magnetické nebo mechanické veličiny, naproti tomu výstup očekáváme ve formě elektrického signálu.

### 2.1 Historický vývoj senzorů

Protože množství dostupných senzorů je v současné době enormní [1][28], tak využiji pro zjednodušení popisu historického vývoje rozdělení do tří generací. Nejedná se o ustálenou kategorizaci a rozdílné informační zdroje se rozcházejí v terminologii. Toto rozdělení jsem převzal z přednášek k předmětu *Senzory v elektronice a informatice*, viz. [6].

#### 2.1.1 První generace

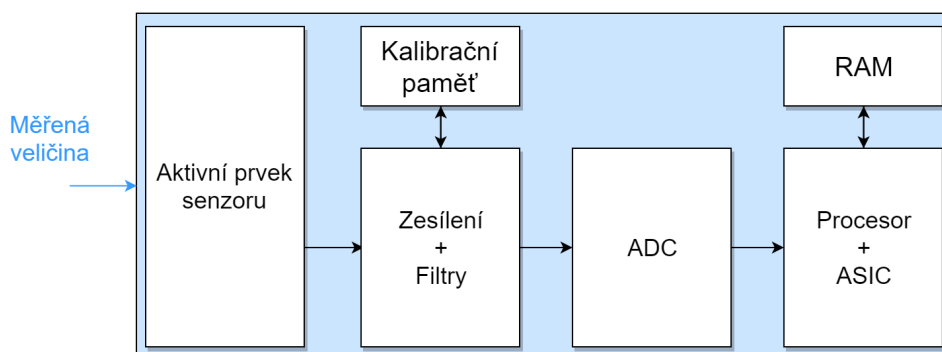
Jedná se o typy senzorů využívající základních jevů jako je změna odporu, kapacity nebo indukčnosti způsobená vnějšími měřenými vlivy. Tyto senzory jsou typicky málo odolné proti rušení a jejich fungování je často silně ovlivněno teplotou [1]. Výstup těchto senzorů je analogový, měříme tedy napětí, proud, případně u kapacitních a indukčních senzorů měříme frekvenci oscilátoru ke kterému je senzor zapojen. Do této kategorie řadím taktéž senzory využívající termoelektrický a piezoelektrický jev. Na obrázku 2.1 je znázornění běžného zapojení senzoru první generace v měřícím systému.



**Obrázek 2.1:** Schéma zapojení aktivního senzoru první generace

### 2.1.2 Druhá generace

Modernější typy senzorů již aktivně využívají vlastností polovodičů a integrované elektroniky na čipu [38]. Běžnou součástí je teplotní kompenzace senzoru a obvody úpravy signálu, například integrovaný operační zesilovač. u novějších typů se můžeme již setkat s integrovaným analogově-digitálním převodníkem, jednoduchou výpočetní jednotkou a digitálními rozhraními jako jsou I2C nebo SPI. Do této generace řadím senzory typu MEMS. Nejnovější typy senzorů této generace mohou obsahovat i paměťové prvky pro kalibraci senzoru [30]. Na následujícím obrázku 2.2 je znázorněna vnitřní struktura typického senzoru druhé generace.



**Obrázek 2.2:** Schéma inteligentního senzoru druhé generace

### 2.1.3 Třetí generace

Nejmodernější typy senzorů využívají optických vláken a planárních vlnovodů. Výstup ze senzoru je možné přenášet po optickém vlákne i na vzdálenosti i v řádu kilometrů bez výrazného zkreslení [34]. Největší potenciál využití mají senzory s Braggovou mřížkou (FBG) integrované přímo do optického vlákna. Vykazují vyjímečnou přesnost a extrémní odolnost proti elektromagnetickému rušení nebo záření.

Tyto senzory nachází uplatnění v oblastech zabezpečení rozsáhlých objektů, například v ochranných systémech perimetru letišť, nebo jako detektory mechanického namáhání ve strukturách velkých staveb jako jsou přehrady a mosty [39].

## 2.2 Parametry senzorů

Při výběru vhodného senzoru pro danou aplikaci je nutné vzít v úvahu mnoho faktorů, kterým bych se nyní chtěl podrobněji věnovat, mimo jiné rozdělení na dva typy senzorů z hlediska napájení:

- Pasivní senzory - nepotřebují ke svému fungování externí zdroj energie, dochází k energetické přeměně vstupní energie na energii výstupního signálu, označují se tedy jako generátorové.
- Aktivní senzory - na rozdíl od pasivního senzoru potřebují zdroj napájení, protože pouze moduluji výstupní signál na základě změn vstupních veličin, mohou tedy být někdy označovány za modulační.

Senzory lze popsat pomocí převodní charakteristiky  $y = f(x)$ , kde  $y$  je výstupní signál a  $x$  vstupní veličina. v praxi je tato převodní charakteristika nelineární a k úplnému popisu senzoru je potřeba diferenciální rovnice řádu dva a více [1]. Mimo jiné nelze zanedbat fakt, že výstupní signál je ovlivněn mnoha dalšími faktory a tak ve skutečnosti není pouze jedna vstupní veličina. v mnohých případech je jedinou možností popisu převodní charakteristiky aproximace polynomem.

Aby bylo možné vlastnosti senzorů jednoduše popsat a dále porovnat senzory mezi sebou, zavádí se tři druhy parametrů:

- Statické parametry - popisují chování senzoru při pomalých změnách na vstupu.
- Dynamické parametry - popisují chování senzoru při rychlých změnách.
- Okolní prostředí - nezanedbatelný vliv na fungování senzoru má okolní prostředí a tak jej uvádím jako třetí parametr.

### 2.2.1 Statické parametry

Jak jsem již zmínil, statické parametry popisující chování senzoru při pomalých změnách vstupní veličiny. To představuje ovšem určitou nejednoznačnost, protože není přesně jasné, co je pomalá změna. v případě některých aplikací pomalá změna může představovat změny v řádu hodin, u jiných jsou dostatečující parametry i pro změny v řádu frekvencí 1 kHz a výše. Je tedy třeba vzít v úvahu, že použitelnost těchto parametrů je dána v praxi konkrétním senzorem.

### Linearita

Převodní charakteristika senzoru je obecně nelineární. u některých senzorů přesto lze aproximovat závislost vstupních a výstupních veličin přímkou v omezeném rozsahu měřených hodnot, případně v okolí pracovního bodu, tedy takové hodnoty kolem které se bude ve většina měření pohybovat nebo takové hodnoty, kde požadujeme co nejpřesnější měření. Linearitu v tomto

případě definujeme jako maximální absolutní odchylku lineární aproximace od skutečného průběhu, viz. rovnice 2.1a, nebo jako relativní poměr maximální odchylky lineární aproximace od skutečného průběhu a zvoleného rozsahu, viz rovnice 2.1b:

$$L_{abs} = \max(|x_i - x_m|) \quad (2.1a)$$

$$L_{rel} = \frac{L_{abs}}{x_{max} - x_{min}} \cdot 100\% \quad (2.1b)$$

kde  $x_i$  je ideální předpokládaná hodnota,  $x_m$  je měřená hodnota a  $x_{max} - x_{min}$  je zvolený rozsah.

### ■ Přesnost

Přesnost senzoru je jedním z nejdůležitějších parametrů, vyjadřuje relativní chybu senzoru ve smyslu odchylky od skutečné hodnoty vstupní veličiny. Příčiny této odchylky jsou v tomto případě podobné jako u parametru linearity, teď již nelineární funkce popisující převodní charakteristiku senzoru se do jisté míry liší od teoreticky skutečného průběhu. Skutečnou hodnotu vstupní veličiny nikdy neznáme s absolutní jistotou, protože každý senzor i přestože je stejného typu se liší a navíc je měření ovlivněno šumem. V praxi tak nemáme jinou možnost než použít statistické vyhodnocení na základě měření většího množství senzorů ze stejné série. Teoreticky můžeme přesnost definovat pomocí následujících vztahů pro relativní chybu senzoru, viz. rovnice 2.2a, a přesnost vyjádřenou na plný rozsah výstupu, viz rovnice 2.2b:

$$\epsilon_a = \frac{x_m - x_t}{x_t} \cdot 100\% \quad (2.2a)$$

$$\epsilon_f = \frac{x_m - x_t}{X_{FSO}} \cdot 100\% \quad (2.2b)$$

kde  $x_t$  je skutečná hodnota vstupní veličiny,  $x_m$  je měřená hodnota a  $X_{FSO}$  je celý rozsah (FSO). Na základě přesnosti následně definujeme toleranční pásmo zvoleného senzoru jako oblast kolem ideální převodní charakteristiky.

### ■ Rozlišovací schopnost

Každý reálný senzor má svá technická omezení týkající se minimálního detekovatelného přírůstku vstupní veličiny. i v teoreticky ideálním prostředí bez šumu bude každý senzor vykazovat určitou míru kvantování, což znamená, že se výstup nebude měnit spojitě, ale v malých krocích. Tento minimální krok charakterizuje rozlišovací schopnost:

$$R_{max} = \frac{\Delta X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

kde  $R_{max}$  je maximální rozlišovací schopnost,  $\Delta X_{min}$  minimální detekovatelná změna a  $X_{max} - X_{min}$  je měřitelný rozsah vstupní veličiny.

### ■ Citlivost a selektivita

Citlivost senzoru charakterizuje převodní poměr mezi změnami výstupu a změnami na vstupu. Vzhledem k tomu, že převodní funkce senzoru není ve většině případů lineární, tak citlivost senzoru není konstanta, ale závisí i na aktuálně měřené hodnotě. Citlivost je tedy definována následovně:

$$S = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (2.4)$$

kde  $S$  je selektivita,  $y$  výstupní signál a  $x$  vstupní veličina. Obdobným způsobem definujeme selektivitu senzoru, která popisuje citlivost senzoru  $S_i$  na změny vybrané vstupní veličiny  $x_i$ :

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (2.5)$$

### ■ Rozsah měření

Rozsah měření je ovlivněn mnoha faktory. Je definován jako oblast vstupních hodnot kde senzor vykazuje dostatečnou citlivost, typicky se jedná o pokles o 3dB vůči maximální citlivosti, viz. obrázek 2.3 na straně 8.

Jeden ze zásadních faktorů ovlivňujících minimální detekovatelný vstupní signál je šumové napětí, viz. následující rovnice 2.6

$$y_{min} = \sqrt{u_n^2} \quad (2.6)$$

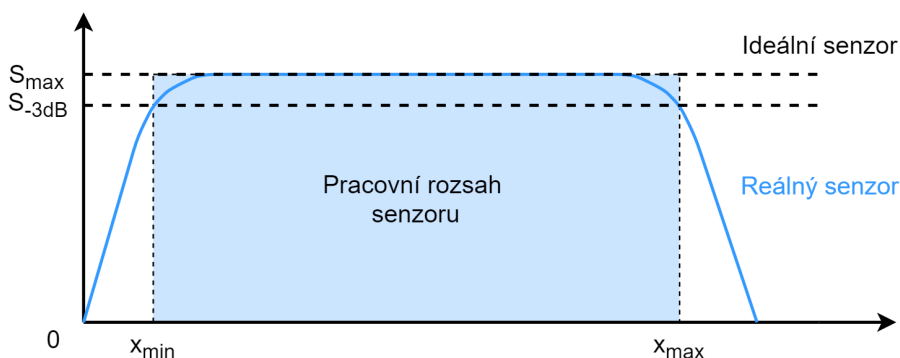
kde  $y_{min}$  je minimální detekovatelná hodnota a  $u_n$  je šumové napětí. Pokud jde o omezení maximálního detekovatelného vstupního signálu, tak mohou nastat běžně dva případy:

- Pasivních senzor se dostane do stavu saturace, další nárůst vstupního signálu již nevyvolává nárůst výstupního signálu. Příkladem může být fotodioda, která je již osvětlena natolik, že při zvýšení světelného toku již nedochází k většímu generování volných nosičů náboje.
- Aktivní senzor nemůže generovat signál nad hodnotu napájecího napětí a jeho výstup je tím tedy omezen.

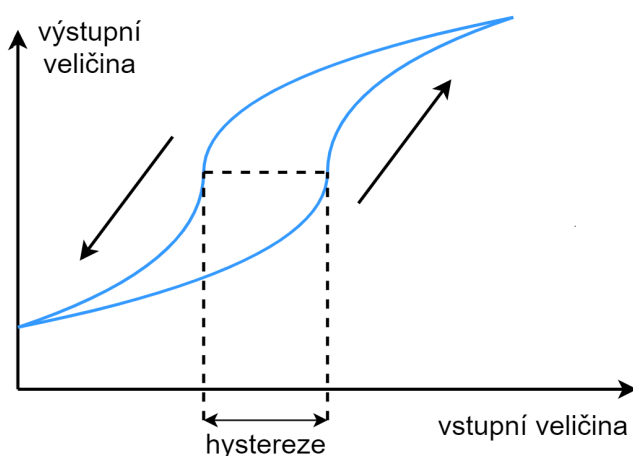
Prakticky se můžeme setkat s mnoha dalšími faktory, například taková velikost vstupní veličiny, která by vedla ke zničení senzoru. Na obrázku 2.3 na straně 8 je uvedeno grafické znázornění rozsahu měření.

### ■ Hystereze

Hystereze představuje odchylku výstupu senzoru ve zvoleném bodě vstupního signálu v závislosti na směru jeho změny - tedy klesající nebo stoupající hodnota na vstupu. Tento jev popisuje graf na obrázku 2.4 na straně 8.



Obrázek 2.3: Rozsah měření senzoru [6]



Obrázek 2.4: Graf hystereze senzoru [6]

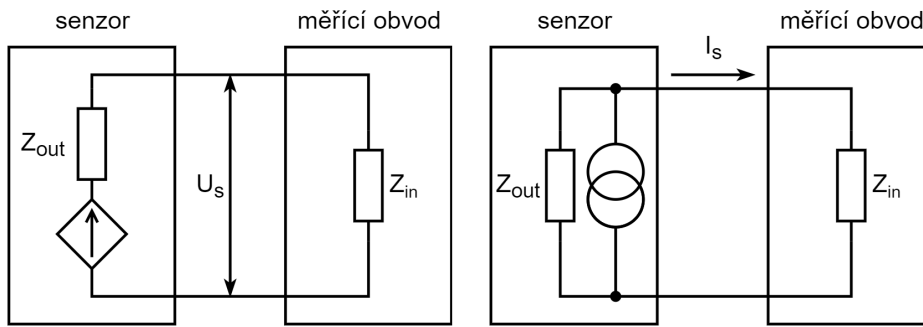
### ■ Typ výstupu a výstupní impedance

V praxi se můžeme setkat s celou škálou různých typů výstupů, které můžeme zařadit do dvou kategorií: analogové a digitální. Analogové senzory mohou dále mít napěťový nebo proudový výstup a tím je i zásadně ovlivněna volba vhodné vstupní impedance měřicího zařízení. v případě napěťového výstupu je vhodné pokud platí  $Z_{in} \gg Z_{out}$ , naproti tomu u proudového výstupu je tato závislost obrácená, tedy  $Z_{in} \ll Z_{out}$ . Schéma zapojení těchto senzorů je na obrázku 2.5a a 2.5b na straně 9.

Mezi analogové senzory patří též senzory s frekvenčním výstupem. Zde měřená je hodnota převedena na změnu frekvence nebo fáze výstupu. Zapojení je ve většině případů shodné se zapojením s napěťovým výstupem.

V případě senzorů s digitálním výstupem je výstupní impedance definována použitým rozhraním a tak nemá zásadní vliv na zapojení senzoru. Pokud však používáme vysokofrekvenční rozhraní, tak je nutné impedance přizpůsobit vedení mezi senzorem a měřícím zařízením [4].





(a) : Zapojení s napěťovým výstupem (b) : Zapojení s proudovým výstupem

Obrázek 2.5: Výstupní impedance senzorů [6]

### 2.2.2 Dynamické parametry

Pokud změny senzorem měřeného signálu probíhají velmi pomalu, tak není třeba zavádět žádné dynamické parametry. Pokud ovšem změny probíhají rychle, tak je potřeba počítat s tím, že každý reálný systém vykazuje určitou míru setrvačnosti. Tento jev je způsoben nějakou formou kapacity (tepelné, elektrické, atd.) a je popsitelný pomocí diferenciální rovnice [1].

Pokud obsahuje senzor pouze jeden kapacitní prvek, dochází k určitému zpoždění výstupu za vstupem a dochází tedy k fázovému posunu. Zároveň dochází k poklesu citlivosti senzoru až do takové míry, kdy již není senzor prakticky použitelný. Frekvenci při které dojde k poklesu citlivosti o 3dB se nazývá mezní frekvence.

Má-li senzor více kapacitních prvků, je potřeba k jeho popisu diferenciální rovnice druhého nebo vyššího řádu a situace je výrazně komplikovanější. Již nestačí znát pouze mezní frekvenci, ale je potřeba znát další parametry jako jsou odezva na skokovou změnu vstupního signálu a vlastní frekvence. v některých případech zapojení senzoru by bez znalosti těchto parametrů mohlo dojít k nežádoucí oscilaci výstupního signálu, kterou je třeba potlačit vhodným tlumením a zajištění správného rozsahu vstupních frekvencí.

U některých senzorů je naopak možné vlastní frekvence využít, příkladem může být senzor tříštění skla, který je kalibrován na frekvenci shodnou s akustickými vibracemi praskajícího skla, tím je dosaženo velké citlivosti a selektivity na tento konkrétní vjem.

### 2.2.3 Vliv prostředí

V praxi se můžeme setkat s celou škálou rušivých vlivů, které ovlivňují chování senzoru. Tyto rušivé vlivy se mohou pohybovat v rozsahu od minimálních hodnot srovnatelných s šumem až po takové hodnoty, kdy bez určité formy kompenzace není možné senzor v praxi použít. Mezi nejčastější vlivy které musíme uvažovat patří teplota, tlak, vlhkost nebo elektromagnetické záření.

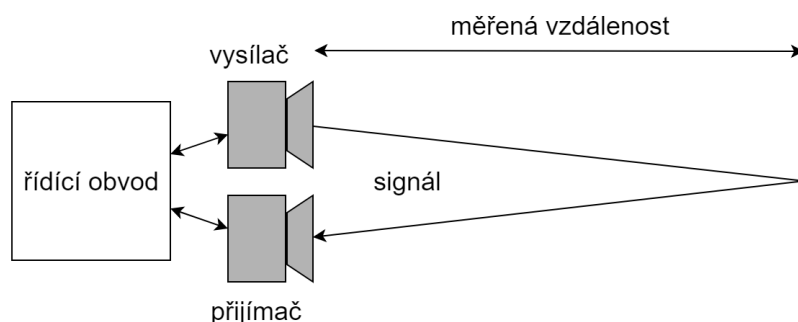
Typickým příkladem senzoru, který nelze bez teplotní kompenzace použít, je senzor vlhkosti. Jeho závislost na teplotě je extrémně velká a v praxi se

u moderních senzorů používá kombinovaný senzor vlhkosti a teploty společně s vyhodnocovací logikou [35], která na základě tabulky hodnot určuje příslušnou výstupní hodnotu.

## Kapitola 3

### Měření vzdálenosti

Základním principem měření vzdálenosti je obecně vyslání signálu, který po odrazu od předmětu, jehož vzdálenost měříme, změní svoje parametry. Tato změna je následně detekována senzorem a převedena na výstup. Obecně tedy jakýkoliv senzor měřící vzdálenost obsahuje minimálně vysílač a přijímač, viz. obrázek 4.1. Jaký vyslaný signál je použit a jaká změna je detekována závisí na použité konstrukci. Zde uvádím tři nejčastější metody.



Obrázek 3.1: Znázornění měření vzdálenosti [1]

### 3.1 Intenzita odraženého signálu

Jednou z možností měření vzdálenosti je využití rozptylu vysílaného signálu v okolním prostředí. Senzor v tomto případě obsahuje zdroj záření, typicky infračervenou LED, která ozařuje zorné pole senzoru. Nachází-li se v zorném poli předmět, tak se záření z infračervené diody odráží směrem zpět k senzoru a dopadá na fotodetektor, typicky fotodiodu, na které vznikne napětí. Vzhledem k tomu, že napětí fotodiody závisí na dopadajícím výkonu a ten je ovlivněn rozptylem záření, které závisí na uražené dráze. Z tohoto napětí je poté možné určit vzdálenost předmětu [1]. Tento princip má ovšem mnoho nedostatků.

Ačkoliv je takový senzor konstrukčně velice jednoduchý a spolehlivý, tak není v praxi reálně použitelný pro měření vzdálenosti. Hlavním problémem je zde částečné pohlcení výkonu vysílaného záření v detekovaném předmětu, jehož míra navíc závisí na vlastnostech odražejícího povrchu. Není-li předem

známa odrazivost, tak jej lze použít pouze jako detektor přítomnosti, pro měření vzdálenosti, by bylo totiž nutné jej nakalibrovat pro konkrétní aplikaci.

Dalším problémem je malý rozsah měření, který je omezen jak v malých i velkých vzdálenostech. Protože závislost míry rozptýleného záření na vzdálenosti je značně nelineární, tak se dopadající výkon může lišit v různých vzdálenostech o několik řádů. To vede k tomu, že při extrémní blízkosti předmětu u senzoru je dopadající výkon dostatečně velký, aby se fotodetektor dostal do saturace. Naproti tomu ve větších vzdálenostech je dopadající výkon pod hranicí detekovatelnosti. Určitým způsobem je možné zlepšit rozsah použitím pulzního režimu [1], kdy infračervená dioda vysílá v krátkých pulzech s vysokou intenzitou.

Jako příklad běžně dostupného senzoru tohoto typu bych uvedl VCNL3020 od firmy Vishay [15].

## 3.2 Triangulace

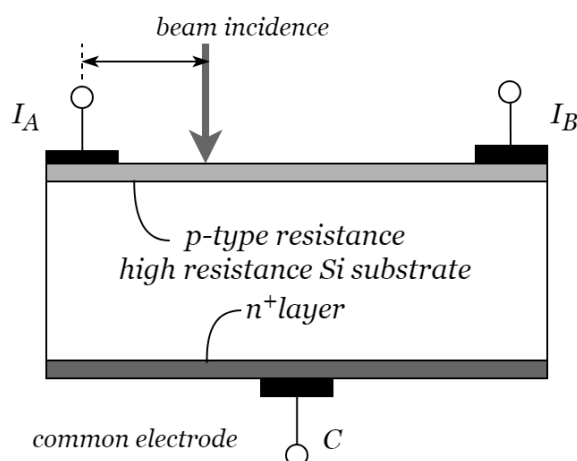
Pro přesná měření vzdálenosti se nabízí alternativa ve formě měření s využitím triangulace, kdy se vzdálenost určuje pomocí úhlu dopadu a následného výpočtu. Tím je za ideálních podmínek eliminována silná závislost převodní funkce senzoru na vlastnostech povrchu detekovaného předmětu, respektive jeho odrazivosti. Integrovaný senzor založený na principu triangulace může využívat infračervenou LED nebo laser a takzvaný PSD prvek.

### 3.2.1 PSD

PSD představuje polovodičovou součástku, která je v kombinaci s vhodným optickým prvkem schopná udávat informaci o směru příchozího záření. Skládá se z PN přechodu do něhož je vložena vrstva s vysokým odporem a tří elektrod. Jedna společná elektroda je připojena na vrstvu  $n^+$  a dvě snímací elektrody jsou připojeny k okrajům horní vrstvy p. Na obrázku 3.2 na straně 13 je toto uspořádání přehledně znázorněno.

Funkce tohoto senzoru využívá kombinace fotoelektrického jevu na křemíkové vrstvě s vysokým odporem. Při dopadu záření na senzor dojde ke generování volných nosičů náboje v PN přechodu a tedy i vzniku napětí. Jsou-li snímací elektrody připojeny přes měřicí odpory se společnou elektrodou, bude jimi procházet proud. Zároveň bude velikost těchto proudů záviset na intenzitě dopadajícího záření a místě dopadu. Bude-li místo dopadu paprsku blíže jedné z elektrod, tak jí poteče větší proud, odpor mezi místem dopadu a elektrodou bude menší. Vlastní měření se poté provede porovnáním proudů  $I_A$  a  $I_B$ , čímž se potlačí závislost na intenzitě a vzdálenost je poté možné určit přepočtem.

Běžně dostupným senzorem tohoto typu je například GP2Y0A60SZ0F od firmy Sharp [16].



Obrázek 3.2: Vnitřní struktura jednorozměrného PSD [1]

### 3.3 Doba letu signálu

Poslední používanou metodou, kterou bych zde chtěl uvést, je měření vzdálenosti pomocí doby letu signálu. Její princip je v základu velice prostý, vysílač vyšle zvolený signál, ten určitou definovanou dobu letí k překážce, poté se odrazí a opět určitou dobu letí zpět k přijímači. Určení vzdálenosti je pak možné z následující rovnice 3.1:

$$L_0 = \frac{1}{2}vt \quad (3.1)$$

kde  $L_0$  je měřená vzdálenost,  $v$  je rychlost šíření signálu v prostředí a  $t$  je doba letu signálu k objektu a zpět.

#### 3.3.1 Ultrazvuk

Dlouhodobě používaným senzorem, který využívá tohoto principu je ultrazvukový senzor. Ultrazvuk má relativně malou rychlost šíření, tedy i dostatečně dlouhou dobu letu a je tak možné k vyhodnocování použít konstrukčně jednoduché obvody.

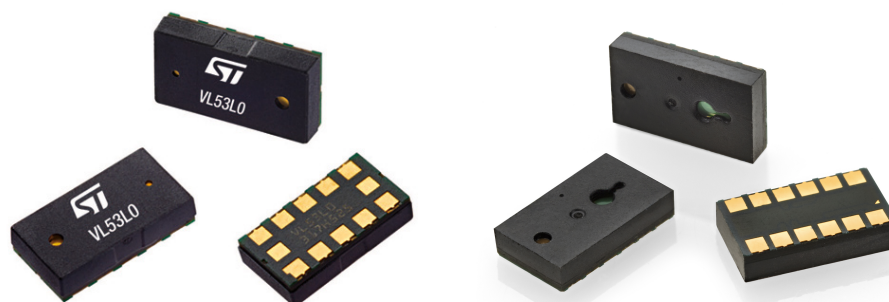
Signál ultrazvuku se generuje ve formě pulzů v piezoelektrickém prvku, který může sloužit i jako přijímač, protože piezoelektrický jev funguje obousměrně [1]. Měřicí rozsah ultrazvukového senzoru je ale značně závislý na výkonu piezoelektrického prvku a na prostředí, ve kterém se zvuková vlna šíří. Například ve vodě je možné s výkonným sonarem s výkonným měřit vzdálenosti i v rádech kilometrů [40], naproti tomu ve vzduchu se používají senzory s dosahem v řádu metrů.

### 3.3.2 IR laser

Zvýšení dosahu a přesnosti měření je možné při zúžení vysílaného signálu do úzkého svazku. Velmi vhodný je pro tento účel laser, jehož použití ale bylo dlouhou dobu možné pouze na velkých vzdálenostech. Rychlost šíření elektromagnetického vlnění je v porovnání se zvukem o několik řádů vyšší a při měření na krátkých vzdálenostech se již dostáváme na doby letu pod  $10^{-9}$  sekundy a vyhodnocovací logika by tak musela pracovat na frekvencích v řádech GHz.

Změnu přinesl až vývoj senzorů druhé generace, kde díky specializované integrované logice a integrovaným rychlým analogovým prvkům je nyní možné takto rychlé signály vyhodnotit.

Příkladem takového senzoru jsou VL53L0X a VL6180X od STMicroelectronics [30]. Jedná se o inteligentní ToF senzory pro měření vzdálenosti kombinované s vyhodnocovací logikou s potlačením rušivých vlivů a konfigurační pamětí [8]. Senzory jsou založeny na měření doby letu impulsu z laserové diody dopadajícíím po odrazu na lavinovou diodu - SPAD. Senzor VL6180X, který navíc obsahuje integrovaný snímač okolního osvětlení bude dále použit v této práci.



(a) : Senzor VL53L0X [9]

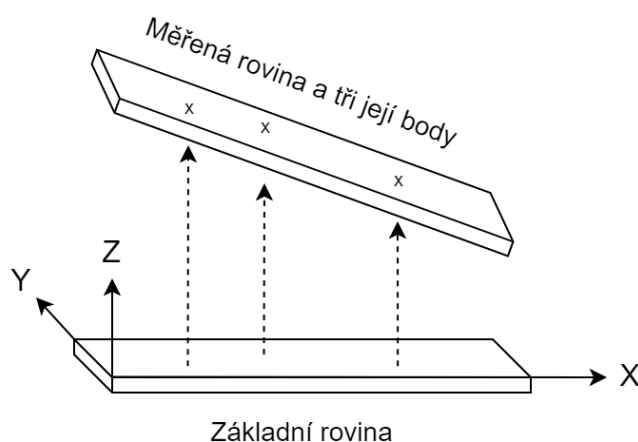
(b) : Senzor VL6180X [8]

Obrázek 3.3: ToF senzory STMicroelectronics

## Kapitola 4

### Měření náklonu a detekce gest

Pro zjednodušení celého návrhu nyní nahradím pro další úvahy celý systém jednoduchým geometrickým modelem. Zařízení, jehož umístění předpokládám na stole, nahradím základní rovinou ve vodorovné poloze v kartézské soustavě souřadnic - osy  $x$  a  $y$  leží v této a osa  $z$  je na ní kolmá. Detekovaný objekt nebo dlaň nahradím v modelu též rovinou, jejíž pozici vůči základní rovině budu určovat. Vlastní měření si poté představím jako spouštění kolmic ze základní roviny směrem k měřené rovině, kde hledám průnik, viz obrázek 4.1.



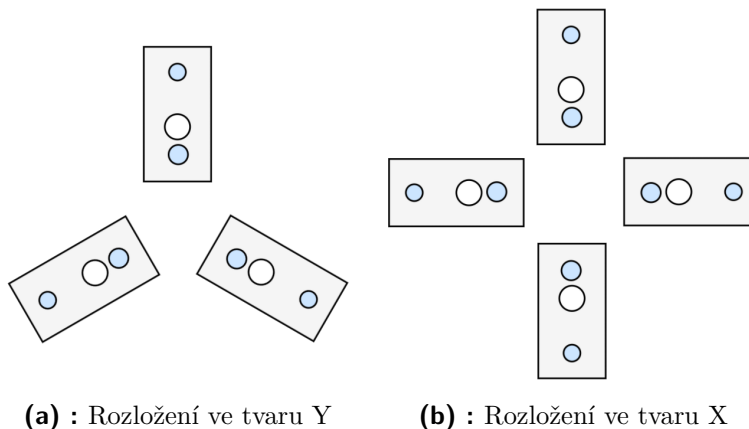
Obrázek 4.1: Model určování náklonu

K určení přesné polohy roviny v prostoru je z matematického hlediska dostačující znát pouze tři body roviny, které neleží na přímce (zahrnuto též v obrázku 4.1). Případně mi stačí znát jeden bod a dva vektory rovnoběžné se zadanou rovinou [5]. Poté mohu sestavit soustavu rovnic popisující danou rovinu a případně zjednodušit popis na jeden bod a normálový vektor.

#### 4.1 Uspořádání senzorů

Požadavkům vyplývajícím z matematického modelu odpovídá i první navrhované rozložení senzorů, které jsem se rozhodl umístit do kruhu, a jejich počet, který musí být minimálně roven třem, viz. obrázek 4.2a.

V tomto případě jsem se rozhodl použít senzory čtyři, viz. obrázek 4.2b, bude díky tomu možné měření zpřesnit a systém bude odolný proti případným rušením nebo i případnému úplnému selhání jednoho ze sensorů.

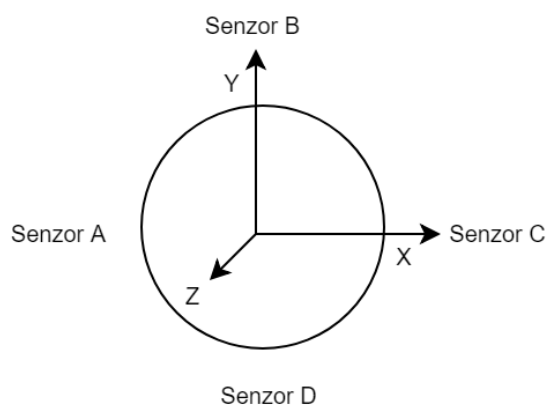


(a) : Rozložení ve tvaru Y      (b) : Rozložení ve tvaru X

**Obrázek 4.2:** Matice možných rozložení sensorů

## 4.2 Výpočet

Při vyhodnocování polohy roviny je díky zvolenému uspořádání soustavy souřadnic jedinou neznámou vždy pouze souřadnice na ose  $z$ . Souřadnice  $x$  a  $y$  jsou shodné pro všechny body na každé ze spouštěných přímk, protože jsou rovnoběžné s osou  $z$ . v praxi jsou souřadnice  $x$  a  $y$  shodné se souřadnicemi sensorů. Pro zpřehlednění situace budu dále považovat jako počátek soustavy souřadnic střed mezi senzory, viz. následující obrázek.



**Obrázek 4.3:** Uspořádání sensorů v soustavě souřadnic



Chci-li nyní jasně popsat pozici měřené roviny a označím-li si jednotlivé body v rovině jako  $A$ ,  $B$ ,  $C$  a  $D$ , tak mohu výpočet popsat následující rovnicí:

$$\vec{n} = \mathbf{CA} \times \mathbf{DB} \quad (4.1)$$

kde  $\vec{n}$  je normálový vektor roviny,  $\mathbf{CA}$  je vektor z bodu  $C$  do bodu  $A$  a  $\mathbf{DB}$  je vektor z bodu  $D$  do bodu  $B$ .

Díky tomu, že některé dílčí souřadnice již předem znám a mám vhodně zvolenou soustavu souřadnic, tak mohu popsat souřadnice bodů následujícím způsobem:

$$A = [-r, 0, Z_A], B = [0, r, Z_B], C = [r, 0, Z_C], D = [0, -r, Z_D] \quad (4.2)$$

kde  $r$  je poloměr kruhu, na kterém se nachází senzory. Dále mohu optimalizovat výpočet normálového vektoru na jednu jedinou rovnici, viz. následující postup:

$$\vec{n} = (A - C) \times (B - D) \quad (4.3a)$$

$$\vec{n} = ([r, 0, Z_A] - [-r, 0, Z_C]) \times ([0, r, Z_B] - [0, -r, Z_D]) \quad (4.3b)$$

$$\vec{n} = [2r, 0, Z_A - Z_C] \times [0, 2r, Z_B - Z_D] \quad \dots \quad \text{úprava} \quad 2r = d \quad (4.3c)$$

$$\vec{n} = [d \cdot (Z_A - Z_C), d \cdot (Z_B - Z_D), d^2] \quad \dots \quad \text{úprava} \quad \cdot \frac{1}{d} \quad (4.3d)$$

$$\vec{n} = [Z_A - Z_C, Z_B - Z_D, d] \quad (4.3e)$$

Jeden bod roviny, který označím  $S$ , mohu poté definovat jako:

$$S = [0, 0, (Z_A + Z_B + Z_C + Z_D)/4] \quad (4.4)$$

## 4.3 Vyhodnocení gesta

Jestli nastalo předem definované gesto, vyhodnocuji z tohoto modelu v reálném čase, pouze na základě aktuální hodnoty normálového vektoru a bodu  $S$ . Nesleduji tedy průběh v čase a není proto použita žádná paměť pro předchozí hodnoty. Tím mám sice velice omezené možnosti, na druhou stranu je toto pro účely demonstrování mého funkčního principu dostačující.



## Kapitola 5

### Problematika napájecích zdrojů

Funkční blok napájení je klíčovou součástí většiny elektronických systémů a jeho zapojení může zásadně ovlivnit provozní parametry výsledného zařízení. V tomto případě je nejcitlivějším prvkem senzor, který je z převážné části digitální, ale obsahuje citlivé analogové prvky, jako SPAD, jejichž chování by mohlo být negativně ovlivněno nestabilitou napájení a mohlo by způsobovat značné nepřesnosti měření. Ačkoliv tedy není hlavním cílem této práce návrh zapojení spínaného zdroje ani lineárního stabilizátoru, tak se nyní okrajově zmíním o některých jejich parametrech, které budu při zprovoznování konstruovaného hardwaru ověřovat.

#### 5.1 Zvlnění

Každý reálný napájecí zdroj vykazuje určitou míru nestability, respektive jeho výstupní napětí obsahuje jak stejnosměrnou, tak střídavou složku. Tato střídavá složka je označována jako zvlnění a představuje nežádoucí jev, který je třeba pokud možno potlačit. Zdrojem tohoto zvlnění je typicky částečný přenos střídavých složek ze vstupu zdroje na výstup, případně pak jeho vlastní oscilace v důsledku nestability [2].

Vzhledem k tomu, že se v současnosti spínané zdroje a lineární stabilizátory vyrábějí jako integrované obvody se svými specifickými vlastnostmi, tak je nutné se držet doporučení výrobce. Hlavním faktorem, který může zlepšit nebo zhoršit vlastnosti zvoleného zapojení a kterému je třeba věnovat pozornost, je volba správných kondenzátorů na vstupu a výstupu zdroje.

#### 5.2 Šum

Zdrojem šumu v lineárních stabilizátorech je nejčastěji tepelný šum napěťové reference zesílený vnitřním zesilovačem, který řídí výstup. Naproti tomu největším zdrojem šumu ve spínaných zdrojích je vlastní spínání, respektive jím generované vyšší harmonické, které se poté šíří po napájení do celého zařízení. Obecně lze v tomto směru konstatovat, že spínané zdroje generují více šumu, ale jsou efektivnější. Lineární stabilizátory jsou méně efektivní, ale mají hladší průběh výstupního napětí [2].

Obzvláště u SMPS má zásadní vliv rozložení součástek na DPS, kde je třeba minimalizovat plochy všech proudových smyček, aby nedocházelo k nežádoucímu vyzařování [4]. u obou typů zdrojů je nutné zajistit dostatečný odvod tepla.

# Kapitola 6

## Hardware

Vlastní návrh hardwaru byl poměrně rozsáhlou činností, kterou jsem provedl v následujících krocích:

- návrh základního blokového schématu s jednotlivými funkčními bloky, propojení mezi nimi a napájením.
- kreslení funkčního schématu s výběrem konkrétních elektronických komponent.
- návrh DPS a generování výrobních dat.

Při výběru součástek jsem se omezil, pokud to bylo možné, na součástky od firmy STMicroelectronics nebo na součástky z dostupných zásob v Laboratořích pro Vývoj a Realizaci. Důvodem byl mimo jiné zájem o snížení výrobních nákladů prototypu.

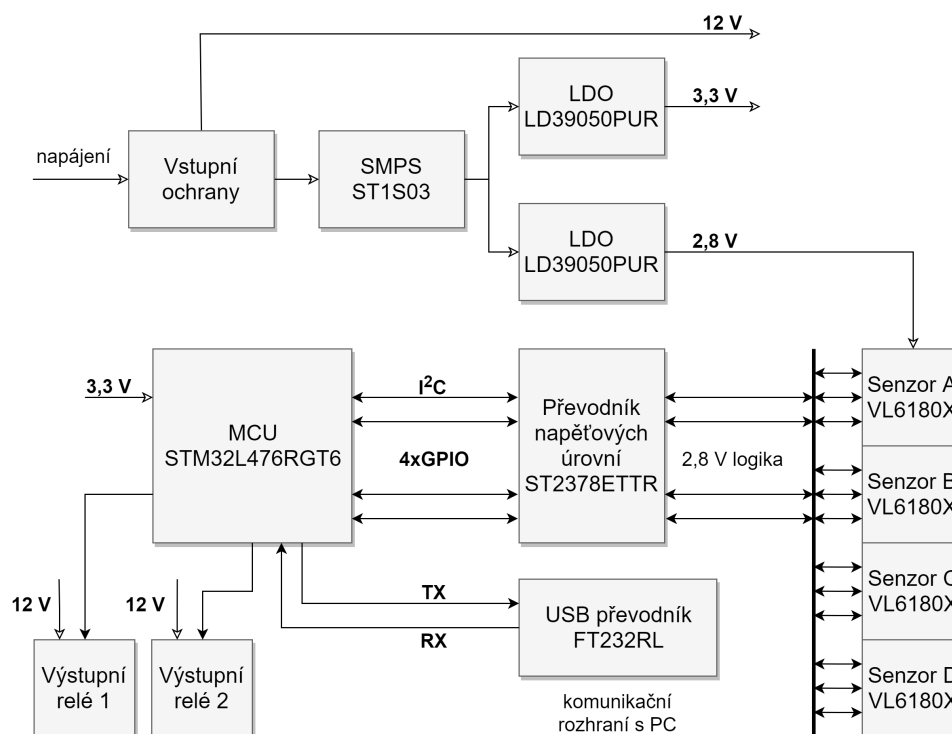
### 6.1 Blokové schéma

Blokové schéma vychází přímo ze zadání této práce. Rozsáhlejší úvahy vyžadovala sekce napájení a nutným dodatkem byla sekce převodníku logických úrovní. Vytvoření blokového schématu pro mě představovalo zásadní krok. Díky grafickému znázornění zadání jsem si mohl vytvořit jasnější představu o struktuře navrhovaného zařízení. Zároveň posloužilo jako základ hierarchického schématu v programu pro návrh DPS.

Na obrázku 6.1 na straně 22 je k nahlédnutí ve verzi, která již obsahuje částečně informace o některých konkrétních elektronických součástkách. Důvodem výběru konkrétních součástek se budu věnovat v následující podkapitole.

### 6.2 Funkční schéma

Pro návrh vlastního zařízení jsem použil návrhový prostředek KiCad, který je přístupný volně ke stažení, viz. [24]. Hlavní motivací byla otevřenost programu, jeho rozšířenost a dostatečná funkcionálnost.



Obrázek 6.1: Blokové schéma obvodu

### 6.2.1 Matice senzorů

První blok, na který jsem se zaměřil, byla matice senzorů VL6180X. Největší pozornost jsem zde věnoval zapojení I2C sběrnice, kde jsem zvažoval využít více sběrnic pro rychlejší komunikaci, ale po podrobnějším prozkoumání dokumentace senzorů jsem došel k závěru, že jedna sběrnice bude dostačující. Zároveň jsem se rozhodl, že nebudu používat výstup signalizace přerušování, protože senzory budou pro účely mé práce v nepřerušovaném provozu. Ostatní části zapojení vychází z referenčního návrhu a doporučení výrobce, viz. [8] a [14]. Výsledné zapojení je k nahlédnutí v příloze B, list 4/7.

### 6.2.2 Mikrokontrolér

Při výběru jsem se snažil zaměřit na parametry jako jsou: nízká spotřeba, velký výběr periférií a dostatečný výpočetní výkon. Též jsem se rozhodl v tomto směru omezit na mikrokontroléry s dostupným vývojovým kitem Nucleo64 (viz. [10]), což mi umožnilo v kombinaci s rozšiřující deskou se senzorem VL6180X (viz. [11]) provádět testování ještě před zprovozněním navrhovaného zařízení. V souladu s těmito požadavky jsem zůstal u doporučeného mikrokontroléru STM32L476RG v pouzdru LQFP100.

Při návrhu zapojení jsem se držel z velké části doporučení v dokumentaci výrobce, jedinou zásadnější úpravou z mé strany bylo doplnění skupinového blokovacího kondenzátoru  $4,7\mu\text{F}$  nad rámeček doporučovaných blokovacích

kondenzátorů 100nF. Záměrem byla snaha o co nejstabilnější napájení. Blok mikrokontroléru jsem dále doplnil o čtyři indikační LED, které budou sloužit k indikaci činnosti senzorů, dvě tlačítka a konektor pro programovací rozhraní STLink verze 2. Výsledné zapojení je k nahlédnutí v příloze B, list 7/7.

### ■ 6.2.3 Napájení

Vzhledem k již stručně zmíněným vlastnostem spínaných zdrojů a lineárních stabilizátorů jsem se rozhodl využít jejich kombinaci. Tím jsem získal částečně výhody obou přístupů, vysokou efektivitu a zároveň nízký šum na napájení.

#### ■ Vstupní ochrany

Před samotnou sekcí napájení jsem zařadil tři prvky, které slouží k ochraně celého obvodu:

- transil - chrání vstup před krátkodobým přepětím
- proudová pojistka - rozpojí napájení při nadlimitním odběru proudu
- dioda - ochrana proti prohození polaroty vstupního napětí

V některých aspektech jsem zvolil předimenzované komponenty, například jako pojistku jsem použil tavnou pojistku, ačkoliv jsem mohl použít polymerovou vratnou pojistku. Důvodem byly špatné předchozí zkušenosti s polymerovými pojistkami, které vypínají i v případě přehřátí.

#### ■ SMPS

První část napájení tvoří SMPS, který snižuje vstupní napětí z 12 V na méně než 5 V. Vstupních 12 V jsem zvolil kvůli velké rozšířenosti a tím velké dostupnosti síťových adaptérů na toto napětí. Výstupní napětí do 5 V je více než dostačující pro navazující sekci LDO, mohlo by být případně i nižší.

Jádro spínaného zdroje tvoří integrovaný obvod ST1S03 [18], určený pro řízení spínaných zdrojů s výstupním proudem do 1,5 A. ST1S03 jsem zvolil převážně kvůli malým rozměrům jak vlastního obvodu, tak doporučených součástek. Obvod byl navržen pro funkci přímo s keramickými kondenzátory, které na rozdíl elektrolytických nezabírají tolik prostoru na DPS.

Důležitou součástí obvodu je cívka, u které byl hlavním limitujícím parametrem saturační proud. Dle doporučení v dokumentaci ST1S03 jsem zvolil indukčnost cívky 3,3  $\mu\text{H}$ . Ze svých zásob jsem následně vybral SRN4026-3R3M [20] se saturačním proudem 1,6A, což je na těsně nad hranici výstupního proudu zdroje a mohlo by to způsobit případné komplikace, na druhou stranu nepředpokládám, že by zdroj byl reálně takto zatížen.

Dioda u navrhovaného zdroje spíná s poměrně vysokou frekvencí až 1,5 MHz a proto u jejího výběru byla kritická doba závěrného zotavení, tedy doba za kterou přejde dioda z propustného stavu do závěrného při změně polaroty napětí. Zároveň by z hlediska účinnosti spínání měla mít co nejnižší propustné

napětí, proto jsem zvolil Schottkyho diodu. Konkrétně jsem vybral diodu MBR120VLSFT1G, která splňuje tyto požadavky [19].

## ■ LDO

Druhou část napájení tvoří dvě LDO s výstupními napětími 3,3 V a 2,8 V. Zde jsem se rozhodl použít univerzální přístup, tedy použít jeden typ nastavitelného stabilizátoru a pro každou větev pouze přidat jiné rezistory na nastavení výstupního napětí.

Konkrétně jsem zvolil typ LD39050PUR [21], protože jsem měl jeho funkčnost ověřenou z vývojového kitu se senzory VL6180X. Zároveň mě zaujala jeho funkce indikace přetížení výstupu pomocí indikační LED. Výsledné zapojení je k nahlédnutí v příloze B, list 2/7.

## ■ 6.2.4 Převodník logických úrovní

Zařazení převodníku logických úrovní bylo nutností vzhledem k rozdílným logickým úrovním senzorů a mikrokontroléru. Rozhodl jsem se zde pro ST2378ETTR, jehož funkčnost jsem měl již ověřenou na rozšiřující desce se senzory VL6180X. Odkud jsem převzal i jeho zapojení [11], které je k nahlédnutí v příloze B, list 3/7.

## ■ 6.2.5 Výstupní relé

Pro výstupní relé jsem měl pouze jeden požadavek a to spínaný proud minimálně 2 A. To je dostačující k spínání menšího zařízení nebo stolní lampy pro demonstrační účely. Rozhodl jsem se použít relé Finder 40.52 [22], které jsem získal darem do svých vlastních zásob.

K jeho spínání jsem zvolil modifikaci rozšířeného NPN tranzistoru 2N3904 v pouzdru SOT23 označenou MMBT3904 [23]. Výsledné zapojení je k nahlédnutí v příloze B, list 5/7.

## ■ 6.2.6 USB a sériová linka

Ačkoliv má zvolený mikrokontrolér ve své výbavě rozhraní USB, tak jsem se rozhodl využít sériovou linku v kombinaci s externím převodníkem. Zvolil jsem FTDI FT232R, protože se jedná o rozšířený převodník, o kterém jsem na základě svých předchozích zkušeností věděl, že nemá problémy s kompatibilitou s různými operačními systémy. Tím jsem chtěl předejít případným komplikacím při zprovoznování zařízení. Výsledné zapojení převzaté přímo z dokumentace výrobce [17] je k nahlédnutí v příloze B, list 6/7.

## ■ 6.3 Návrh DPS

Návrh tištěného spoje je sám o sobě rozsáhlou problematikou. Zahrnuje témata jako jsou:



- šířky cest při proudovém zatížení,
- impedanční přizpůsobení cest,
- elektromagnetické vyzařování vyzařování a stínění,
- ladění délek diferenciálních párů a směrnic,
- izolační vzdálenosti pro velká napětí,
- ochrana před elektrostatickými výboji,
- spínání induktivních zátěží,
- vedení tepla a chlazení komponent,
- atd.

Její kompletní vysvětlení je nad rámec této práce, proto se zmíním pouze o pro tuto práci nejdůležitější části, kterou je rozmístění senzorů. Výsledné rozložení DPS se nachází v příloze B.

### ■ 6.3.1 Rozmístění senzorů

V předchozích kapitolách jsem již vysvětlil důvody, které mě vedly k tomu, použít čtyři senzory rozmístěné do kruhu. Nezodpovězenou otázkou ale zůstává, jaký má být z funkčního hlediska jeho poloměr? Při jeho určení budu vycházet z následujících parametrů:

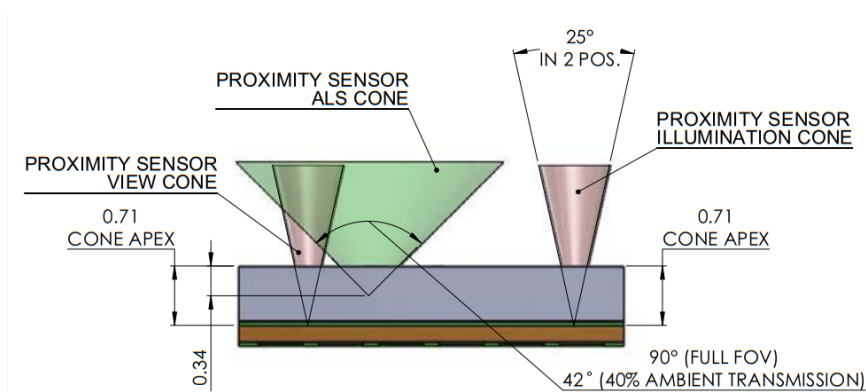
- rozměry DPS
- rozměry detekovaného objektu nebo dlaně při detekci gest
- zorné pole senzoru

### ■ Omezující parametry

Rozměry DPS nepředstavují zásadní omezení, protože nejsem tomto směru nijak limitován. Navrhované zařízení je samostatným funkčním celkem, který nebude nikam zabudován, a tak je mým jediným zájmem, aby DPS byla v rámci možností co nejmenší.

Ani rozměry detekovaného objektu mi zde příliš nepomohou, škála rozměrů se kterými se lze setkat je příliš velká a tak ani zde není možné určit konkrétní hranice.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl vyjít ze zorného pole senzoru. Jeho šířka s dalšími rozměrovými parametry je popsána na následujícím obrázku 6.2.



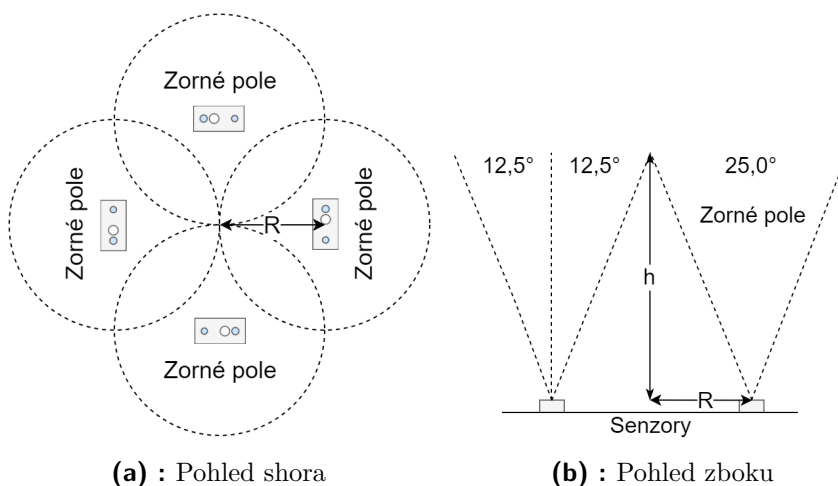
Obrázek 6.2: Boční řez senzoru VL6180X [8]

### ■ Výpočet

Při výsledném výpočtu jsem vyšel z již zmíněných omezujících parametrů a předpokladu, že maximální vzdálenost měření bude  $h = 20$  cm. Zároveň jsem se snažil splnit navíc následující dva požadavky:

- aby v prostoru nad senzory nebylo hluché místo, které by svým zorným polem nepokrýval žádný ze senzorů.
- aby se zorná pole senzorů kvůli vzájemnému rušení překrývala jen minimálně.

Nyní již vím jak vhodný poloměr zvolit. Pro názornost na obrázcích 6.3a a 6.3b uvádím náhledy výsledného uspořádání a dále rovnici 6.1, kterou jsem použil pro výpočet. Vypočtený poloměr činí 2,2 cm.



(a) : Pohled shora

(b) : Pohled z boku

Obrázek 6.3: Výsledné rozložení senzorů

$$R = h \cdot \operatorname{tg}(12,5^\circ) \quad (6.1)$$

## 6.4 Osazení a zprovoznění

Vzhledem k technologickým prostředkům, které jsem měl k dispozici jsem se rozhodl pro ruční osazení DPS. Zapájení většiny součástek nepředstavovalo komplikaci, větší pozornost vyžadovala pouze DFN pouzdra integrovaných obvodů řídicích napájení a LGA pouzdra senzorů VL6180X, kvůli jejich kontaktům na spodní straně.

Vlastní zprovoznění jsem prováděl po jednotlivých funkčních blocích s nad míru pozitivním výsledkem, tedy bez žádných zjevných závad či komplikací. Na závěr následovalo omytí čistícím prostředkem a vysušení.

### 6.4.1 Nefunkčnost senzorů

Po prvotní kontrole funkčnosti senzorů se ve fázi, kdy jsem již začal psát zdrojový kód vlastního softwaru, ukázalo, že dva senzory nekomunikují správně a mají problémy s měřením vzdálenosti. V průběhu několika dní tyto dva senzory přestaly komunikovat úplně a navíc se stejná závada objevila na třetím senzoru.

Následovalo hledání příčiny vyřazovací metodou, kdy jsem provedl následující tři kroky:

- ověření funkčnosti prvotního softwaru,
- kontrola správného zapájení,
- prověření jiných závad, například viditelná mechanická poškození.

Po hlubším prozkoumání softwaru, jsem nenašel žádnou závadu. U všech senzorů se mi podařilo navázat znovu komunikaci po I2C sběrnici a provést čtení nebo zápis do jejich vnitřních registrů. Přesunul jsem tedy svojí pozornost k hardwaru.

Pro ověření kvality zapájení jsem si zajistil snímkování na RTG. Vzhledem k tomu, že senzory mají kontakty pouze zespoda, tak jsem mimo elektrického testování neměl jinou možnost inspekce. Výsledné snímky je možné vidět na obrázcích v příloze D. Ze snímků vyplývá, že ačkoliv množství cínu na jednotlivých kontaktech není rovnoměrné, přesto jsou všechny kontakty zapájeny.

Souběžně s kontrolou na RTG jsem provedl optickou kontrolu pod mikroskopem pro případné mechanické závady a zaregistroval jsem, že pravděpodobně do senzorů vnikla kapalina. Po hlubším prozkoumání dokumentace senzoru [8] se mi podařilo tuto hypotézu potvrdit, podle specifikací výrobce totiž není pouzdro senzoru utěsněné a mělo by tedy být pájeno suchými postupy. Příčinou závady tedy byl pravděpodobně použitý čistící prostředek.

Na základě zjištěných faktů, jsem tedy došel k závěru, že jedinou možností opravy je kompletní výměna senzorů za nové. Vzhledem k tomu, že jsem měl k dispozici náhradní, tak jsem provedl výměnu na horkovzdušném pájecím zařízení. Po tomto zásahu již bylo celé zařízení funkční.



# Kapitola 7

## Software

Software zařízení provádí čtení a zpracování dat ze senzorů. Dále tato data vyhodnocuje a reaguje předem definovaným způsobem definovanou odezvou jako sepnutí relé nebo odeslání dat do PC pro účely dalšího případného vyhodnocení nebo ladění nastavení. Následující blokový diagram 7.1 na straně 30 názorně zobrazuje celkovou strukturu programu. Funkci jednotlivých bloků vysvětlím podrobněji v sekci *Struktura programu*.

### ■ 7.0.1 Použité nástroje

K programování mikrokontroléru jsem použil následující softwarové nástroje, díky kterým jsem mohl výrazně urychlit proces návrh zdrojového kódu:

- STM32CubeMX - volně dostupný grafický konfigurační nástroj a generátor inicializačního zdrojového kódu, viz. [25]
- System Workbench for STM32 - volně dostupné vývojové prostředí pro ARM mikrokontroléry STMicroelectronics, viz. [26]
- X-CUBE-6180XA1 - softwarové knihovny pro senzor VL6180X, viz. [27]

Obzvláště přínosné bylo použití softwarových knihoven, které obsahují funkce pro konfiguraci a též testování funkce senzoru. Zároveň všechny funkce vrací přesně definované a podrobně zdokumentované chybové hodnoty, a tak je ve většině případů snadné dohledat konkrétní závady.

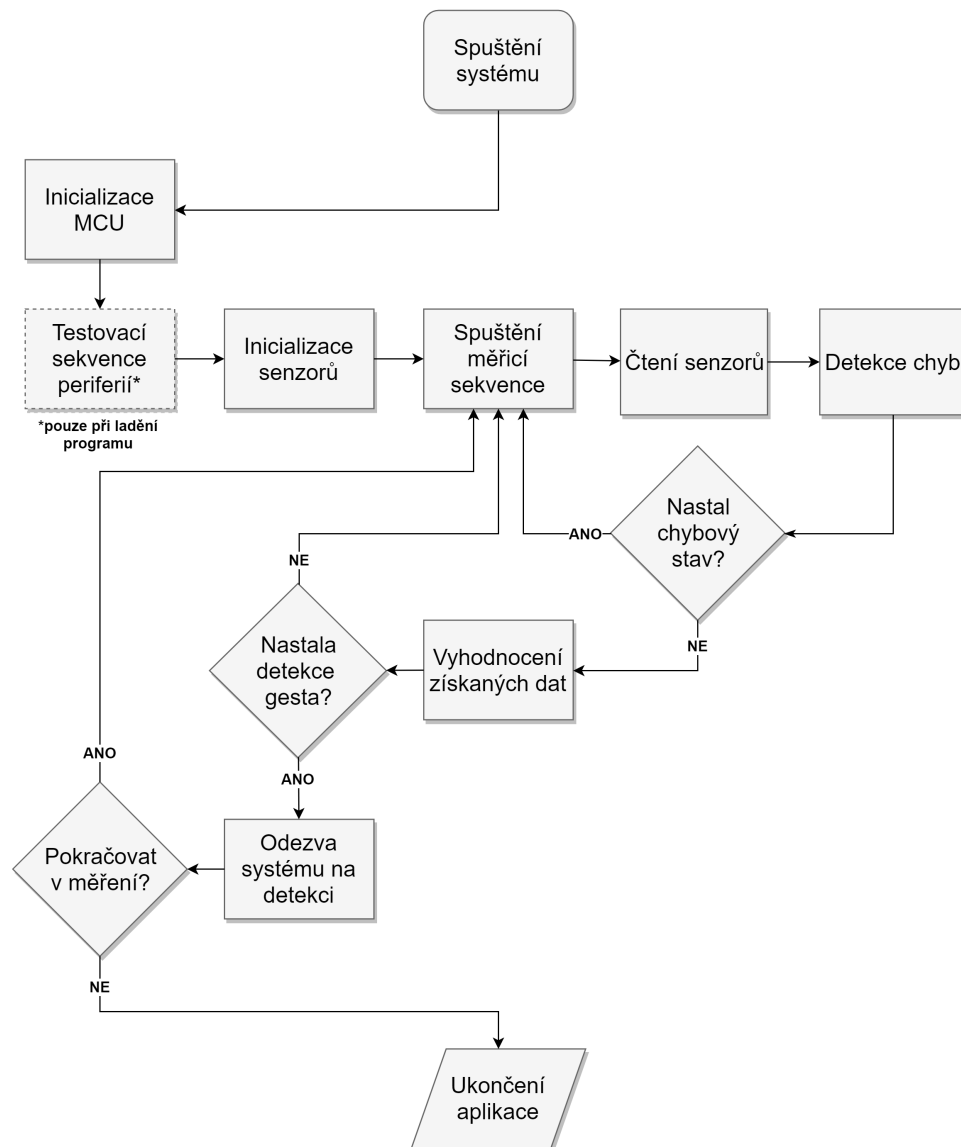
### ■ 7.0.2 Struktura programu

#### ■ Inicializace MCU

První část aplikace provede základní nastavení výpočetní jednotky mikrokontroléru a periférií. Konkrétně se jedná o spuštění krystalových oscilátorů, nastavení generátorů hodinového signálu a následné nastavení a spuštění periférií.

#### ■ Testovací sekvence periférií

V režimu ladění následuje ihned po inicializaci kontrola periférií. Zde provádím kontrolu fungování výstupních relé a indikačních LED. Případně může



Obrázek 7.1: Blokové schéma navrhovaného softwaru

být odeslána informační zpráva o stavu zařízení po sériové lince přes USB převodník.

### ■ Inicializace senzorů

Vzhledem k tomu, že používám čtyři senzory na jedné I2C sběrnici, tak je nutné před spuštěním nastavit každému ze senzorů originální adresu. Nejprve jsou všechny senzory uvedeny do reset módu a poté mikrokontrolér postupně spouští jeden senzor po druhém a přenastavuje adresy.

Po nastavení adres následuje konfigurace, která zajistí jejich správné fungování. Mimo jiné se aktivují interní digitální filtry, potlačení přeslechů a je provedena autokalibrace. V tento moment jsou senzory připraveny k měření.

### ■ Spuštění měřicí sekvence a čtení senzorů

Vlastní měření vzdálenosti probíhá v asynchronním režimu. Sensory nejprve obdrží hromadně příkaz ke spuštění měření a poté se aplikace postupně dotazuje na změřenou hodnotu. Pokud již některý ze senzorů úspěšně dokončil měření nebo nedetekoval v definovaném čase žádný předmět, tak se uvede automaticky do úsporného režimu. Tím je zajištěna úspora energie.

### ■ Detekce chyb

Po měření proběhne detekce chyb, která určí, jsou-li získané hodnoty platné. Typickou detekovanou chybou v tomto případě je hodnota mimo rozsah. Pokud došlo k detekované chybě, tak je měření vynulováno a spustí se nová měřicí sekvence.

### ■ Vyhodnocení získaných dat a odezva systému na detekci

Pokud jsou naměřené hodnoty schváleny, tak následuje jejich přepočítání do geometrického modelu, který byl popsán v kapitole 4. Z tohoto modelu je pak následně vyhodnoceno definované gesto a je spuštěna odpovídající odezva. Podle požadavků poté následuje nová měřicí sekvence nebo ukončení aplikace.





## Kapitola 8

### Testování parametrů systému

Mimo testování parametrů celého systému z pohledu senzorů jsem se zaměřil i na napájecí sekci. Důležité pro mne bylo hlavně ověření stability napájení a následně též celková spotřeba v různých režimech provozu.

#### 8.1 Napájení

##### 8.1.1 Zvlnění a šum

Přesné vyhodnocení zvlnění a šumu by vyžadovalo použití sofistikovanějších měřících metod, což v tomto případě není nutné. Pro základní představu o charakteristice napájecí sekce je zde dostačující změřit efektivní hodnotu zvlnění a šumu v součtu pomocí True RMS voltmetru. Získané hodnoty uvedené v tabulce 8.1 byly změřeny za plného provozu zařízení. Z těchto hodnot vyplývá, že sekce napájení byla navržena kvalitně a je více než dostatečně stabilní.

Napájecí větev	$U_{eff}$ (mV)
5 V za SMPS	10
3,3 V za LDO	3
2,8 V za LDO	3

Tabulka 8.1: Zvlnění napětí napájecího zdroje

##### 8.1.2 Spotřeba

Spotřebu zařízení jsem změřil pro porovnání ve čtyřech různých režimech:

- Power Off - úplné vypnutí zařízení, jde tedy víceméně o klidovou spotřebu napájecí sekce.
- Standby - zařízení je v provozu, ale senzory jsou vypnuté.
- Měření bez přítomnosti objektu - probíhá měření.
- Měření aktivní - probíhá měření a vyhodnocení gest.

Za zmínku stojí porovnání dvou stavů měření, kdy se projeví úsporný režim v případě, že není detekován žádný předmět v dosahu senzoru, viz. tabulka 8.2.

Režim provozu	I (mA)
Power Off	2,8
Standby	12
Měření bez přítomnosti objektu	24
Měření aktivní	40

**Tabulka 8.2:** Spotřeba zařízení v různých režimech

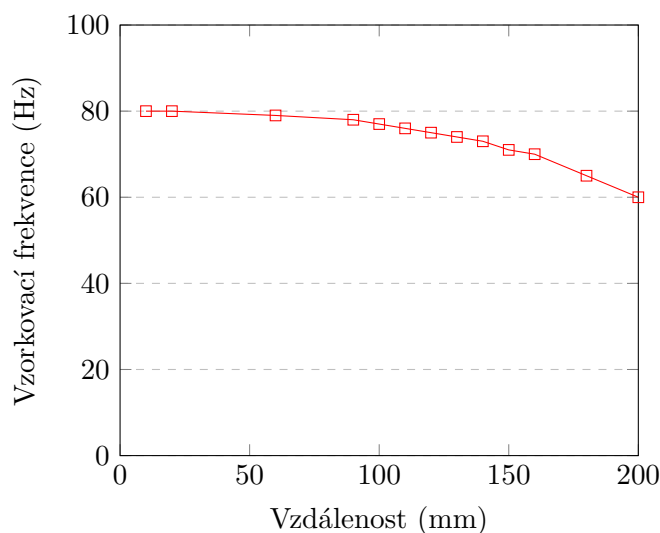
## 8.2 Vzorkovací frekvence senzorů

Nejdůležitější vlastností tohoto systému je jeho vzorkovací frekvence, protože na ní silně závisí rychlost odezvy. Bude-li tato frekvence příliš nízká, tak nebude možné efektivně reagovat na detekované gesto.

Měření vzorkovací frekvence jsem provedl pomocí kontrolního výstupu na sériovou linku, kde jsem v PC četl aktuálně měřená data a z datového toku jsem určoval její hodnotu.

### 8.2.1 Závislost na vzdálenosti

Měření závislosti vzorkovací frekvence jsem provedl při konstantní intenzitě osvětlení 100 lux a jako referenční objekt jsem použil bílý papír formátu A4. Výsledný graf závislosti je na obrázku 8.1. Z grafu je názorně vidět, že s rostoucí vzdáleností frekvence nezanedbatelně klesá.

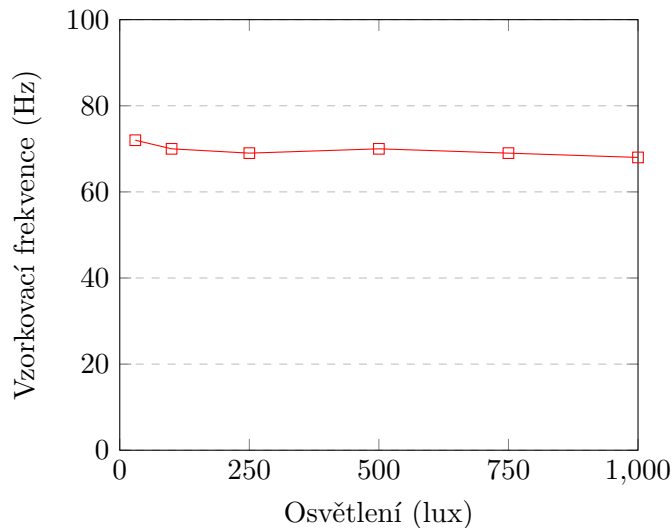


**Obrázek 8.1:** Závislost vzorkovací frekvence na vzdálenosti

### 8.2.2 Závislost na okolním osvětlení

Senzor VL6180X je vybaven integrovanou detekcí okolního osvětlení, kterou jsem přímo využil pro měření závislosti vzorkovací frekvence na osvětlení.

Měření jsem provedl při konstantní vzdálenosti referenčního objektu 150 mm od senzorů. Výsledný graf závislosti je na obrázku 8.2. Z grafu lze usoudit, že závislost vzorkovací frekvence na osvětlení je zanedbatelná, pouze v blízkosti velice nízkého osvětlení lehce narůstá.



**Obrázek 8.2:** Závislost vzorkovací frekvence na osvětlení

## 8.3 Detekce gest

Posledním krokem testování funkčnosti zařízení byla detekce zvoleného gesta. Pro referenční ověření jsem využil dvě relé jejichž spínání jsem řídil pomocí gest náklonu dlaně vlevo a vpravo, respektive její rotace v ose y. Vodorovná dlaň pro mne představovala vypnutí obou relé.

Testování jsem provedl v různých vzdálenostech od zařízení za konstantního osvětlení a podařilo se mi úspěšně detekovat tato gesta v rozsahu vzdáleností 50 mm až 150 mm.



## Kapitola 9

### Závěr

Na základě rešerše současného stavu využití inteligentních senzorů a dalších integrovaných obvodů pro zpracování sensorových signálů jsem navrhl zapojení řídicího systému s detekcí gest a realizoval jsem hardwarový model tohoto systému.

V průběhu práce jsem se setkal s velkým množstvím komplikací, například formalitami týkajícími se návrhu DPS jakými jsou: chyby v servisním potisku, špatné zapojení tlačítek nebo příliš velké odmaskování prokovů, atd. Též jsem byl nucen řešit výrazně větší závadu samotných senzorů, kterou jsem způsobil špatnou manipulací se senzory, a kvůli které jsem musel provést jejich kompletní výměnu. Na druhou stranu mě tento incident poučil o zranitelnosti optických senzorů.

Přes tyto nedostatky se mi podařilo úspěšně dokončit zprovoznění tohoto zařízení, provést důležitá měření jeho parametrů a otestovat jeho schopnost měření pohybu v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a náklonu v osách  $x$ ,  $y$  s pomocí jednoduchého matematického modelu. Na závěr jsem provedl referenční ověření možnosti detekce gest pomocí tohoto zařízení.

Z naměřených výsledků vyplývá, že navržený koncept je v praxi použitelný a může být dále rozvíjen. Budoucí vývoj předpokládám nejvíce v softwarové části, kde by bylo vhodné použít digitální filtrování a sofistikovanější algoritmy vyhodnocování, případně i využít jednoduchou neuronovou síť pro strojové učení. Předpokládám, že s vývojem tohoto konceptu budu pokračovat v navazujících projektech, případně v diplomové práci.



## Literatura

- [1] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors*. 4th edition. Woodbury: American institut of physics, 2014. ISBN 978-1-4419-6466-3
- [2] HOROWITZ, Paul and HILL, Winfield. *The Art of Electronics*. 3rd edition. Massachusetts: Harvard University, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9
- [3] VOBECKÝ, Jan a ZÁHLAVA, Vít. *Elektronika - Součástky a obvody, principy a příklady*. třetí, rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3
- [4] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-266-4
- [5] OLŠÁK, Petr. *Úvod do algebry, zejména lineární*. Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-03775-1
- [6] HUSÁK, Miroslav. *Senzory v elektronice a informatice* [přednášky a doplňující materiály]. Praha: ČVUT Fakulta elektrotechnická, 20.2. - 28.5. 2017.
- [7] STMicroelectronics [online]. *STM32L476xx. Product Specifications*. 2018. [vid. 10.2.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l476je.pdf>
- [8] STMicroelectronics [online]. *VL6180x. Product Specifications*. 2016. [vid. 4.3.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/vl6180x.pdf>
- [9] STMicroelectronics [online]. *VL5310x. Product Specifications*. 2018. [vid. 4.3.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/vl5310x.pdf>
- [10] STMicroelectronics [online]. *Nucle64. User Manual*. 2017. [vid. 14.2.2018]. Dostupné z: [http://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105823.pdf](http://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105823.pdf)
- [11] STMicroelectronics [online]. *X-NUCLEO-6180XA1. Product Specifications*. 2015. [vid. 14.2.2018]. Dostupné z: [http://www.st.com/resource/en/data\\_brief/x-nucleo-6180xa1.pdf](http://www.st.com/resource/en/data_brief/x-nucleo-6180xa1.pdf)

- [12] STMicroelectronics [online]. *AN2867. Oscillator design guide*. 2017. [vid. 5.4.2018]. Dostupné z: [http://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00221665.pdf](http://www.st.com/resource/en/application_note/cd00221665.pdf)
- [13] STMicroelectronics [online]. *AN4545. VL6180X basic ranging application*. 2017. [vid. 15.3.2018]. Dostupné z: [http://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00122600.pdf](http://www.st.com/resource/en/application_note/dm00122600.pdf)
- [14] STMicroelectronics [online]. *AN4478. Using multiple VL6180Xs in a single design*. 2014. [vid. 20.3.2018]. Dostupné z: [www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00114403.pdf](http://www.st.com/resource/en/application_note/dm00114403.pdf)
- [15] Vishay Semiconductors [online]. *VCNL3020. Datasheet*. 2018 [vid. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/84150/vcnl3020.pdf>
- [16] Sharp Corporation [online]. *GP2Y0A60SZ0F. Datasheet*. 2006. [vid. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a60szxfe.pdf>
- [17] FTDI Chip [online]. *FT232R USB UART IC. Datasheet*. 2015. [vid. 1.2.2018]. Dostupné z: [www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [18] STMicroelectronics [online]. *ST1S03PUR. Product Specifications*. 2018. [vid. 10.2.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/st1s03.pdf>
- [19] ON Semiconductor [online]. *MBR120VLSFT1G. Datasheet*. 2014. [vid. 12.2.2018]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MBR120VLSFT1-D.pdf>
- [20] Bourns<sup>®</sup> [online]. *SRN4026-3R3M. Datasheet*. 2017. [vid. 12.2.2018]. Dostupné z: <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/SRN4026.pdf>
- [21] STMicroelectronics [online]. *LD39050PUR. Product Specifications*. 2018. [vid. 10.2.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/ld39050.pdf>
- [22] Finder [online]. *FINDER Relays 40 Series*. 2018. [vid. 17.1.2018]. Dostupné z: <https://www.finder-relais.net/en/finder-relays-series-40.pdf>
- [23] ON Semiconductor [online]. *MMBT3904. Datasheet*. 2016. [vid. 15.2.2018]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MMBT3904LT1-D.PDF>
- [24] KiCad Developers Team. *KiCad EDA, ver. 4.0.7* [online]. Srpen 2017. [přístup 15.1.2018]. Dostupné z: <http://kicad-pcb.org/> [Požadavky na systém: procesor Pentium IV, Athlon nebo novější, grafická karta



- s OpenGL 2.1 nebo novější, operační systém Windows 7, 8, 10 nebo GNU/Linux, 5 GB volného místa na disku, 1024 MB operační paměť]
- [25] STMicroelectronics. *STM32CubeMX, ver. 4.24.0*. [online]. 2018. [přístup 15.1.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> [Požadavky na systém: operační systém Windows 7, 8, 10 nebo GNU/Linux, Java Run Time Environment 1.7 nebo novější]
- [26] STMicroelectronics. *System Workbench for STM32, ver. 4.6.3*. [online]. 2017. [přístup 15.1.2018]. Dostupné z: <http://www.openstm32.org/System%2BWorkbench%2Bfor%2BSTM32> [Požadavky na systém: operační systém Windows 7, 8, 10 nebo GNU/Linux, Java Run Time Environment 1.7 nebo novější]
- [27] STMicroelectronics [online]. *X-CUBE-6180XA1. Databrief*. 2015. [vid. 15.1.2018]. Dostupné z: [http://www.st.com/resource/en/data\\_brief/x-cube-6180xa1.pdf](http://www.st.com/resource/en/data_brief/x-cube-6180xa1.pdf)
- [28] *Sensors Web Portal* [online]. IFSA. [vid. 10.19.2017]. Dostupné z: <http://www.sensorsportal.com/HTML/Sensor.html>
- [29] *MEMS and sensors* [online]. STMicroelectronics. [vid. 5.2.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/mems-and-sensors.html>
- [30] *Time of flight (ToF) sensors* [online]. STMicroelectronics. [vid. 5.2.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/proximity-sensors.html>
- [31] *Intel<sup>®</sup> RealSense<sup>™</sup> Downloads, documents and tools* [online]. Intel Corporation [vid. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://realsense.intel.com/intel-realsense-downloads/#documents>
- [32] *What is Intel<sup>®</sup> RealSense<sup>™</sup>?* [online]. Lenovo [vid. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://www3.lenovo.com/us/en/faqs/pc-life-faqs/what-is-intel-realsense/>
- [33] *TensorFlow<sup>™</sup>* [online]. Google Brain Team [vid. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://www.tensorflow.org/>
- [34] *FBG gratings and products* [online]. Safibra, s.r.o. [vid. 18.12.2017]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/en/fbg-gratings.html>
- [35] *Sensing products* [online]. Texas Instruments Inc. [vid. 15.12.2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/sensing-products/overview.html>
- [36] *Sensor technologies and ICs* [online]. Analog Devices Inc. [vid. 27.12.2017]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/products/sensors.html>
- [37] *Sensors and sensor interface* [online]. Maxim Integrated. [vid. 27.12.2017]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface.html>

- [38] *Sensor Fusion and Sensor Interface* [online]. EM Microelectronic-Marin SA. [vid. 27.12.2017]. Dostupné z: <http://www.emmicroelectronic.com/products/sensor-fusion-sensor-interface.html>
- [39] *FBG Optical Sensing* [online]. National Instruments. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/12338/en/#toc2.html>
- [40] *Sonar Propagation* [online]. Federation of American Scientists. [vid. 5.5.2018]. Dostupné z: [https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/SNR\\_PROP/snr\\_prop.html](https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/SNR_PROP/snr_prop.html)

## Seznam zkratek a symbolů

ADC	Analog to Digital Converter (analogově digitální převodník)
ASIC	Application Specific Integrated Circuit (integrovaný obvod navržený pro konkrétní aplikaci)
DFN	Dual Flat No-leads package
DPS	deska tištěných spojů
$\epsilon_a$	relativní chyba
$\epsilon_f$	relativní chyba na plný rozsah senzoru
FBG	Fiber Bragg Grating (Braggova mřížka)
FSO	Full Scale Output (úplný výstupní rozsah senzoru)
I2C	Inter-Integrated Circuit (sériová komunikační sběrnice)
LDO	Low Drop Out regulator (lineární stabilizátor s nízkým poklesem napětí)
LED	Light Emitting Diode (světlo vyzařující dioda)
$L_{abs}$	absolutní linearita
$L_{rel}$	relativní linearita
LGA	Land Grid Array
MCU	mikrokontrolér
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System (mikro-elektro-mechanický systém)
PCB	Printed Circuit Board (deska tištěných spojů)
PSD	Position Sensitive Detector (detektor citlivý na polohu)
PN	rozhraní $p$ a $n$ polovodiče
$R_{max}$	maximální rozlišovací schopnost
RAM	Random Access Memory (operační paměť s přímým přístupem)
RTG	rentgenové zařízení
$S, S_i$	citlivost a selektivita
SPAD	Single-Photon Avalanche Diode (lavinová fotodioda)
SMPS	Switched Mode Power Supply (spínaný zdroj)
SNR	Odstup signál šum
SPI	Serial Peripheral Interface (sériové komunikační rozhraní)
ToF	Time of Flight (doba letu)
True RMS	Skutečná efektivní hodnota
$X, x$	vstupní veličina a její změny
$Y, y$	výstupní veličina a její změny

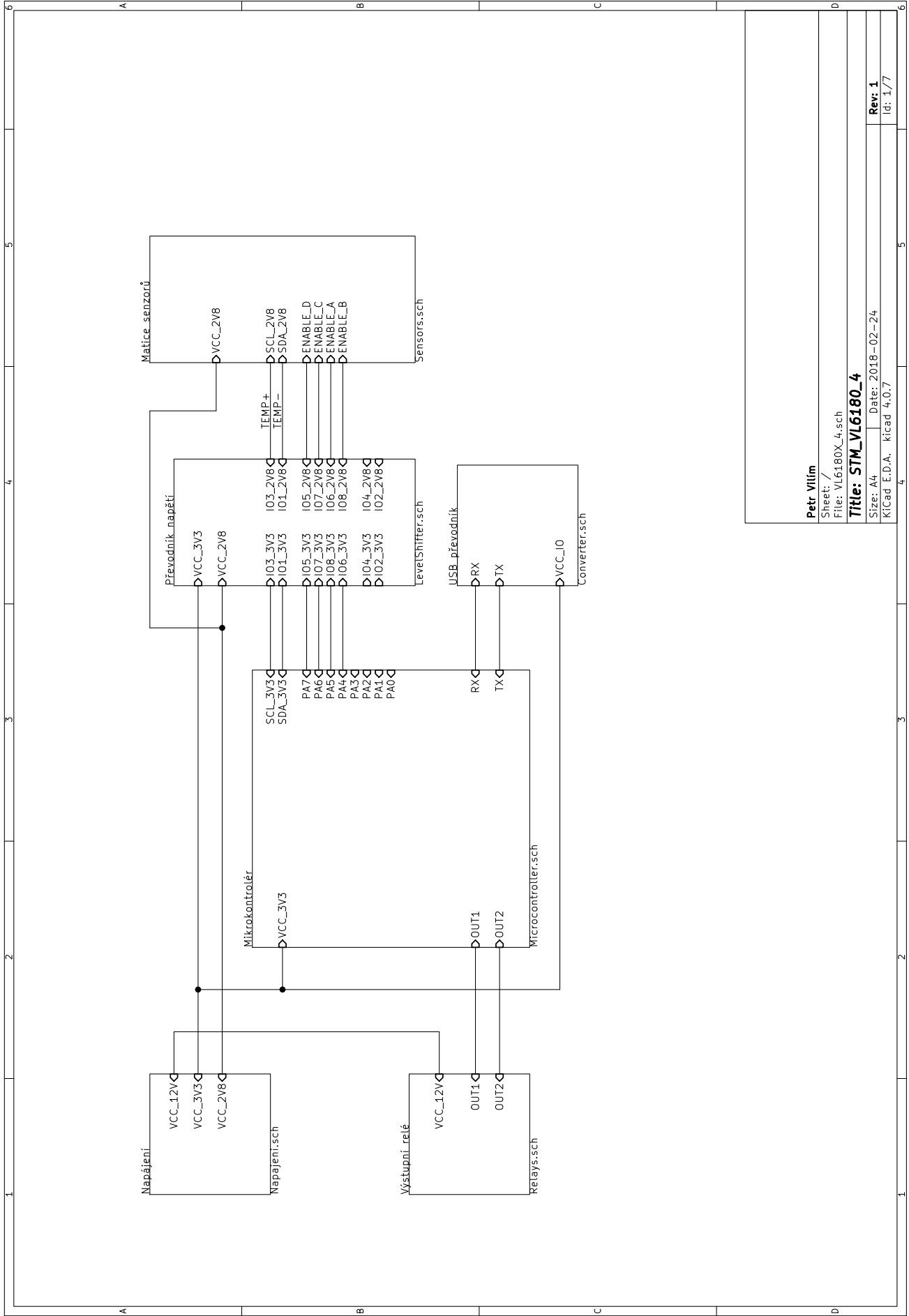




## Přílohy

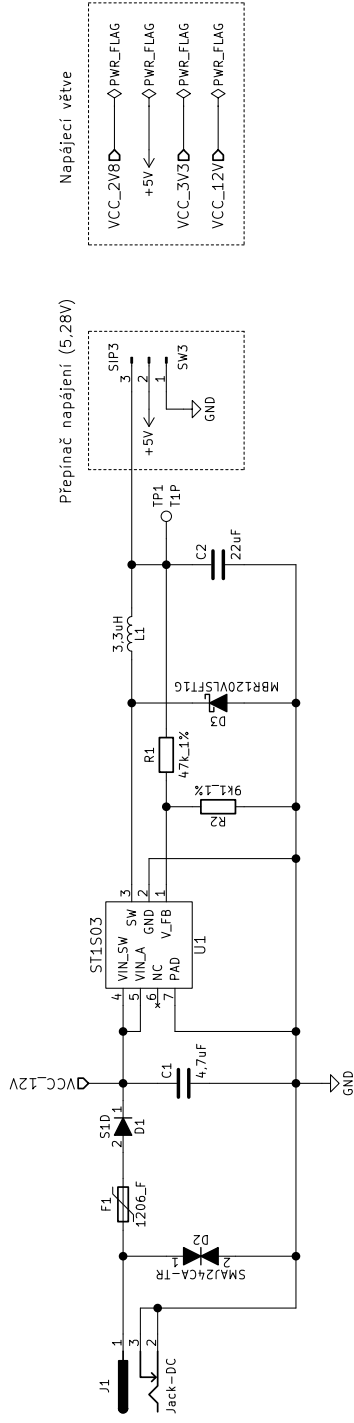


**Příloha A - funkční schéma obvodu**



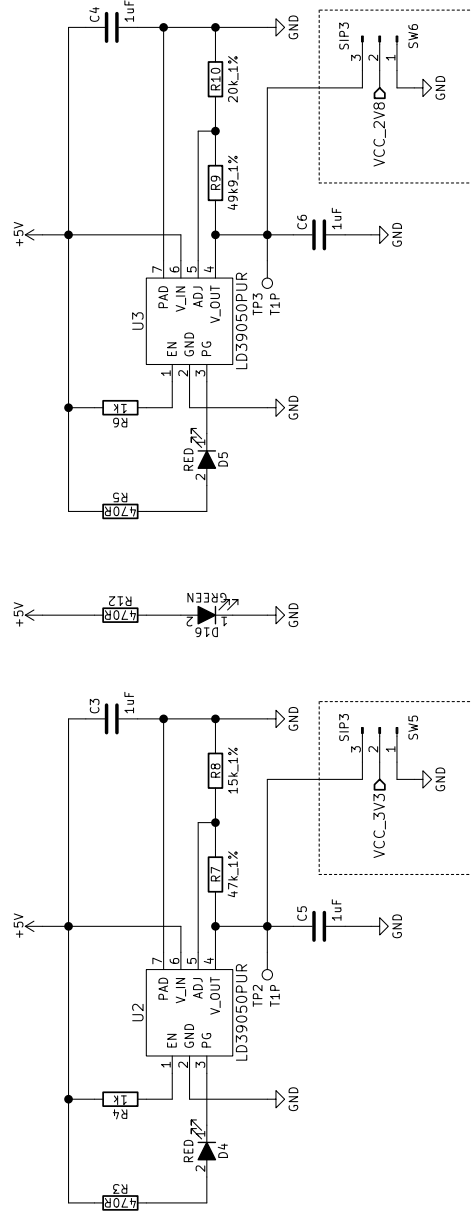
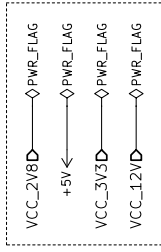
**Petr Vilím**  
 Sheet: /  
 File: VL6180X\_4.sch  
**Title: STM\_VL6180\_4**  
 Size: A4 Date: 2018-02-24  
 KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

**Rev: 1**  
 Id: 1/7



Přepínač napájení (5,28V)

Napájecí větve



Přepínač napájení (3,3V)

Přepínač napájení (2,8V)

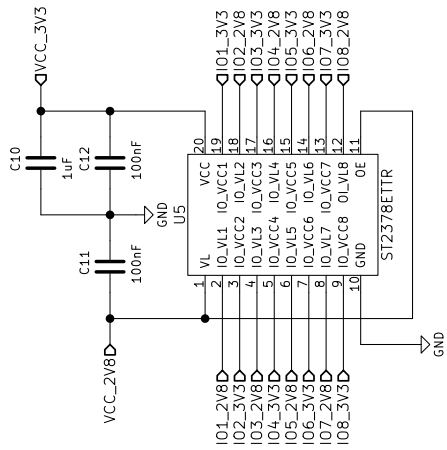
Petr Vilím

Sheet: /Napájení/  
File: Napájení.sch

Title: STM\_VL6180\_4

Size: A4 Date: 2018-02-24  
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev: 1  
Id: 2/7



Petr Vilím

Sheet: /Převodník napětí/

File: LevelShifter.sch

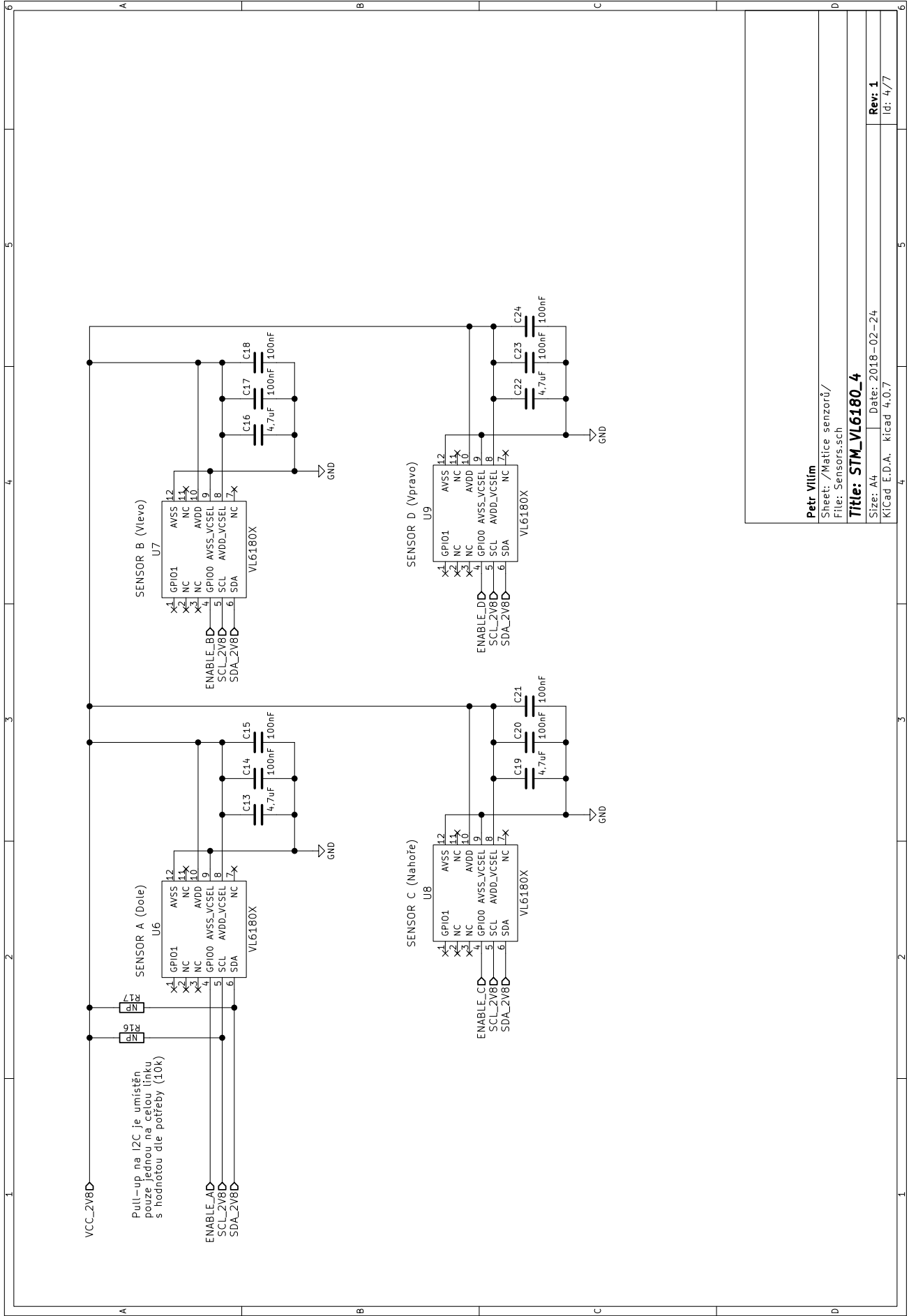
Title: STM\_VL6180\_4

Size: A4 Date: 2018-02-24

Rev: 1

KiCad E.D.A. kicad 4.0.7





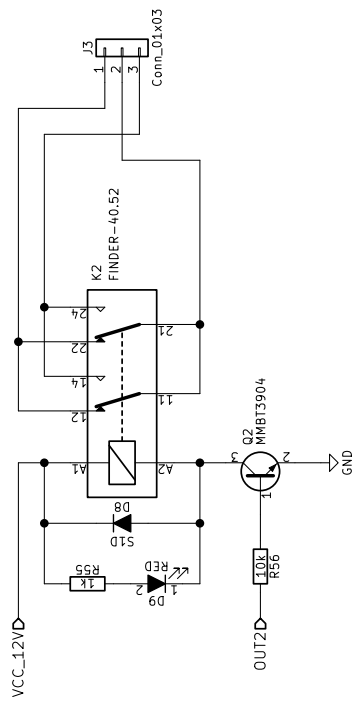
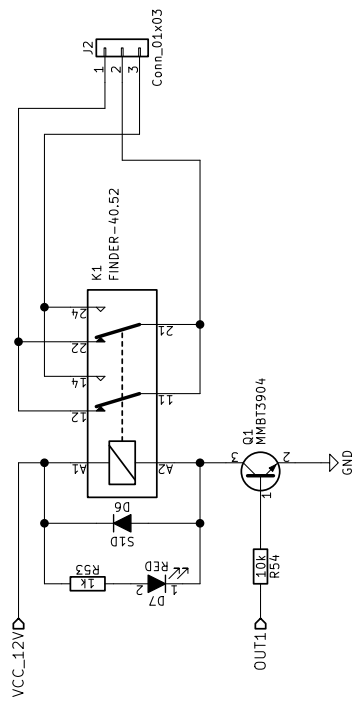
**Petr Vilím**

Sheet: /Matic sensorů/  
File: Sensors.sch

**Title: STM\_VL6180\_4**

Size: A4 Date: 2018-02-24  
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

**Rev: 1**  
Id: 4/7



Petr Vilím

Sheet: /Výstupní relé/

File: Relays.sch

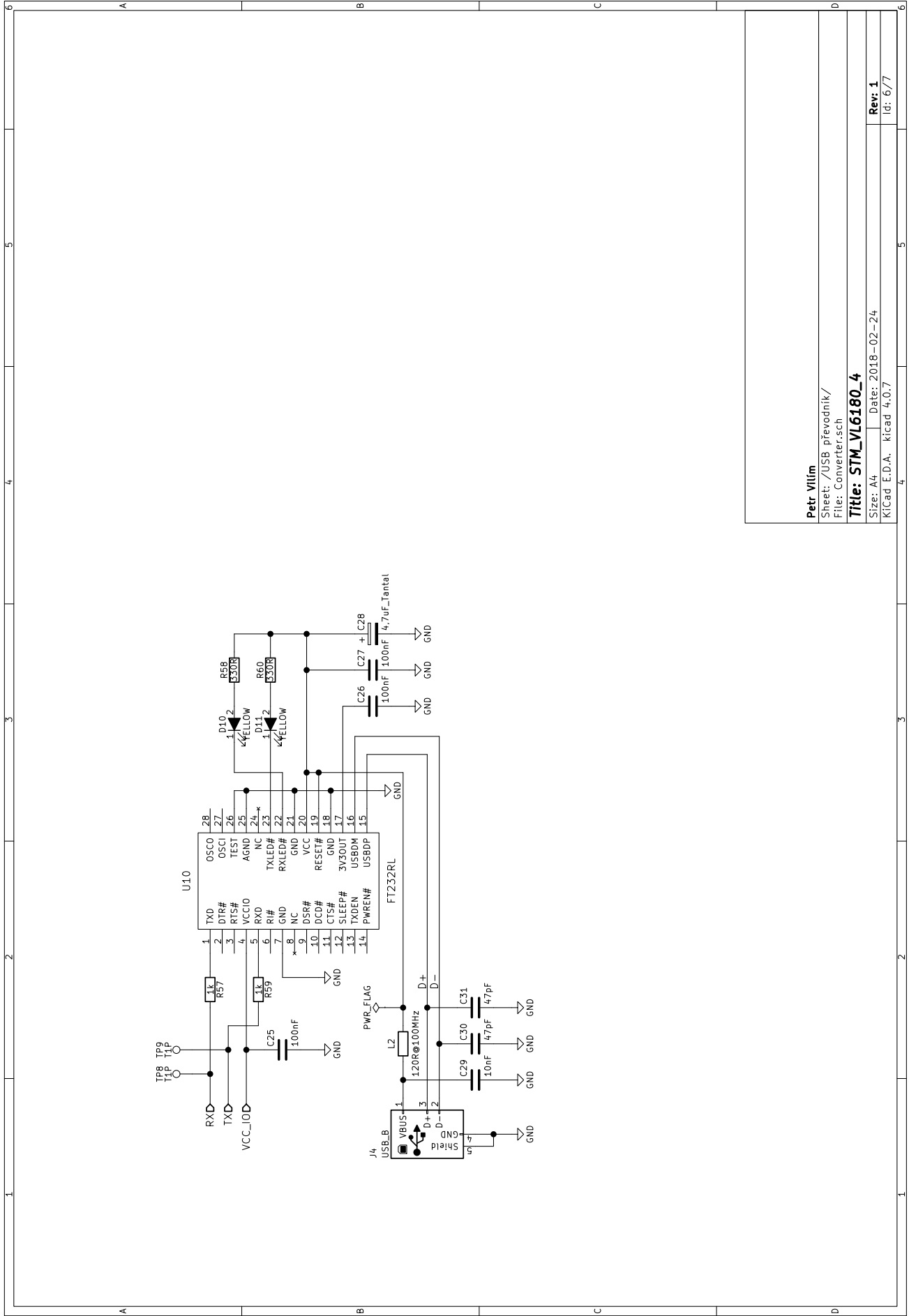
Title: STM\_VL6180\_4

Size: A4 Date: 2018-02-24

KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev: 1

Id: 5/7



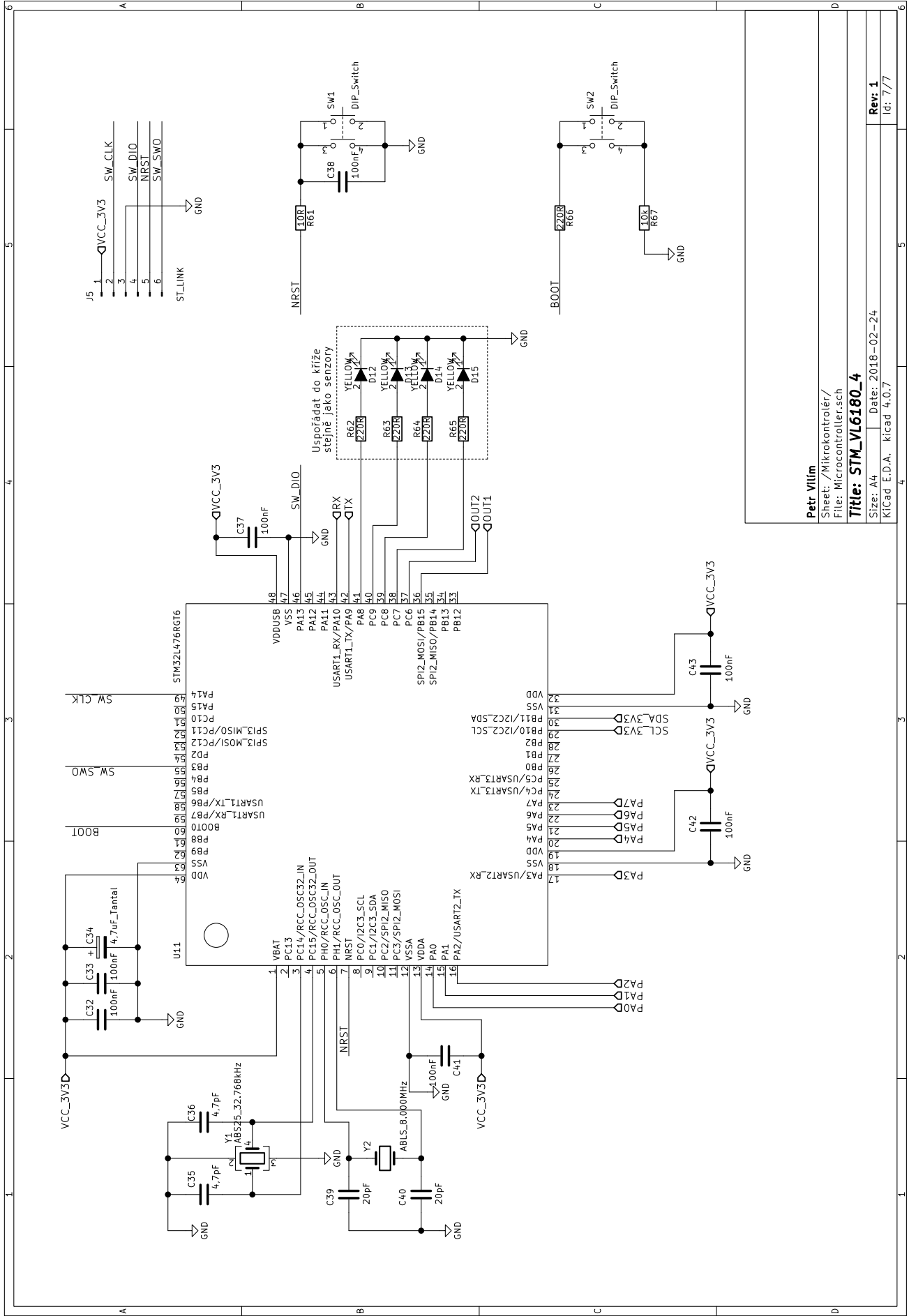
Petr Vilím

Sheet: /USB převodník/  
File: Converter.sch

Title: STM\_VL6180\_4

Size: A4 Date: 2018-02-24

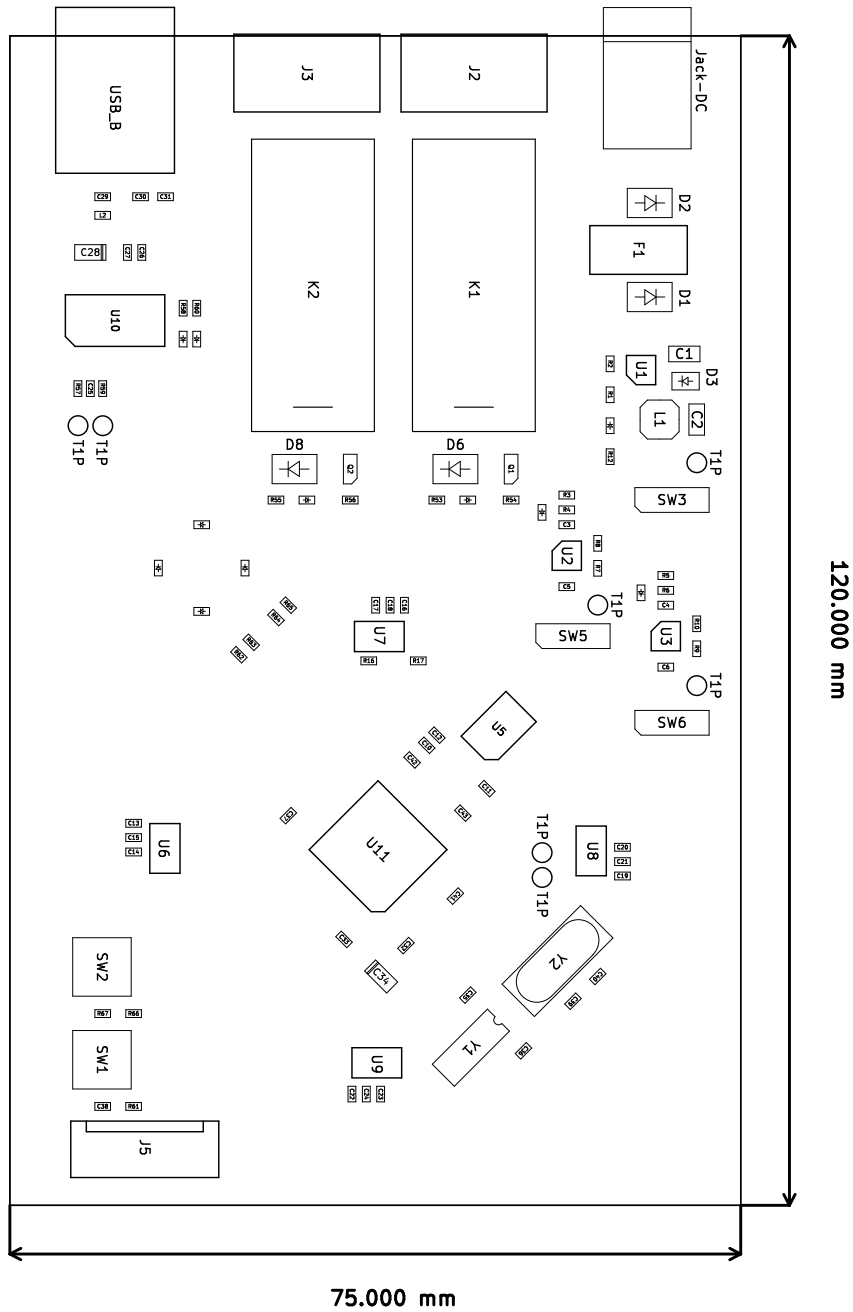
Rev: 1  
Id: 6/7



**Petr Vilím**  
 Sheet: /Mikrokontrolér/  
 File: Microcontroller.sch  
**Title: STM\_VL6180\_4**  
 Size: A4 Date: 2018-02-24  
 KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

**Rev: 1**  
 Id: 7/7

## Příloha B - rozložení DPS



## Příloha C - zdrojový kód

### Hlavní programová smyčka

```
1 int main(void)
2 {
3     VL6180x_RangeData_t Range[4];
4     AlgebraPlane_t Plane;
5     char buffer[64];
6     int len;
7
8     /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface
9     and the SysTick. */
10    HAL_Init();
11
12    /* Configure the system clock */
13    SystemClock_Config();
14
15    /* Initialize configured peripherals */
16    MX_GPIO_Init();
17    MX_I2C2_Init();
18    MX_USART1_UART_Init();
19    SensorMatrix_Init();
20
21    /* vychodzi poloha roviny */
22    Plane.nvector.x = 0;
23    Plane.nvector.y = 0;
24    Plane.nvector.z = 44;
25    Plane.origin.z = 255;
26
27    while (1)
28    {
29        SensorMatrix_GetRange(Range);
30
31        if (SensorMatrix_Evaluate(Range, &Plane) != 0) {
32            len=sprintf(buffer, "Out of range\r\n");
33            Loop_LED(1000);
34        } else {
35            len=sprintf(buffer, "Height: %imm, Normal vector XY:
36            [%i, %i] \r\n", Plane.origin.z,
37            Plane.nvector.x, Plane.nvector.y);
38            HAL_Delay(10);
39        }
40
41        if ((Plane.nvector.x) < -30) {
42            HAL_GPIO_WritePin(OUT_1_GPIO_Port, OUT_1_Pin,
43            GPIO_PIN_RESET);
44            HAL_GPIO_WritePin(OUT_2_GPIO_Port, OUT_2_Pin,
45            GPIO_PIN_SET);
46        }
47
48        if ((Plane.nvector.x) > 30) {
49            HAL_GPIO_WritePin(OUT_1_GPIO_Port, OUT_1_Pin,
50            GPIO_PIN_SET);
51            HAL_GPIO_WritePin(OUT_2_GPIO_Port, OUT_2_Pin,
52            GPIO_PIN_RESET);
```

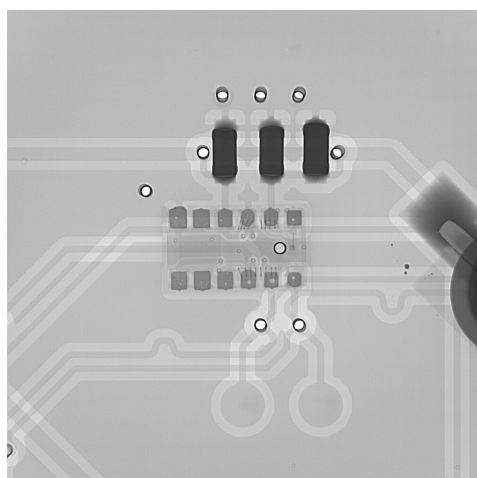
```
    }  
53  
    if ((Plane.nvector.x < 10) && (Plane.nvector.x > -10)) {  
55        HAL_GPIO_WritePin(OUT_1_GPIO_Port, OUT_1_Pin,  
        GPIO_PIN_RESET);  
57        HAL_GPIO_WritePin(OUT_2_GPIO_Port, OUT_2_Pin,  
        GPIO_PIN_RESET);  
59    }  
  
61    /* Transmit data to UART */  
    HAL_UART_Transmit(&huart1, buffer, len,  
63    def_uart_time_out);  
  
65    }  
}
```

### ■ Další zdrojové kódy

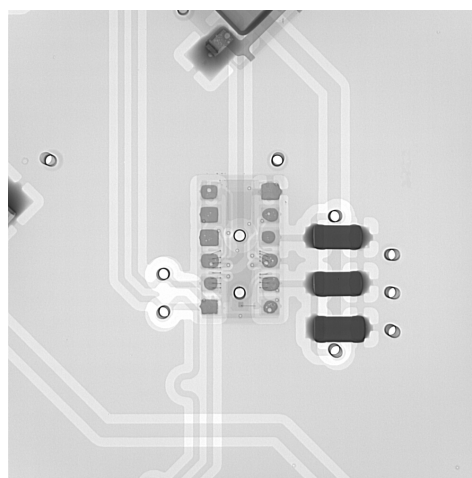
Celý zdrojový kód je poměrně rozsáhlý a tak jej dodávám na přiloženém CD ve formě celého projektu vývojového prostředí System Workbench for STM32. Z velké části se jedná o automaticky generované inicializační kódy a knihovny výrobce. Mým dílem je (mimo již přiložené hlavní smyčky programu z main.c) kód obsažený v souborech:

- stm\_vlx6180x\_4.h
- stm\_vlx6180x\_4.c
- simple\_algebra.h

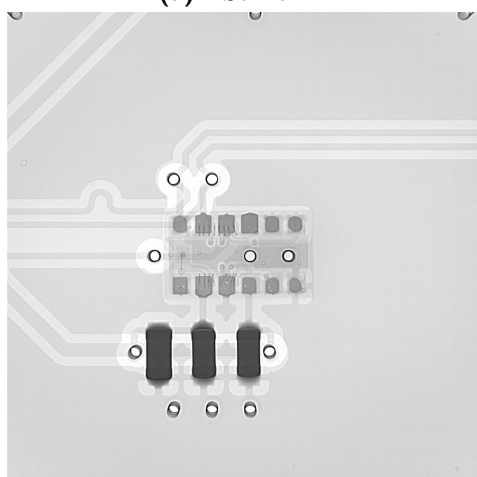
**Příloha D - snímky z RTG**



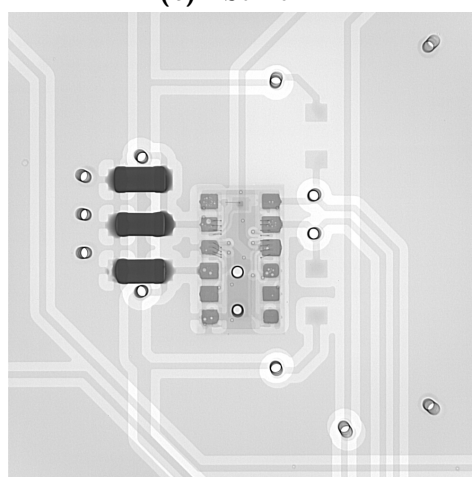
**(a) : Senzor A**



**(b) : Senzor B**



**(c) : Senzor C**



**(d) : Senzor D**