

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Stabilizátor pro akční kamery**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin BERAN**  
Osobní číslo: **E13B0172P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Stabilizátor pro akční kamery**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Vytvořte 2-osý stabilizátor obrazu pro akční kamery s použitím Gimbalových motorů.

1. Popište způsob stabilizace kamery.
2. Vyberte vhodný mikrokontrolér a potřebné senzory pro řízení stabilizátoru.
3. Navrhněte řídicí elektroniku stabilizátoru.
4. Realizujte a zprovozněte stabilizátor.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luděk Elis**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

**Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat elektronický stabilizátor akční kamery s gimbalovými motory. Práce obsahuje popis dalších možností stabilizace kamer. Kamera je připevněna k rámu stabilizátoru. Na ten jsou upevněny i snímače polohy kamery. Data ze snímačů jsou použita pro řízení motorů. Ty jsou použity pro kompenzaci nežádoucích pohybů kamery. Práce obsahuje návrh elektroniky stabilizátoru, včetně její realizace. Je zde uveden způsob řízení BLDC motorů a úprava dat ze snímačů polohy, akcelerometru a gyroskopu.

**Klíčová slova**

Stabilizátor kamery, gimbalovy motory, akcelerometr, gyroskop

**Abstract**

The goal of this bachelor thesis is to design and create an electronic stabilizer with gimbal motors for an action camera. Thesis contains a description of the other way of stabilizing cameras. The camera is attached to the frame. The camera position sensors are mounted at the frame. The data from the sensors are used for controlling of the motors which compensate an unwanted camera motion. Thesis includes design of the electronic stabilizer and its implementation. There is introduced a method of BLDC motors controlling and editing data from position sensors, accelerometer and gyroscope.

**Key words**

Camera stabilizer, gimbal motors, accelerometer, gyroscope,

## 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 2.6.2016

Martin Beran

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1 DRUHY STABILIZÁTORŮ KAMERY</b> .....	<b>9</b>
1.1 RIG.....	9
1.2 STEADICAM.....	9
1.3 ELEKTRONICKÝ STABILIZÁTOR S GIMBALOVÝMI MOTORY.....	10
<b>2 SENZORY PRO MĚŘENÍ POLOHY KAMERY</b> .....	<b>11</b>
2.1 AKCELEROMETR.....	11
2.1.1 Princip akcelerometrů.....	11
2.1.2 Parametry akcelerometrů.....	12
2.1.3 Úprava dat z akcelerometru.....	12
2.2 GYROSKOP.....	12
2.2.1 Parametry gyroskopů.....	13
2.3 KOMPLEMENTÁRNÍ FILTR.....	13
2.4 DIGITÁLNÍ AKCELEROMETR A GYROSKOP MPU6050.....	13
<b>3 NÁVRH ELEKTRONIKY STABILIZÁTORU</b> .....	<b>14</b>
3.1 MIKROKONTROLÉR.....	15
3.1.1 Mikrokontrolér ATmega324A-AU.....	15
3.2 ŘÍZENÍ MOTORŮ.....	15
3.2.1 Výkonový budič.....	16
3.3 GIMBALOVY MOTORY.....	17
3.4 NAPÁJENÍ STABILIZÁTORU.....	17
3.5 PERIFERIE MIKROKONTROLÉRU.....	18
3.5.1 Měření napětí baterie.....	18
3.5.2 LED diody.....	18
3.5.3 Vnější řízení.....	19
3.5.4 Tlačítka.....	19
<b>4 SOFTWARE</b> .....	<b>20</b>
4.1 INICIALIZACE.....	20
4.2 KONTROLA NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	21
4.3 KOMUNIKACE PO SBĚRNICI I <sup>2</sup> C.....	21
4.3.1 Komunikační protokol I <sup>2</sup> C.....	21
4.3.2 Komunikace s MPU6050.....	22
4.4 ŘÍZENÍ MOTORŮ.....	24
4.5 REGULACE.....	24
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>26</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>1</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ:</b> .....	<b>2</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>3</b>

## Úvod

Stabilní obraz je klíčem ke kvalitnímu videu a fotografiím. Roztřesený obraz videa je pro diváka velice rušivý. Otřesy působící na fotoaparát způsobí rozostření fotografie, ta je proto naprosto nepoužitelná. Stabilitu obrazu lze řešit několika způsoby. Nejjednodušším a patrně i nejstarším způsobem jak udržet obraz stabilní je kameru nebo fotoaparát umístit na stativ. To sebou nese i omezení. Nejenže se natáčení záběru provádí z jednoho místa, ale i přesun kamery na novou pozici je náročnější. Právě díky těmto omezením vznikly stabilizátory pro kamery a fotoaparáty. Ty umožňují pořizování kvalitního videozáznamu i při pohybu. Jednou z možností jak stabilizovat obraz je umístit stabilizátor přímo do kamery nebo fotoaparátu. Tato stabilizace je buď optická, nebo sensorová. Obě tyto stabilizace jsou účinné jen při relativně malých vibracích. Další možností je softwarová stabilizace v postprodukcí. Stabilizace obrazu je dosaženo pomocí plovoucího výřezu z obrazu. To má za následek snížení rozlišení videozáznamu oproti tomu, v jakém byl pořízen. Poslední možností stabilizace obrazu je stabilizování celé kamery, nebo fotoaparátu. Základní druhy stabilizátorů kamer jsou rig, steadicam a elektronický stabilizátor s gimbalovými motory. Tyto stabilizátory jsou důkladněji popsány v první kapitole této práce. Ta je zaměřena na návrh a realizaci elektronického stabilizátoru s gimbalovými motory. V dalších kapitolách jsou popsány části stabilizátoru včetně vybraných součástek pro jeho realizaci. Tento stabilizátor se velice rychle rozšířil jak v oblasti akčních kamer, tak i větších kamera a fotoaparátů.



## 1 Druhy stabilizátorů kamery

Stabilizátor kamery je zařízení určené pro její uchycení, které má zabraňovat, nebo výrazně omezovat přenos vibrací nebo otřesů způsobených při pohybu kamery a udržovat kameru v požadované poloze. Stabilizátor s kamerou může být připevněn například k dronu, nebo je vybaven držadlem pro natáčení z ruky.

### 1.1 Rig

Rig je držadlo pro uchycení kamery, které ji umožňuje nosit opřenou o rameno nebo hrud', nebo může mít tvar obdélníku, k jehož jedné straně je kamera připevněna. Tento tvar slouží pouze pro lepší uchycení malých kamer. Na *rig* lze kromě kamery umístit i další potřebné vybavení: například přídavný mikrofon, baterie nebo světlo. Velkou výhodou je nízká hmotnost samotného držadla a jeho flexibilita, protože nijak neomezuje způsob natáčení. Rig je vhodný pro natáčení statických záběrů, protože jeho stabilizační schopnost se omezuje spíše na třes ruky a lepší rozložení váhy kamer, (část váhy je přenesena na rameno). Při pořizování záběrů za chůze nedokáže odstranit chůzí způsobené otřesy. Zde se musí uplatnit schopnosti kameramana.[1]



Obr. 1.1: Rig s ramenní opěrkou pro akční kameru.

### 1.2 Steadicam

Steadicam je stabilizátor, který umožňuje kameramanovi nést kameru, a zároveň ji izoluje od otřesů pomocí kloubů a ložisek. Steadicam byl vynalezen Garretem Brownem v 70. letech minulého století. Stabilizátor je tvořen rukojetí, která je pomocí kloubů a ložiska spojena s vertikálním ramenem stabilizátoru. Na horním konci ramene je připevněna kamera. Dolní část ramene je delší než horní. Na konci dolní části je umístěno závaží, díky

kterému kamera zachovává svoji polohu. Závaží může být tvořeno bateriemi nebo přídatným monitorem. Této konfigurace se využívá hlavně v profesionální sféře, kde by závaží tvořené jen železnými disky příliš zatěžovalo kameramana. Pro správnou funkčnost stabilizátoru je důležité zvolit optimální váhu závaží a jeho rozložení. Při používání steadicamu se kameraman nemůže dotýkat kamery, protože by stabilizačnímu systému znemožňoval práci. Steadicam se hodí pro statické záběry i záběry za chůze, kdy efektivně tlumí otřesy. Steadicam se využívá pro natáčení záběrů z pohledu některé z postav. Při použití steadicamu nelze měnit náklon kamery během natáčení bez toho, aby nebyl stabilizační systém vyřazen. Jedním z prvních filmů, kde byl steadicam poprvé použit, byl film Rocky.[1][2]



Obr. 1.2 Steadicam pro malou kameru

### 1.3 Elektronický stabilizátor s gimbalovými motory

Elektronický stabilizátor je zařízení, které udržuje kameru v požadované rovině. Tato práce se zabývá návrhem elektroniky a realizací tohoto stabilizátoru. Stabilizátor pracuje na principu gyroskopického vyvažování, kterého je dosaženo pomocí natáčení gimbalových motorů. Tyto motory dokáží kameru polohovat s velkou přesností i dostatečnou rychlostí. Je snaha umístit kameru do stabilizátoru tak, aby osy otáčení procházeli těžištěm kamery. Díky tomu je kamera vyvážená a pro její otáčení není potřeba tak velké síly. Motory jsou řízeny na základě dat ze snímačů polohy připevněných ke kameře. Stabilizátor je nejčastěji vyráběn se stabilizací ve 2 nebo 3 osách. V případě stabilizace pouze ve 2 osách je zapotřebí pro

snímání polohy kamery pouze akcelerometr a gyroskop. Pro stabilizaci i ve třetí ose musí být doplněn o magnetometr. Tento stabilizátor je určen jak pro ruční nošení, tak je možné jej instalovat na automobil, na dron, na rameno jeřábu atd. [1]



Obr. 1.3 Elektronický 3-osý stabilizátor

## 2 Senzory pro měření polohy kamery

Pro určování pozice kamery se využívá kombinace dat získaných z akcelerometru a gyroskopu. Tyto snímače postačují pro 2-osý stabilizátor. Akcelerometr se uplatní při pomalých změnách náklonu kamery, a také určuje stabilizační rovinu. Data z akcelerometru jsou zatížena velkým šumem. Gyroskop velice dobře reaguje na rychlé změny náklonu.

### 2.1 Akcelerometr

Akcelerometry měří zrychlení a to jak statické, tak i dynamické. Statické zrychlení působí na všechny objekty na Zemi v podobě gravitačního zrychlení. Ze statického zrychlení můžeme zjistit náklon akcelerometru vzhledem k zemskému povrchu. Příčinou dynamického zrychlení je pohyb nebo vibrace akcelerometru. Data o měřeném zrychlení akcelerometru jsou součtem statického a dynamického zrychlení.[3]

#### 2.1.1 Princip akcelerometrů

Akcelerometry přeměňují zrychlení na měřitelný elektrický signál. Základní principy akcelerometrů:

**Piezelektrické akcelerometry** využívají piezelektrický materiál, který generuje náboj v závislosti na velikosti působící síly vyvolané zrychlením.

**Piezorezistivní akcelerometry** využívají změnu odporu piezokeramiky vlivem působící síly vyvolané zrychlením.

**Kapacitní akcelerometry** využívají mikro-křemíkovou mechanickou strukturu (dále jen MEMS). Seismická hmota, která tvoří jednu elektrodu kapacitoru, je silou vyvolanou zrychlením vychylována. Důsledek vychýlení je změna tloušťky dielektrika kapacitoru a tím i změna kapacity. Tento druh akcelerometrů je dnes nejpoužívanější. MEMS akcelerometry se integrují do miniaturních pouzder. Většinou jsou integrovány 3 akcelerometry na jeden čip. Každý pro měření zrychlení v jedné ose.[3]

### 2.1.2 Parametry akcelerometrů

Základním parametrem akcelerometru je maximální měřicí rozsah. Ten udává velikost maximálního zrychlení, které je akcelerometr schopen převést. Nejnižší rozsah vyráběných akcelerometrů je od  $\pm 1,2$  g. Nejvyšší rozsahy akcelerometrů mohou dosáhnout  $\pm 500$ g.

Výstup akcelerometru může být buď analogový, nebo digitální. U analogových akcelerometrů je výstupem hodnota napětí úměrná zrychlení. Digitální akcelerometry obsahují integrovaný AD převodník a jejich přesnost je závislá na přesnosti a rozsahu tohoto převodníku. Data z digitálních akcelerometrů jsou obvykle vysílána přes sběrnici I2C (Integrated Circuit) nebo SPI (Serial Peripheral Interface).[3]

### 2.1.3 Úprava dat z akcelerometru

Data z akcelerometru jsou použita pro výpočet náklonu kamery vůči vodorovné rovině. Jelikož data z akcelerometru udávají zrychlení v jednotlivých osách, je potřeba provést přepočítání na úhel náklonu v příčné ose (pitch) a podélné ose (roll).[4]

$$roll = \text{atan2}\left(\frac{Ax}{g}\right) * \frac{360}{\pi} [^\circ] \quad 2.1$$

$$pitch = \text{atan2}\left(\frac{Ay}{g}\right) * \frac{360}{\pi} [^\circ] \quad 2.2$$

,kde  $A_x$  a  $A_y$  je zrychlení v dané ose, a  $g$  je gravitační zrychlení. Takto vypočtený úhel je správný, jen když se akcelerometr nepohybuje, tedy působí na něj jen gravitační zrychlení. Pokud na akcelerometr působí i jiná zrychlení, která do výpočtu zanesou chyby. I přesto tento výpočet využívám.

## 2.2 Gyroskop

Gyroskop převádí úhlové zrychlení na měřitelný elektrický signál. Pomocí integrace údajů z gyroskopu můžeme zjistit natočení gyroskopu, pokud známe výchozí pozici.

Výhodou gyroskopu oproti akcelerometru je jeho rychlá a přesná reakce na rotaci kolem osy. Některé principy gyroskopů:

**Kruhový laserový gyroskop** pracuje na základě interference světla vyslaného po kruhové dráze oběma směry. Otáčení gyroskopu způsobí změnu fázového posunu světla.

**MEMS gyroskopy** pracují na základě deformace vibrující hmoty způsobené otáčením. Při otáčení gyroskopu vzniká Coriolisova síla. Velikost síly je úměrná úhlové rychlosti otáčení. U MEMS gyroskopů tato síla způsobí podle použitého principu změnu kapacity, nebo v případě piezoelektrického gyroskopu vznik napětí.[3]

### 2.2.1 Parametry gyroskopů

Důležitým parametrem gyroskopu je měřicí rozsah. Ten se pohybuje od desítek po tisíce stupňů za sekundu. Dalšími parametry jsou rozlišení a citlivost, ta je teplotně závislá. Rozlišení gyroskopu je u gyroskopů s digitálním výstupem dáno vnitřním AD převodníkem.[3]

## 2.3 Komplementární filtr

Komplementární filtr umožňuje sloučení dat získaných akcelerometrem a gyroskopem. To zajistí větší přesnost při výpočtu náklonu kamery, který má být kompenzován. Také to vede k odstranění nedostatků obou senzorů. Akcelerometr nedokáže rychle detekovat změnu polohy, to je vykompenzováno gyroskopem, který je necitlivý při velmi malých změnách a z jeho dat nelze zjistit počáteční náklon. Následující rovnice vyjadřuje výpočet úhlu natočení pomocí komplementárního filtru.[5]

$$\text{úhel}_k = V * (\text{úhel}_{k-1} + \text{úhlové\_zrychlení}_{gyr} * dt) + (1 - V) * \text{úhel}_{acc} [^\circ] \quad 2.3$$

,kde  $V$  je váha dat gyroskopu,  $(1-V)$  je váha dat z akcelerometru a  $dt$  je vzorkovací perioda. Váha dat gyroskopu je většinou výrazně větší než dat z akcelerometru.

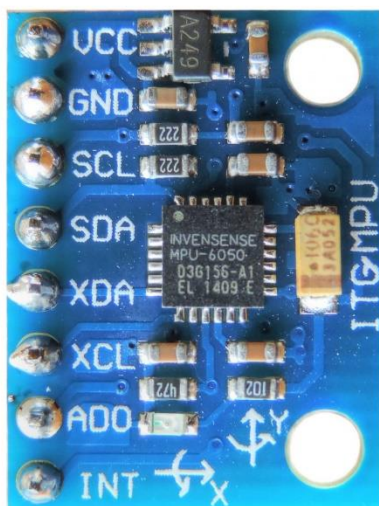
## 2.4 Digitální akcelerometr a gyroskop MPU6050

Integrovaný obvod (IO) MPU-6050 od firmy Inven Sense obsahuje 3-osý MEMS akcelerometr, 3-osý MEMS gyroskop, teploměr a integrovaný 16 bitový AD (Analog to Digital) převodník. Obvod používá pro komunikaci s okolím sériové komunikační rozhraní I<sup>2</sup>C se synchronizační frekvencí až 400 kHz. Integrovaný obvod obsahuje digitální programovatelný filtr typu dolní propust s mezními frekvencemi od 5 Hz do 260 Hz.[6]

Vlastnosti:

- Rozsahy akcelerometru  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$ .
- Rozsahy gyroskopu  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000^\circ/s$ .
- Rozsah napájecího napětí 2,375 V do 3,46 V.
- Obvod je v pouzdře 4x4x0,9 mm QFN.

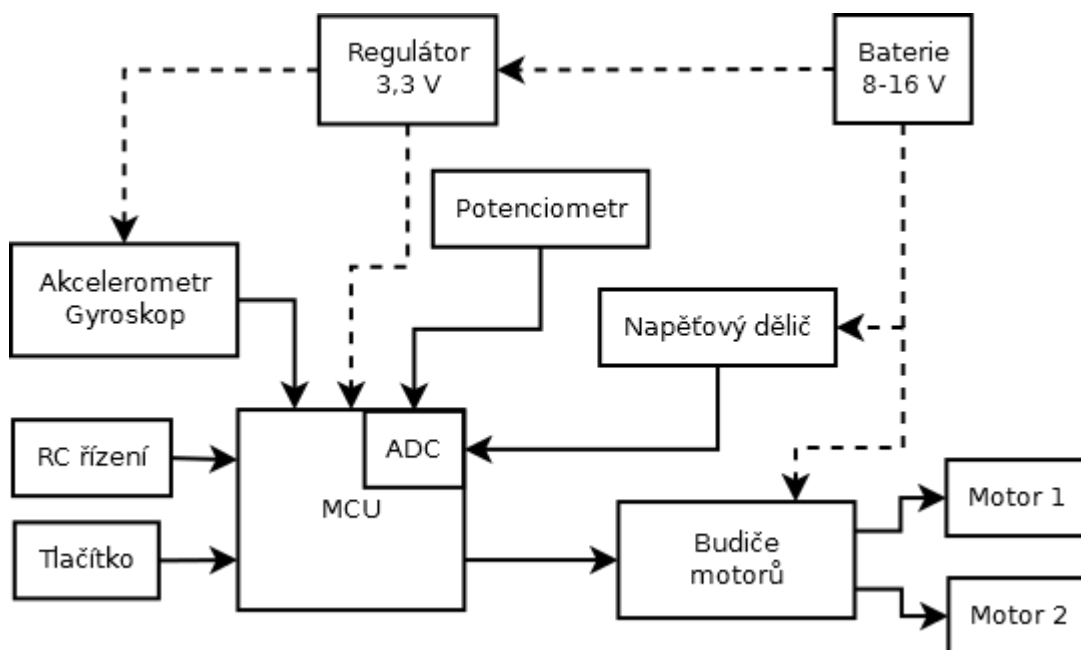
Pro snazší použití bylo využito přípravku GY-521 pro Arduino, na kterém je MPU6050 implementován. Přípravek také obsahuje 3,3V regulátor napájecího napětí, pull-up rezistory pro rozhraní I2C a další součástky nutné pro funkci IO.[7]



Obr. 2.1 Přípravek pro Arduino GY-521 s IO MPU6050

### 3 Návrh elektroniky stabilizátoru

Při návrhu elektroniky bylo nejprve vytvořeno blokové schéma zapojení viz Obr.2.1. V dalších kapitolách jsou uvedeny vybrané komponenty pro realizaci stabilizátoru.



Obr. 3.1 Blokové schéma

### 3.1 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér pro řízení stabilizátoru musí obsahovat alespoň 6 PWM (Pulse Width Modulation) výstupů pro řízení dvou 3-fázových gimbalových motorů, komunikační sériové rozhraní SPI nebo I<sup>2</sup>C (TWI - Two Wire Interface) pro komunikaci s akcelerometrem a gyroskopem. Dále musí mikrokontrolér disponovat integrovaným AD převodníkem. Ten bude použit pro měření napětí baterie a měření napětí na potenciometru, kterým by bylo umožněno měnit náklon kamery ve vertikální ose. Velikost programové paměti mikrokontroléru byla odhadnuta na minimálně 16 kB.

#### 3.1.1 Mikrokontrolér ATmega324A-AU

ATmega324A-AU je 8 bitový mikrokontrolér od firmy Atmel. Mikrokontrolér dokáže při napájecím napětí 3,3 V pracovat s frekvencí až 10 MHz. Tento mikrokontrolér splňuje všechny požadavky, které byly stanoveny pro potřeby stabilizátoru.

Mikrokontrolér obsahuje: [8]

- Paměti
  - 32 kB FLASH
  - 1 kB EEPROM
  - 2 kB SRAM
- 6 PWM kanálů
- 8 kanálů 10 bitového AD převodníku
- Komunikační periferie
  - TWI
  - SPI
  - 2xUSART
- 32 I/O vývodu
- 44 pinové pouzdro TQFP

### 3.2 Řízení motorů

Řízení motorů bude zajišťovat mikrokontrolér pulzně šířkovou modulací (PWM). Šířka pulzu vzhledem k periodě signálu udává hodnotu napětí.

Pro jemné řízení polohy motoru bylo použito 3 fázové napětí sinusového tvaru. Kdy postupnou změnou napětí na svorkách motoru dochází k otáčení rotoru. Rychlost otáčení je závislá na rychlosti změny napětí přiváděné na motor.[9]

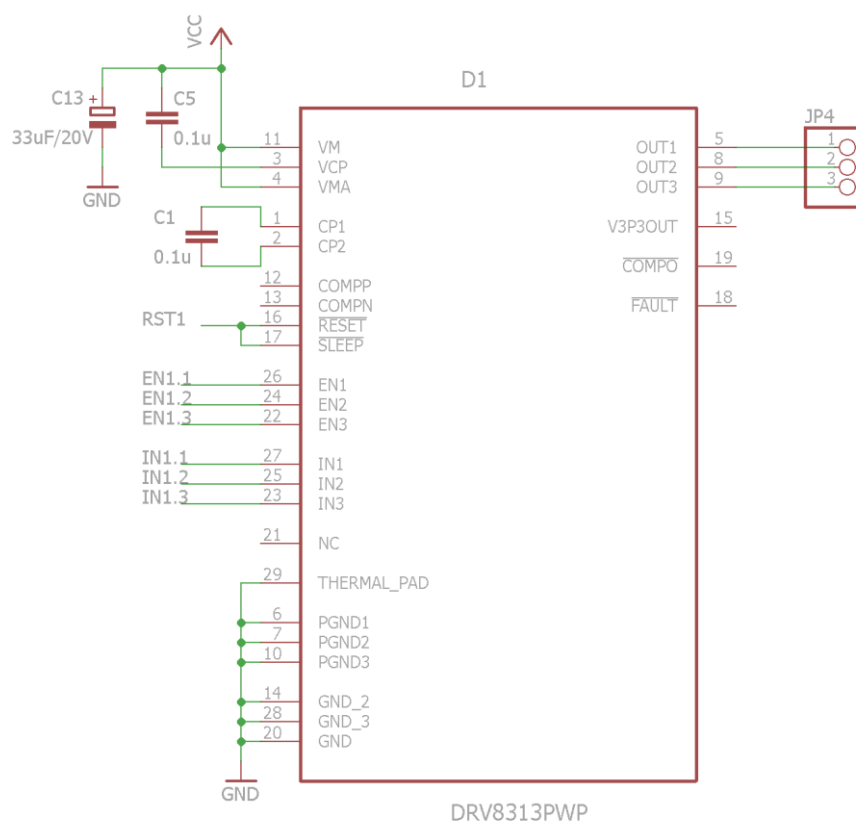
### 3.2.1 Výkonový budič

Jako výkonový budič byl vybrán integrovaný obvod DRV8313 obsahující 3 samostatně ovládané půl-můstky. Budič je určen pro pohon 3-fázových BLDC motorů, ale může pracovat i do jiných zátěží. Tento budič sám negeneruje pwm signál pouze výkonově posiluje výstupy mikrokontroléru. Každý půl-můstek budiče lze samostatně zapnout nebo vypnout.[10]

Vlastnosti:

- Rozsah napájecího napětí 8 až 60V
- Maximální špičkový proud 2,5 A při 24 V
- RDS(ON) 0,29  $\Omega$  při 24 V / 1 A při 25 °C
- Ochrana před nadproudem
- Tepelná ochrana
- Odpojení při nízkém napětí
- Umístěn v 28 pinovém pouzdře HTSSOP Power Pad

Schéma zapojení budičů bylo vytvořeno dle doporučení[10]



Obr. 3.2 Zapojení budiče

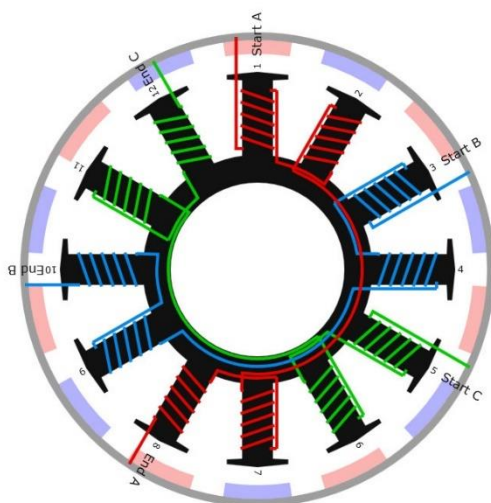


### 3.3 Gimbalovy motory

Pro polohování kamery byly vybrány motory XM2826GB od firmy Dualsky. Ty jsou výrobcem doporučeny pro elektronické stabilizátory. Jedná se o *brushless gimbal outrunner*, tedy bezkartáčový motor s vnějším rotorem s permanentními magnety. Svým principem jsou stejné jako 3f synchronní stroj s permanentními magnety. Jejich konstrukce umožňuje zastavení točivého magnetického pole statoru a tím i zastavení a udržení rotoru v určité poloze.

Vlastnosti:[11]

- Velikost motoru [průměr x výška] 27,8 x 25,4 mm
- Váha 41 g
- Konfigurace 12N14P – 12 pólový stator, 14 pólový rotor
- Maximální napětí 16 V
- Vnitřní odpor 12,6  $\Omega$
- Maximální proud 1 A
- Maximální váha kamery 0,4 kg



Obr. 3.3 Schéma BLDC motoru 12N14P



Obr. 3.4 Fotografie motoru XM2826GB

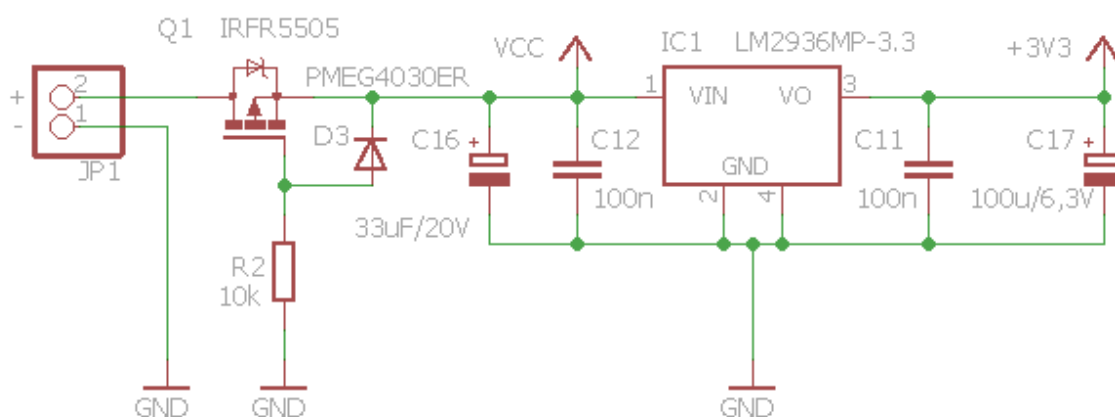
### 3.4 Napájení stabilizátoru

Pro napájení stabilizátoru může být použita baterie s napětím v rozsahu od 8 do 16 V. Dolní hranici napájecího napětí je určena minimálním napájecím napětím vybraných budičů. Horní hranice je určena maximálním napětím, které lze připojit na vybrané motory. Jako nejvýhodnější se jeví použití 3 článkové LiPol baterie, která má jmenovité napětí 11,1 V a

její výhodou je nízká váha a malé rozměry. Při použití této baterie byl maximální odběr stabilizátoru odhadnut na 800 mA. Odběr elektroniky stabilizátoru oproti odběru motorům je zanedbatelný.

Pro potřeby mikrokontroléru a akcelerometru s gyroskopem bylo napětí sníženo na 3,3 V pomocí regulátoru LM2936MP-3.3 v pouzdře SOT-223-3. Toto napětí je také použito pro napájení AD převodníku mikrokontroléru a jako napěťová reference AD převodníku.

Napájecí obvod obsahuje ochranu proti přepólování zdroje. Tuto ochranu zajišťuje MOSFET tranzistor s indukovaným kanálem typu P. Pokud je napájecí zdroj připojen správně, je napětí na gate záporné vůči drain. To způsobí přitažení volných nábojů k elektrodě a vzniku vodivého kanálu mezi drain a source. V případě přepólování zdroje je napětí elektrody gate vůči source kladné a nedojde k vytvoření vodivého kanálu. Zdroj je odpojen od obvodu.



Obr. 3.5 Schéma napájecího obvodu

## 3.5 Periferie mikrokontroléru

### 3.5.1 Měření napětí baterie

Napětí baterie je přes napěťový dělič, s dělicím poměrem 4,7 : 1, přivedeno na vstup AD převodníku mikrokontroléru. Díky napěťovému děliči může AD převodník měřit napětí až do hodnoty 15,5 V.

### 3.5.2 LED diody

K mikrokontroléru jsou připojeny dvě zelené LED diody pro signalizaci stavu stabilizátoru. Byly využívány při vývoji a ladění softwaru, následně jsou určeny například pro indikaci nízkého napětí zdroje.

### 3.5.3 Vnější řízení

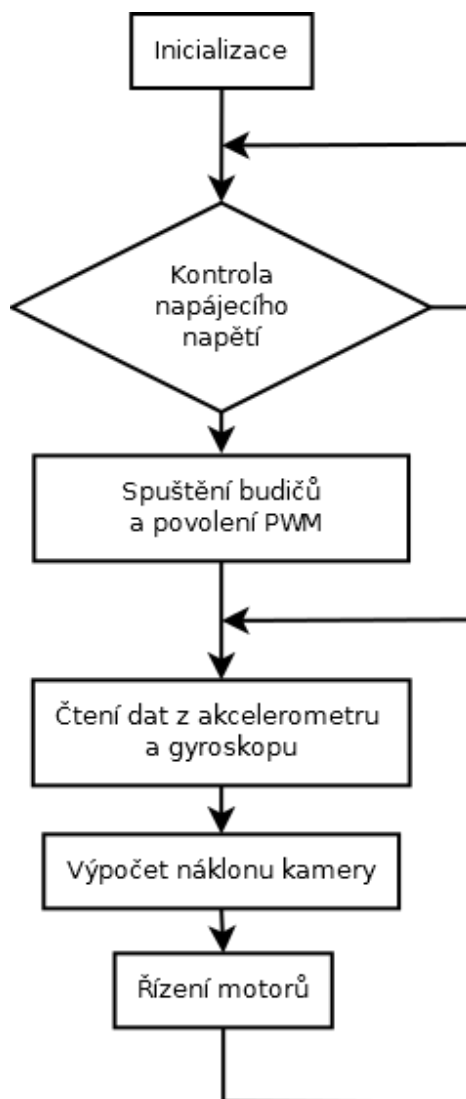
Zdrojem vnějšího řízení může být potenciometr, nebo digitální vstup označený jako RC řízení. Potenciometr se nenachází přímo na desce s mikrokontrolérem, ale musí být připojen pomocí 3pinového konektoru. Ten obsahuje napětí 3,3 V, vstup do AD převodníku a zem. Místo potenciometru může být připojen zdroj stejnosměrného signálu, např. při přidání filtru typu dolní propust může být zdrojem PWM signál. Digitálním vstupem můžou být měněny parametry stabilizátoru. Například náklon kamery v některé ose.

### 3.5.4 Tlačítka

K mikrokontroléru jsou připojená dvě tlačítka. Jedno z tlačítek slouží pro reset mikrokontroléru. Druhé tlačítko může být použito pro modifikaci programu za běhu, např. změna ovládacího vstupu pro řízení náklonu kamery v jedné ose. Vstupem může být napětí přivedené na AD převodník z potenciometru, nebo vstup označený jako RC ovládání.

## 4 Software

Struktura programu mikrokontroléru pro řízení stabilizátoru je znázorněna pomocí vývojového diagramu viz *Obr. 4.1*.



Obr. 4.1 Vývojový diagram programu

### 4.1 Inicializace

Blok označený „Inicializace“ se zabývá nastavením počátečního stavu mikrokontroléru tak aby byl schopen pracovat. Tento blok zahrnuje i nastavení akcelerometru a gyroskopu.

V první řadě jsou nastaveny směry I/O portů. Na patřičná místa je do směrových registrů DDRX zapsána '1'. Tím se směr příslušné brány portů nastaví jako výstupy. Ostatní brány zůstanou vstupní.

Dále je spuštěn AD převodník a nastaven zdroj napěťové reference z pinu AVCC. Na tento pin pouzdra je přivedeno přes í filtr LC napětí 3,3 V.

Poté je spuštěno rozhraní I2C a pomocí předděličky hodinového signálu nastavena rychlost hodin synchronizačního signálu na 104 kHz.

Následuje nastavení akcelerometru a gyroskopu. To je provedeno právě přes sběrnici I2C. Je provedeno nastavení rozsahu akcelerometru na hodnotu  $\pm 2$  g a rozsahu gyroskopu na  $\pm 2000^\circ/\text{s}$ . Dále je nastavena mezní frekvence číslicového filtru na 44 Hz.

Jako poslední je provedeno nastavení všech jednotek čítač/časovač pro práci v režimu fázově korigované pulzně šířkové modulace.

## 4.2 Kontrola napájecího napětí

Napájecí napětí je přivedeno přes napěťový dělič na vstup AD převodníku. Pokud by napětí zdroje bylo nižší než 8 V, je pomocí reset vstupů zastavena činnost výkonových budičů a jsou vypnuty PWM výstupy mikrokontroléru. Stav nízkého napětí je signalizován blikáním LED2.

Pokud je napájecí napětí dostatečné je výkonovým budičů i PWM výstupům povolena činnost.

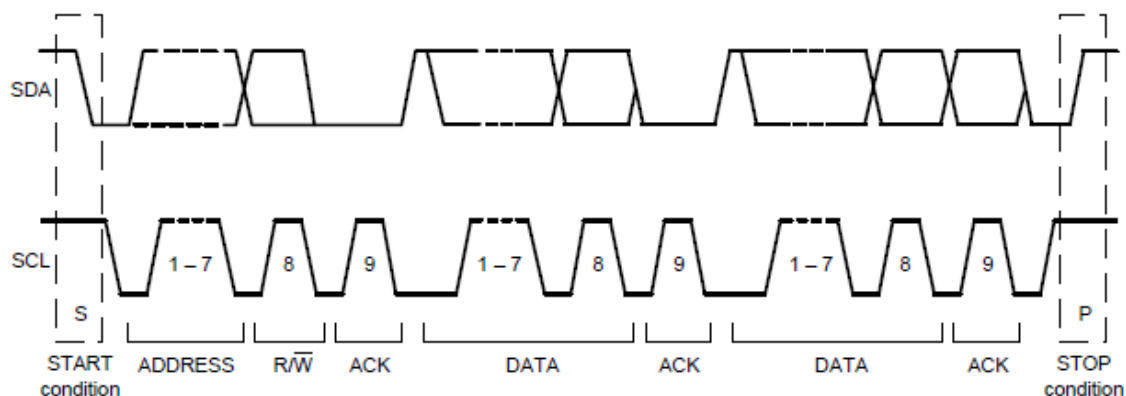
Měření napětí je opakováno v každém 1000 průběhu smyčky programu.

## 4.3 Komunikace po sběrnici I<sup>2</sup>C

Na sběrnici I2C probíhá komunikace po dvou vodičích mezi mikrokontrolérem a IO MPU6050. Jeden vodič (SDA) slouží k přenosu sériových dat. Po druhém vodiči (SCL) jsou vysílány sériové hodiny. Sběrnice I<sup>2</sup>C je někdy označována pro komunikaci jen po 2 vodičích jako TWI. Toto označení používá například firma Atmel.

### 4.3.1 Komunikační protokol I<sup>2</sup>C

Jeden z obvodů (v našem případě mikrokontrolér) je nastaven jako MASTER, ostatní obvody jsou SLAVE (akcelerometr a gyroskop). Případ, kdy je ke sběrnici připojeno více obvodů MASTER, zde nebude rozebrán. MASTER generuje sériové hodiny. Výběr mezi obvody SLAVE je proveden pomocí 7bitové adresy. Časový průběh logických úrovní na vodičích SDA a SCL je na *Obr. 4.2*.



Obr. 4.2 Časový průběh logických úrovní na vodičích SDA a SCL

Stavy sběrnice:

**Stav klidu** - Na sběrnici neprobíhá komunikace a na obou vodičích je logická jednička. To je zajištěno pomocí připojených pull-up rezistorů.

**Start bit** (START condition) - zahajuje přenos nebo signalizuje jeho pokračování (opakovaný start). Je vygenerován tak, že úroveň na SDA se změní z logické 1 na 0, zatímco na SCL je logická 1.

**Stop bit** (STOP condition) - ukončuje přenos. Je vygenerován změnou úrovně SDA z logické 0 na 1, zatímco je na SCL logické 1.

**Přenos dat/adresy** – Data jsou přenášena po 8 bitech. K 7bitové adrese je přidán R/W bit. Tento bit určuje, zda půjde a příjem nebo vysílání ze strany MASTRA. Logická úroveň na SDA se může měnit, jen když je na SCL logická 0. Při každé periodě SCL je přenesen jeden bit.

**Potvrzovací bit ACK** - (acknowledge) slouží pro potvrzení příjmu dat. Je vysílán přijímačem po příjmu adresy nebo dat jako by se jednalo o 9 bit. Po tomto bitu následují v dalším taktu hodin další data nebo stop bit. ACK bit je určen logickou 0, pokud není vyslán, zůstane na sběrnici díky pull-up rezistorům log 1 a to značí chybu přenosu nebo jeho ukončení ze strany MASTRA při příjmu dat.[12]

#### 4.3.2 Komunikace s MPU6050

Komunikační sekvence pro zápis dat do MPU6050 je znázorněna na Obr. 4.3. Při popisu komunikace bude mikrokontrolér označován jako master a MPU6050 jako slave.

*Single-Byte Write Sequence*

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

*Burst Write Sequence*

Master	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK		ACK	

Obr. 4.3 Komunikační sekvence pro zápis do registrů MPU6050

Komunikaci začíná MASTER start bitem, po kterém následuje 7 bitová adresa SLAVE obvodu, doplněná bitem určujícím zda master bude data vysílat, nebo přijímat. Pro vysílání je bit v logické 0, pro příjem v logické 1. Poté MASTER čeká na potvrzovací bit (ACK) od SLAVE. Pak je vyslána adresa registru (RA). Do registru s touto adresou budou zapsána data vyslaná MASTEREM. Při zápisu pouze jednoho bajtu a po přijetí ACK MASTER ukončí komunikaci stop bitem. Při zápisu více bajtů lze využít automatické inkrementace adres registrů při vysílání bitu ACK po příjmu prvních dat. Poté stačí, aby MASTER vysílal jen data. Tím je zápis více bajtů výrazně urychlen, ale jen v případě, že adresy registrů, do kterých chceme provést zápis, jsou seřazeny hned za sebou.

Komunikační sekvence pro čtení dat z MPU6050 je znázorněna na Obr. 4.4

*Single-Byte Read Sequence*

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		

*Burst Read Sequence*

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		DATA		

Obr. 4.4 Komunikační sekvence pro čtení dat z registrů MPU6050

Komunikační sekvence pro čtení dat začíná stejně jako pro zápis. Nejprve je MASTEREM vyslán start bit. Poté je odeslána adresa SLAVE s bitem pro zápis. Následuje adresa registru, který chceme číst. Po ACK bitu od SLAVE následuje opět start bit (opakovaný start) a po něm adresa SLAVE s bitem pro čtení. Po potvrzovacím bitu již následuje vysílání dat SLAVEM, tentokrát MASTER vysílá potvrzovací bit. V případě, že jej nevyšle, komunikace je ukončena. Když je AKC MASTEREM vyslán, SLAVE automaticky inkrementuje adresu registru a vyšle nová data. Toto automatizované čtení lze

dobře využít právě pro čtení výstupních registrů akcelerometru a gyroskopu, které jsou zařazeny adresně za sebou.

#### 4.4 Řízení motorů

Motory jsou řízeny napětím odpovídajícím 3 fázovému sinusovému průběhu. Sinusový průběh byl vytvořen změnou střídy PWM. Hodnoty sinusovky byly předem spočítány pro 8 bitové vyjádření a vloženy do pole `pwmSin[]`.

```
static char pwmSin[] = {128,132,137,141,146,150,154,159,163,167,171,176,
180,184,188,192,195,199,203,206,210,213,216,219,222,225,228,231,233,236,
238,240,242,244,246,247,249,250,251,252,253,254,254,...
uint8_t step1A=0;
uint8_t step1B=sizeof(pwmSin)/3;
uint8_t step1C=2*step1B;
```

Pro vytvoření 3 fází vzájemně posunutých o  $120^\circ$  byly inicializovány 3 proměnné; pro každý motor, obsahující číslo pozice prvku v poli `pwmSin[]` tak, aby bylo dosaženo posunu o  $120^\circ$ . Posunem v poli se postupně mění napětí jednotlivých fází a dochází k pomalému otáčení rotoru motoru. Směr otáčení motoru je dán směrem posunu v poli. Např. v případě inkrementace proměnných (`step1A`, `B`, `C`) je směr otáčení po směru hodinových ručiček. V případě jejich dekrementace je směr otáčení proti směru hodinových ručiček. Skutečný směr je dán také sledem fází připojených k motoru. Rychlost otáčení motoru závisí na rychlosti inkrementace nebo dekrementace.

#### 4.5 Regulace

Otáčení motorů je regulováno podle velikosti úhlu natočení, který odpovídá ose otáčení daného motoru. Úhel natočení je počítán na základě dat z akcelerometru a gyroskopu s využitím komplementárního filtru. Vypočtený úhel je přiveden do P- regulátoru jako požadovaná veličina. Výstup regulátoru je převeden na velikost posunu magnetického pole statoru.

Příklad kódu je uveden níže. Pro výpočet úhlu musí být použity data z akcelerometru a gyroskopu taková, která odpovídají ose otáčení daného motoru.

```
pitch=(weightgyro)*(pitch_pred+grz/16,4*dt)+(1-
weightgyro)*atan2(accy,16384)*360/M_PI; //výpočet náklonu s využitím
komplementárního filtru
pitch_pred=pitch;
err_pitch=0-pitch; //výpočet chyby úhlu
dir_pitch=(P_const*err_pitch); //P-regulator
```



```
if(dir_pitch>=1) //převod a omezení výstupu regulátoru
increment1=1;
else
if(dir_pitch<=-1)
increment1=-1;
else
increment1=0;
```

, kde

<code>pitch</code>	je vypočtený úhel,
<code>weightgyro</code>	je konstanta udávající váhu dat z gyroskopu při výpočtu,
<code>pitch_pred</code>	je úhel minulého výpočtu,
<code>grz</code>	je hodnota úhlové rychlosti z gyroskopu,
<code>dt</code>	je vzorkovací perioda,
<code>accy</code>	je hodnota zrychlení z akcelerometru,
<code>M_PI</code>	je hodnota $\pi$ ,
<code>P_const</code>	je zesílení proporcionálního regulátoru a
<code>increment1</code>	udává směr posunu pole.

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s principem stabilizace kamery a vytvoření elektronického stabilizátoru akční kamery s gimbalovými motory. V první kapitole jsou popsány různé způsoby stabilizace kamery. Další kapitoly jsou věnovány základním částem elektronického stabilizátoru. Druhá kapitola se věnuje snímačům polohy. Těmito snímači jsou akcelerometr a gyroskop. Tyto snímače jsou nezbytnou součástí stabilizátoru. Poskytují zpětnou vazbu mikrokontroléru o poloze kamery. Ten na základě zjištěné polohy je rozhodnuto o tom, zda bude motorem otočeno a v jakém směru. Díky použitému způsobu řízení motorů je jejich minimální úhel otočení  $0,33^\circ$ .

Výsledkem práce je funkční dvouosý stabilizátor kamery, jehož schéma a deska plošných spojů byly vytvořeny v návrhovém prostředí Eagle. Nedílnou součástí návrhu je i vytvořený řídicí program pro mikrokontrolér zajišťující vyhodnocení veličin ze senzorů, potřebné filtry, regulaci a samotné řízení gimbalových motorů. Tím byly splněny všechny body zadání.

Protože nebyla zhotovena mechanická část stabilizátoru, nebylo možné přesně nastavit parametry regulátoru a komplementárního filtru a ověřit tak dobrou funkčnost celého návrhu. Nicméně toto nastavení je pouze otázkou vhodné volby jednotlivých konstant a vždy se bude vztahovat ke konkrétní použité kameře. V případě problémů s přesností stabilizátoru je možné zmenšit minimální úhel otočení motorů na polovinu použitím dvojnásobně dlouhého pole `pwmSin[]`. Pro zvýšení přesnosti výpočtu náklonu lze použít složitější algoritmy například Kalmánův filtr.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Šimek, Jiří. Stabilizace v oblasti hobby kinematografie [online][cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.video-zone.cz/recenze/stabilizace-obrazu-v-oblasti-hobby-kinematografie-t253.html>
- [2] Wikipedia, Staedicam. [online][cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Staedicam>
- [3] Záruba, Jan. 3D akcelerometr/gyroskop pro detekci pohybu osob. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Ing. Jan Řeboun, Ph.D.
- [4] Homolka, Petr. Návrh a realizace samorozkládací automatické koptery [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5528.pdf>
- [5] Hess, Lukáš. Návrh dvoukolového autonomního robota. Brno, 2013. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.
- [6] MPU-6050 Product Specification. Inven Sense [online] 2013 [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://43zrtwysvxb2gf29r5o0athu.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [7] MPU-6050 Accelerometer + Gyro [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>
- [8] ATmega164A/PA/324A/PA/644A/PA/1284/P. Atmel [online] 01/2015 [30. 5. 2016] Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8272-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega164A\\_PA-324A\\_PA-644A\\_PA-1284\\_P\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8272-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega164A_PA-324A_PA-644A_PA-1284_P_datasheet.pdf)
- [9] Gramba, Ignas. Spining BLDC(Gimbal) motors at super sloooooow speeds with Arduino and L6234. In: berryjam.eu [online] 18. 4. 2015[cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.berryjam.eu/2015/04/driving-bldc-gimbals-at-super-slow-speeds-with-arduino/>
- [10] DRV8313 2.5-A Triple 1/2-H Bridge Driver. Texas Instruments [online] 01/2015 [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/drv8313>
- [11] Xmotor Brushless Gimbal Outrunner. Dualsky [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: [http://www.dualsky.com/motor/Xmotor\\_GB.shtml](http://www.dualsky.com/motor/Xmotor_GB.shtml)
- [12] Olejář, Martin. Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. In: <http://vyvoj.hw.cz/> [online] 20. 5. 2000 [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sberrnice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeprom-24lc256>

## Seznam obrázků:

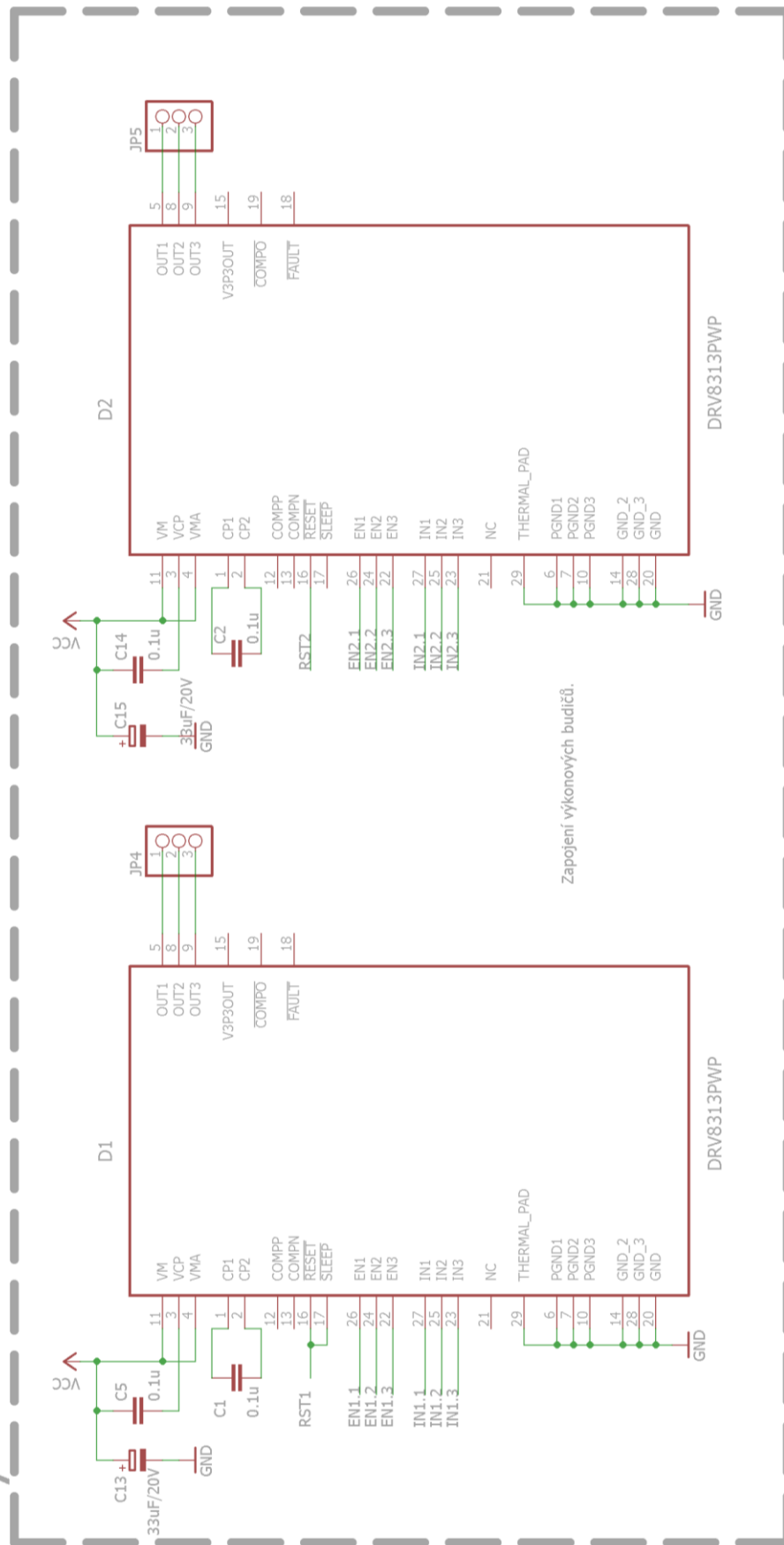
OBR. 1.1: RIG S RAMENNÍ OPĚRKOUPRO AKČNÍ KAMERU.....	9
OBR. 1.2 STEADICAM PRO MALOU KAMERU.....	10
OBR. 1.3 ELEKTRONICKÝ 3-OSÝ STABILIZÁTOR .....	11
OBR. 2.1 PŘÍPRAVEK PRO ARDUINO GY-521 S IO MPU6050.....	14
OBR. 3.1 BLOKOVÉ SCHÉMA .....	14
OBR. 3.2 ZAPOJENÍ BUDIČE .....	16
OBR. 3.3 SCHÉMA BLDC MOTORU 12N14P.....	17
OBR. 3.4 FOTOGRAFIE MOTORU XM2826GB .....	17
OBR. 3.5 SCHÉMA NAPÁJECÍHO OBVODU .....	18
OBR. 4.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU .....	20
OBR. 4.2 ČASOVÝ PRŮBĚH LOGICKÝCH ÚROVNÍ NA VODIČÍCH SDA A SCL .....	22
OBR. 4.3 KOMUNIKAČNÍ SEKVENCE PRO ZÁPIS DO REGISTRŮ MPU6050 .....	23
OBR. 4.4 KOMUNIKAČNÍ SEKVENCE PRO ČTENÍ DAT Z REGISTRŮ MPU6050.....	23

## Zdroje obrázků:

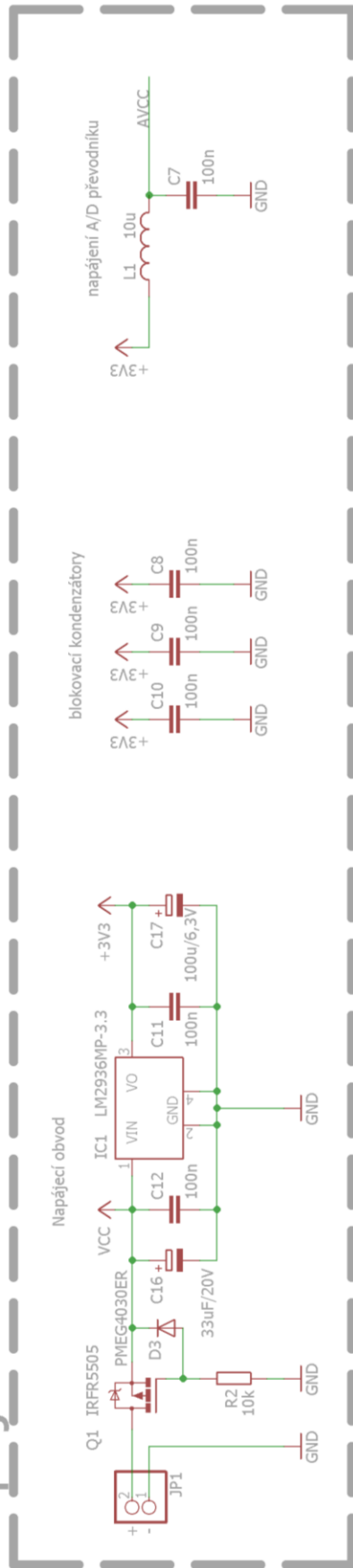
- OBR. 1.1 Mantona Video Rig for GoPro. In: ab-com.cz [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: [http://www.ab-com.cz/mantona-video-rig-for-gopro-20490-\\_ies785671.jpg](http://www.ab-com.cz/mantona-video-rig-for-gopro-20490-_ies785671.jpg)
- OBR. 1.2 Genesis Steadycam Pro 2.25. In videoking.cz [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://videoking.cz/wp-content/uploads/2014/06/Genesis-Steadycam.jpg>
- OBR. 1.3 EVO 3D pihuarvutite kaamera stabilisaator GoPro3 / 4. In: az-europe.eu [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <https://data3.az-europe.eu/image/phd965-962954-2899441/evo-3d-pihuarvutite-kaamera-stabilisaator-gopro3-4.jpg>
- OBR. 2.1 Модуль 3-х осевого гироскопа и акселерометра GY-521 MPU-6050 In: arduino-kit.ru [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: [http://arduino-kit.ru/smarty/timthumb.php?src=/pics/images/catalog/1101/GY-521-MPU-6050-Module-MPU6050-\\_11.jpg&w=393&h=380](http://arduino-kit.ru/smarty/timthumb.php?src=/pics/images/catalog/1101/GY-521-MPU-6050-Module-MPU6050-_11.jpg&w=393&h=380)
- OBR. 3.3 The LRK winding scheme of outrunner brushless motors. In: bavaria-direct.co.za [online] [cit. 30. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.bavaria-direct.co.za/scheme/common/images/dLRK.jpg>
- OBR 4.2 viz [6] str. 35
- OBR 4.3 viz [6] str. 35
- OBR 4.4 viz [6] str. 36



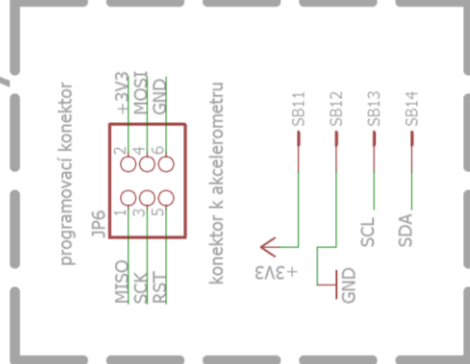
# Výkonové budiče



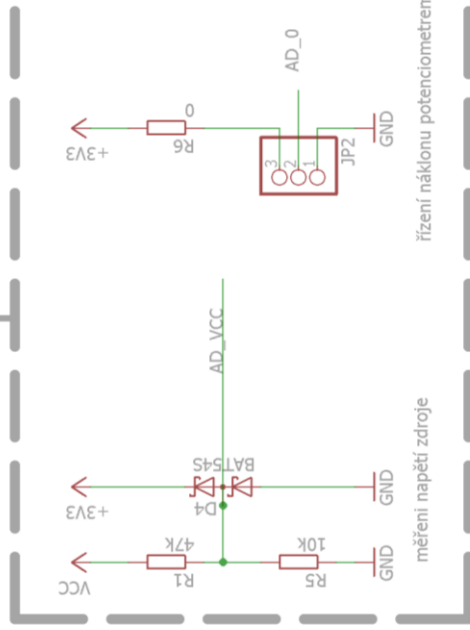
# Napájení



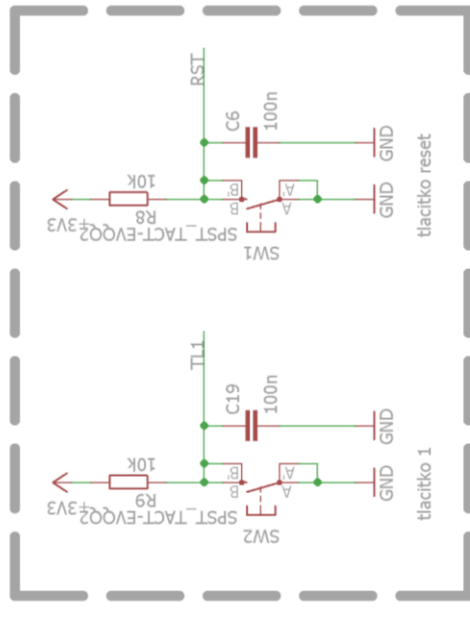
# Konektory



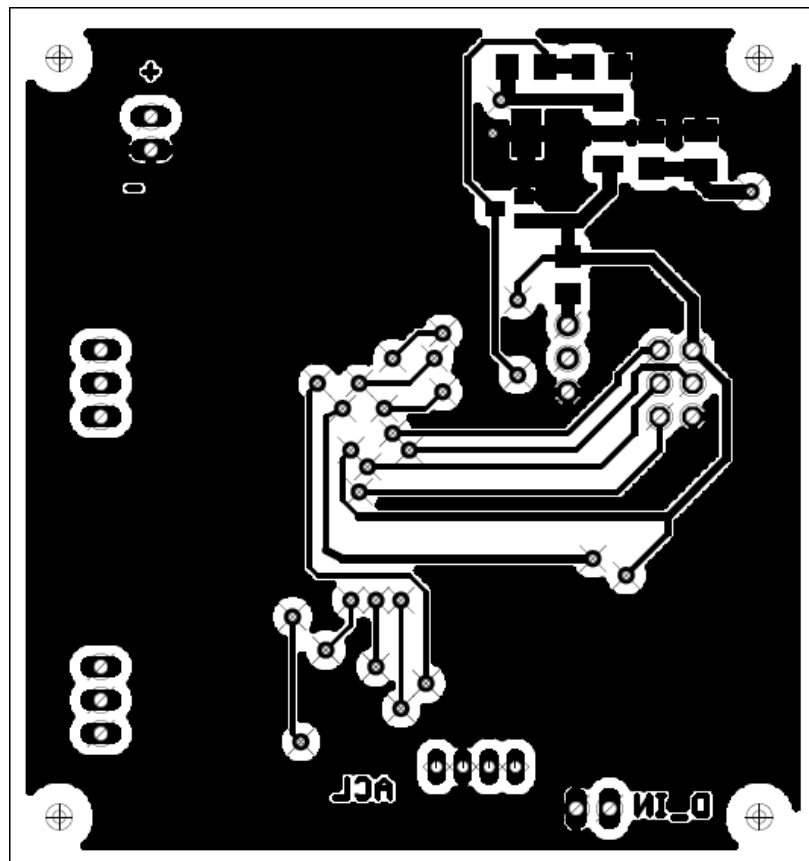
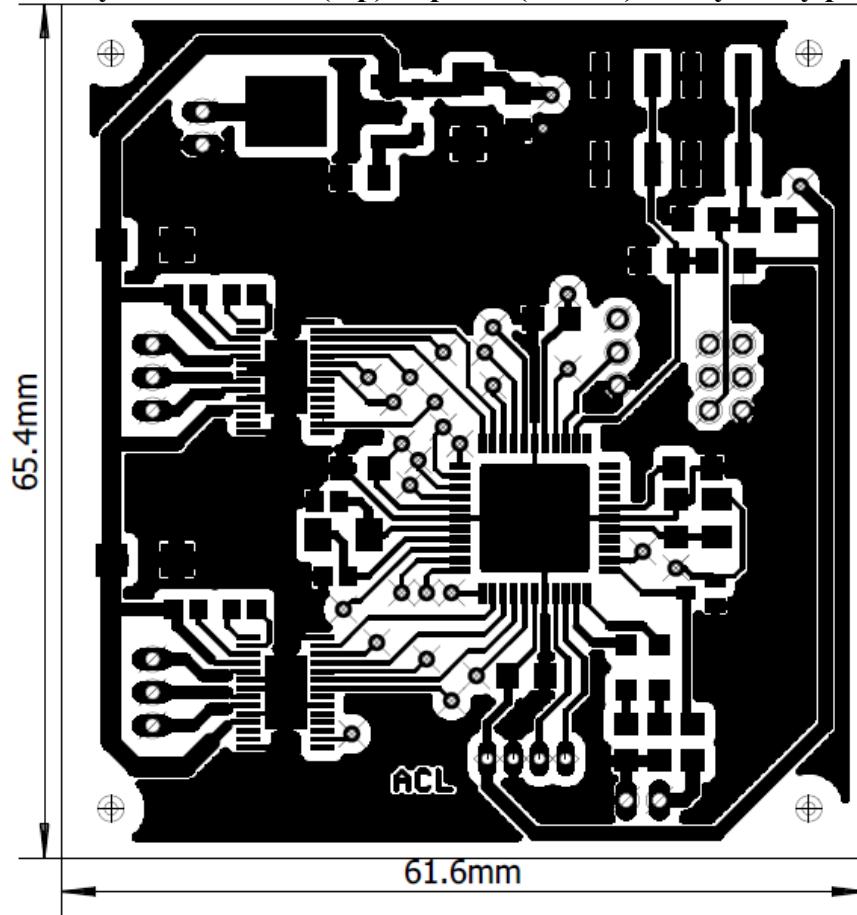
# Měření napětí



# Tlačítka

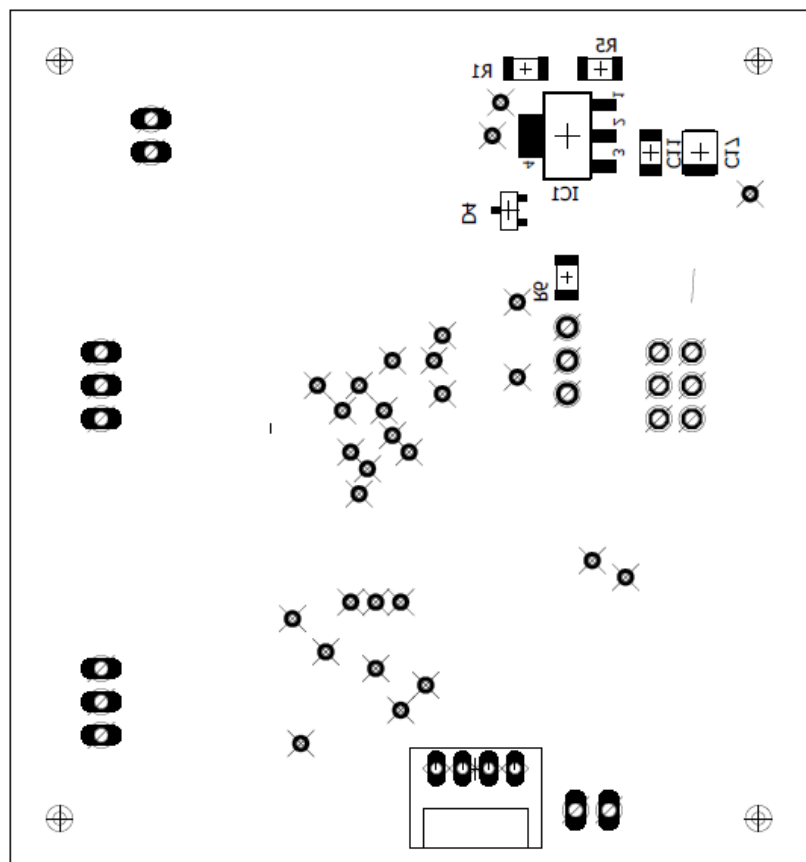
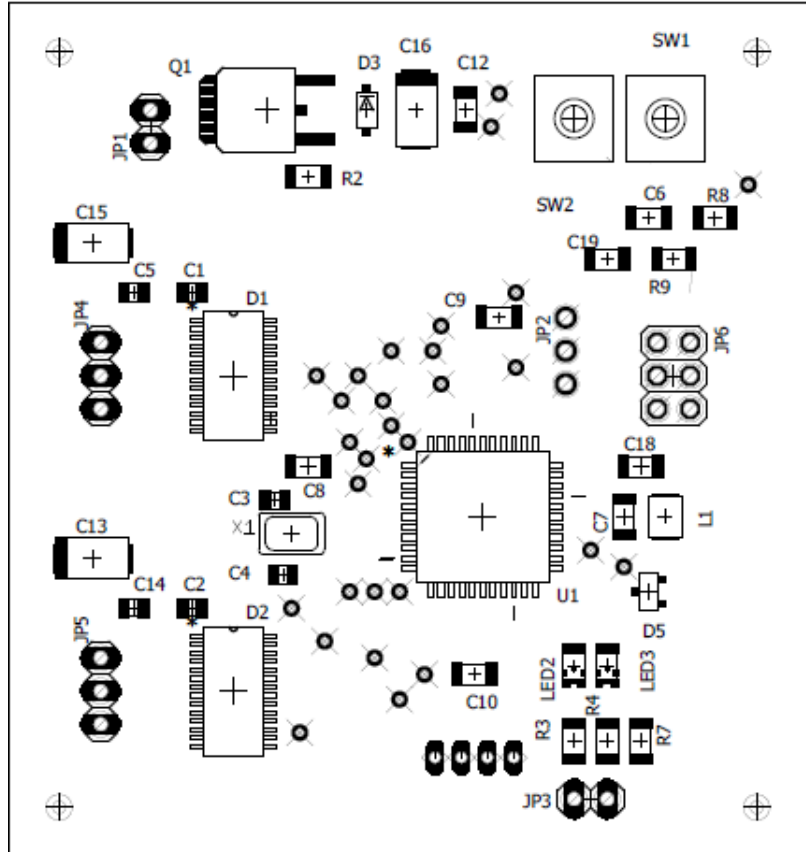


**Příloha B – Vodivý obrazec horní (top) a spodní (bottom) strany desky plošného spoje**

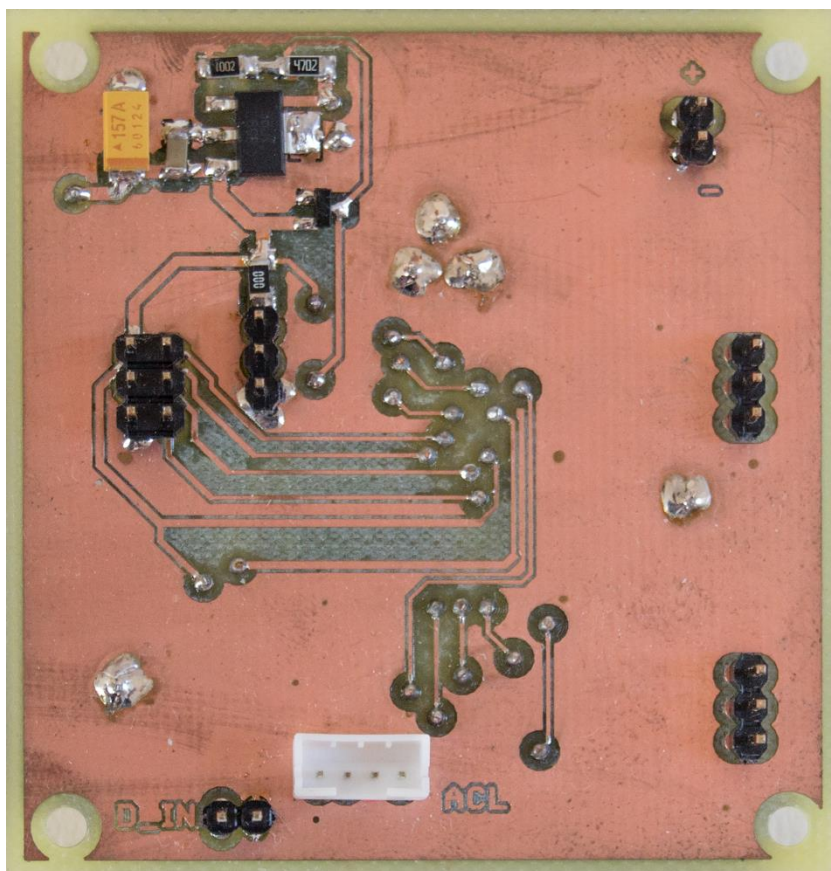
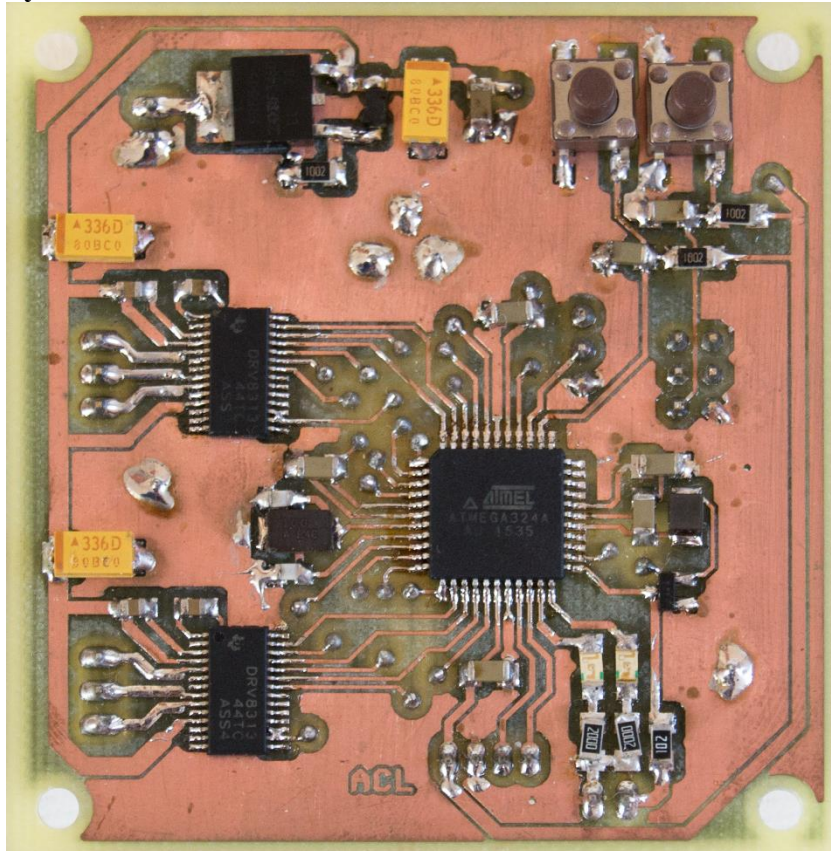




**Příloha C – Osazovací plán horní (top) a spodní (bottom) strany desky plošného spoje**



**Příloha D – Vyrobená deska**



**Příloha E – Seznam součástek**

Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
2	LED2, LED3		CHIPLED_1206	LED dioda
2	JP1, JP3		1X02	Pin header
2	JP4, JP5		1X03	Pin header
1	JP2		1X03	Pin header
1	JP6		2X03	Pin header
1	R6	0 $\Omega$	R1206	Rezistor
4	C1, C2, C5, C14	0,1 $\mu$ F	C0805	Kondenzátor
9	C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C18, C19	100 nF	C1206	Kondenzátor
1	C17	100 $\mu$ F / 6,3 V	SMC_B	Kondenzátor polarizovaný
4	R2, R5, R8, R9	10 k $\Omega$	R1206	Rezistor
1	L1	10 $\mu$ H	L3225M	Cívka
2	C3, C4	18 pF	C0805	Kondenzátor
1	R7	1 k $\Omega$	R1206	Rezistor
2	R3, R4	200 $\Omega$	R1206	Rezistor
3	C13, C15, C16	33 $\mu$ F / 20 V	SMC_C	Kondenzátor polarizovaný
1	R1	47 k $\Omega$	R1206	Rezistor
1	X1	7A-10.000MAAJ-T	NX5032	SMT krystal
1	U1	ATMEGA324A-AU	TQPF-44	8-bit Atmel mikrokontrolér
2	D4, D5	BAT54S	SOT23	Schottkyho Dioda
2	D1, D2	DRV8313PWP	HTSSOP-28	Trojité pól můstek
1	Q1	IRFR5505	D-PAK_TO252AA	Mosfet tranzistor
1	IC1	LM2936MP-3.3	SOT223	LDO napěťový regulátor
1	D3	PMEG4030ER	SOD123	Dioda
1	SB1	S4B-PH-K-S	S4B-PH-K-S	Konektor
2	SW1, SW2	B 6812 SMD		Tlačítko SMT