

**České vysoké učení technické v Praze**

**fakulta elektrotechnická**

**katedra mikroelektroniky**

**Bakalářská práce**

**Řízení PCB motoru**

**Autor:** Aleš Janeček

**Vedoucí práce:** Lubor Jirásek Ing., CSc.

**2014**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **J A N E Č E K Aleš**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Řízení PCB motoru**

### ***Pokyny pro vypracování:***

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se vlastností a způsobu řízení motorů PCB.
2. Na základě 1) a zakoupeného vzorku motoru PCB navrhnete a realizujete přípravek pro výuku umožňující demonstrovat vlastnosti a způsoby řízení motoru PCB.
3. Provedte ověřovací měření přípravku a zhotovte vzorový protokol o měření.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.
5. Přípravek zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

### ***Seznam odborné literatury:***

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. - III. BEN, Praha 1996 a pozdější vydání. ISBN 80-86056-02-3
- [2] <http://pcbmotor.com/evaluation-kits-10/motors-with-encoder-18/start-kit-30-mm-331.html>
- [3] <http://pcbmotor.com/information/design-examples-35/>

Vedoucí: **Ing. Lubor Jirásek, CSc.**

Platnost zadání: 28. 2. 2014

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 6. 2. 2013

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Řízení PCB motoru“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne: 3.1.2014

podpis:

## **Abstrakt:**

Tato práce se zabývá principem PCB motoru, možnostmi určení polohy otáčení motoru, řízením motoru a realizací přípravku umožňujícího využití vlastností PCB motoru. Dále se zabývá ověřením jeho charakteristik a měřením vlivu charakteristik napájecích signálů. Přípravek se povedlo úspěšně zrealizovat a vyhodnotit jeho možnosti.

This thesis undertakes the principle of PCB motor, possibilities of determination of traverse location, motor control and producing prototype enabling usage of PCB motor qualities. It also confirms its characteristics by measurement and tries to determinate effect of alternation of supply signals characteristics. The prototype was built successfully and its potential was evaluated.

## Seznam použitých zkratek a symbolů:

### Fyzikální veličiny:

Značka	Jednotka	Popis
$a$	m	amplituda stojaté vlny
$f$	Hz	frekvence
$r$	m	poloměr nosníku
$t$	s	čas
$v$	V	amplituda elektrické signálu v nosníku
$I$	A	proud
$U$	V	napětí
$\lambda$	m	vlnová délka
$\omega$	rad/s	úhlová rychlost
$\Omega$	ohm	elektrický odpor

### Zkratky:

Pz.	piezoelektrický
DPS	deska plošných spojů

### Termíny:

Mechanický element	část pz. motoru na kterou působí pz. aktuátory
PCB motor	kruhový ultrazvukový piezoelektrický motor vytvořený na desce plošných spojů firmou PCBMotors
Nosník	část PCB motoru, na které jsou přidělané pz. aktuátory, které v ní vytvářejí postupnou vlnu

## Obsah:

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2 CÍLE .....</b>	<b>9</b>
<b>3 SEZNÁMENÍ S PCB MOTOREM.....</b>	<b>10</b>
3.1 Výhody PCB motoru .....	10
3.2 Nevýhody PCB motoru .....	11
<b>4 PRINCIP .....</b>	<b>12</b>
4.1 Piezoelektrický jev .....	12
4.2 Principy piezoelektrických motorů .....	12
4.2.1 Svěrací piezoelektrický motor.....	12
4.2.2 Kráčející piezoelektrický motor.....	13
4.2.3 Setrvačný piezoelektrický motor .....	14
4.2.4 Motor se stojatou vlnou .....	15
4.2.5 Motor s postupnou vlnou .....	17
<b>5 ARCHITEKTURA PCB MOTORU .....</b>	<b>20</b>
5.1 Tvar nosníku .....	20
5.1.1 Nosník .....	21
5.1.2 Stavba .....	22
5.1.3 Tvar nosníku.....	23
5.1.4 Můstky .....	23
5.1.5 Aktuátory .....	23
5.1.6 Mechanický element (rotor).....	25
<b>6 OVLADAČ PCB MOTORU.....</b>	<b>28</b>
6.1 Napájení motoru.....	29
6.1.1 Obvod 555 .....	29
6.1.2 Obvod 4017D .....	29

6.1.3 Obvod 74AC157D.....	30
6.1.4 Tranzistory a transformátor.....	31
<b>6.2 Obvod kontroly a přizpůsobení frekvence.....</b>	<b>32</b>
6.2.1 Princip.....	32
<b>7 URČENÍ POLOHY MOTORU.....</b>	<b>33</b>
<b>7.1 Potenciometrické senzory.....</b>	<b>33</b>
<b>7.2 Kapacitní senzory.....</b>	<b>33</b>
<b>7.3 Induktivní senzory.....</b>	<b>33</b>
<b>7.4 Optické senzory.....</b>	<b>33</b>
<b>7.5 Senzory na principu Hallova jevu.....</b>	<b>34</b>
<b>8 REALIZACE.....</b>	<b>40</b>
<b>8.1 Řídicí obvod.....</b>	<b>40</b>
8.1.1 Mikrokontrolér.....	42
8.1.2 Převodník USB/USART.....	43
8.1.3 Zdroj napětí pro PCB motor.....	44
<b>8.2 Systém určení polohy natočení PCB motoru.....</b>	<b>45</b>
8.2.1 Senzor AS5311.....	45
8.2.2 Magnetický pásek MS10.....	46
8.2.3 Realizace magnetického kotouče.....	47
8.2.4 Obvod senzoru.....	48
8.2.5 Sestavení.....	48
<b>8.3 Program mikrokontroléru.....</b>	<b>49</b>
8.3.1 Start.....	50
8.3.2 Určení polohy.....	50
<b>9 MĚŘENÍ.....</b>	<b>54</b>
<b>9.1 Ověření základních charakteristik.....</b>	<b>54</b>
9.1.1 Měření volt-ampérové charakteristiky motoru.....	54
9.1.2 Měření závislosti rychlosti otáčení na napájecím napětí.....	55

<b>9.2 Měření vlivu charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí .....</b>	<b>57</b>
9.2.1 Napájení motoru.....	57
9.2.2 Měření .....	59
<b>10 DISKUZE .....</b>	<b>60</b>
<b>10.1 Výsledky realizace: .....</b>	<b>60</b>
10.1.1 Řídicí obvod: .....	60
10.1.2 Systém určení polohy: .....	60
<b>10.2 Výsledky měření.....</b>	<b>61</b>
10.2.1 Ověření základních charakteristik.....	61
10.2.2 Měření vlivu charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí .....	62
<b>11 ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
<b>12 LITERATURA: .....</b>	<b>64</b>



# 1 Úvod

Celý svět je neustále v pohybu. Člověk má potřebu se vším hýbat, pořád se snaží překonávat současné limity. Tímto limitem je nejčastěji vysoká rychlost, ale existují aplikace, ve kterých je vysoká rychlost nežádoucí. V těchto aplikacích je naopak kladen důraz na přesnost. Pro takové aplikace se čím dál více začínají využívat piezoelektrické motory.

Existuje mnoho různých druhů piezoelektrických motorů. Každý druh využívá piezoelektrického jevu jiným způsobem a každý druh se hodí pro jinou aplikaci. Nejznámějšími jsou piezoelektrické motory svěrací, tzn. kráčející pz. motory.

Moje práce se zabývá principem a způsobem využití PCB motoru. PCB motory jsou jedinečné. Stator těchto motorů je možné vytvořit přímo na desce plošného spoje, což je pro motory tak zvláštní, že podle toho byly i pojmenovány (PCB je anglický ekvivalent DPS).

PCB motory jsou novým typem pz. motoru, který zatím nevešel ve všeobecnou známost. Moje práce se proto snaží proniknout do problematiky těchto unikátních motorů, zjistit jaké jsou jejich vlastnosti a omezení. Formou této práce se snažím rozšířit povědomí o PCB motorech, ukázat možnosti jejich využití a vyzdvihnout jejich užitečnost.

## 2 Cíle

Cíl této práce je vysvětlit princip rotačního PCB piezoelektrického motoru, prostudování jeho vlastností, možností a omezení a sestavit přípravek pro demonstraci využití PCB motoru a jeho řízení.

Bylo nutno splnit tyto dílčí cíle:

### Teoretická příprava

- prostudovat princip PCB motoru
- prostudovat možnosti řízení
- prostudovat možnosti měření polohy

### Elektrické řešení přístroje

- provést výběr vhodných komponent
- navrhnout obvody a realizovat je

### Mechanické řešení

### Návrh software

- navrhnout a realizovat program pro mikrokontrolér
- vyladit a provést funkční zkoušky programu

### Měření

- prostudovat možnosti měření
- navrhnout a zrealizovat přípravek
- ověřit vlastnosti měřením a vyhodnotit výsledky

## 3 Seznámení s PCB motorem

Začněme, tím co to vlastně PCB motor je. PCB motor využívá opačný piezoelektrický jev. Motor sám o sobě se skládá ze statoru, v tomto případě je to okružní vyříznuté v desce plošného spoje, a rotoru. Rotor může být z jakéhokoli nevodivého materiálu s dostatečným činitelem smykového tření, který je dostatečnou silou přitlačen ke statoru. V našem případě je to kolečko laminátu, ale motor bude fungovat, i pokud na něj položíme například keramický hrnek. Již z těchto vlastností nám plynou výhody.

### 3.1 Výhody PCB motoru

Výhody PCB motoru jsou následující:

- Stator může být přímo součástí plošného spoje a statorů může být více na jedné desce, jak je vidět na obr. 1. Nabízí se tím velice kompaktní řešení a lze tak dosáhnout minimálních nároků na prostor a materiál.
- PCB motor nepotřebuje žádné převody, brzdy ani hřídel, a jelikož tyto části chybí, nemůže se na nich ztrácet energie a dosáhne se tím zvýšení účinnosti.
- PCB motor si zachovává plnou torzní sílu i ve vypnutém stavu a přitom nespotřebovává žádnou energii, což vede k dalším úsporám energie.
- Motor se dá ovládat s vysokou přesností. Výrobce dosáhl přesnosti 0,5 úhlové vteřiny.

Těmito výhodami překonává PCB motor motory krokové, které nemohou být integrovány na desku plošných spojů, jsou omezeny tvarem, potřebují stálý přísun energie a ztrácí točivý moment se vzrůstající přesností.



Obr. 1 DPS se statory PCB motorů (převzato z [1])

### 3.2 Nevýhody PCB motoru

Nevýhody PCB motoru jsou následující:

- PCB motory jsou zatím omezeny velikostí, lze dosáhnout průměru od minima 20 mm do maxima 120 mm.
- PCB motory jsou omezeny rychlostí otáčení, čím větší průměr tím větší torzní síla, ale tím menší rychlost otáčení. Rychlost otáček se pohybuje v řádu jednotek za sekundu.
- PCB motory jsou dost drahé.

## 4 Princip

Následující podkapitoly se zabývají architekturou rotoru a principem činnosti samotného motoru. Vysvětlují, jak motor funguje a jaké podmínky musí být splněny pro to, aby motor fungoval.

### 4.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat napětí při mechanické deformaci. Při stlačení piezoelektrického materiálu na něm vznikne elektrické napětí. Je to vratný jev, který se využívá například v piezoelektrických zapalovačích. V současnosti probíhá výzkum využívající piezoelektrické materiály jako prostředek pro nabíjení baterií při chůzi.

Piezoelektrické motory však využívají opačný piezoelektrický jev, který spočívá v deformaci piezoelektrického materiálu při přiložení napětí.

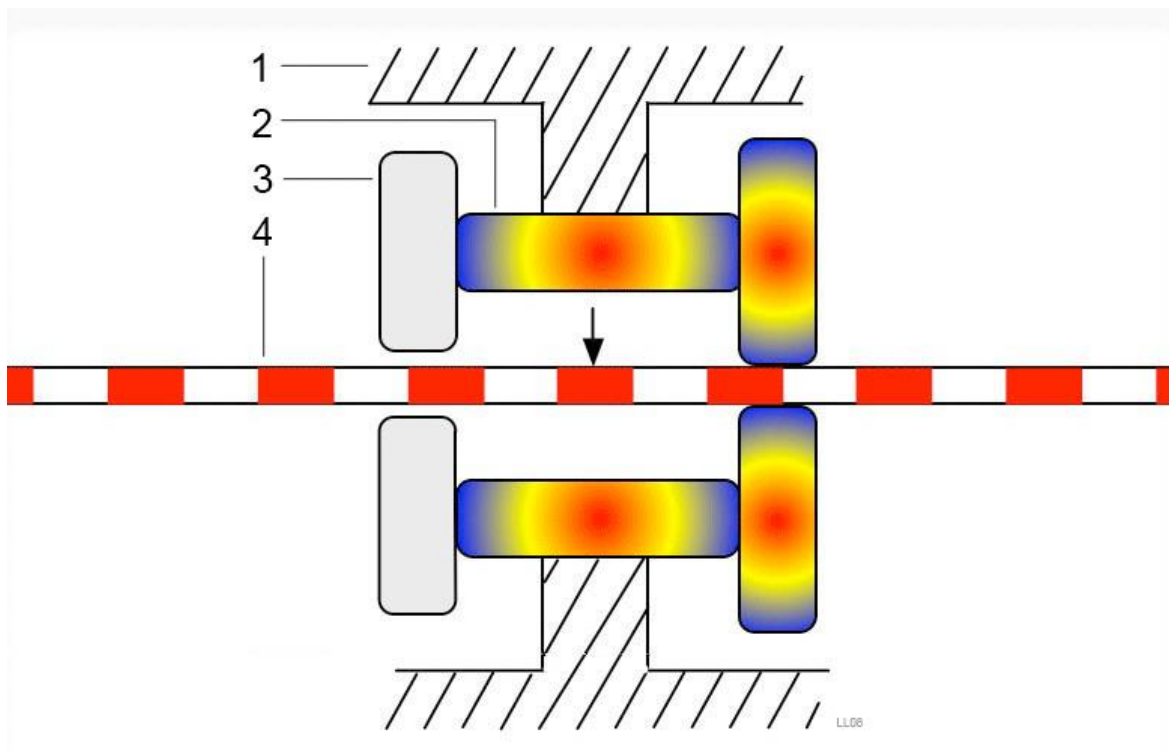
### 4.2 Principy piezoelektrických motorů

Piezoelektrické ultrazvukové motory jsou známy více než 30 let. Jedná se o motory, kde piezoelektrické aktuátory fungují jako elektro-mechanické transduktory, využívají opačný piezoelektrický jev pro vytvoření pohybu. Jedná se o zařízení, která převádějí omezený pohyb smršťujícího/roztahujícího se pz. elementu na nekonečný lineární nebo kruhový pohyb.

Piezoelektrické motory mohou být buď kvazistatické nebo ultrazvukové. Kvazistatické motory se dělí na svěrací a setrvačné, zatímco ultrazvukové motory se dělí na motory využívající stojatou nebo postupnou vlnu.

#### 4.2.1 Svěrací piezoelektrický motor

Nákres svěracího piezoelektrického motoru lze vidět na obrázku 2. Ve svěracím pz. motoru dva svěrací pz. elementy (viz 3 obr. 2) sevřou mechanický element (viz 4 obr. 2), příčný pz. element (viz 2 obr. 2) se smrští nebo roztáhne, a tak dojde k posunu mechanického elementu. Svěrací pz. aktuátory se rozevřou, mechanický element je uchopen mezi další pár svěracích pz. elementů a cyklus se opakuje. Pár svěracích pz. elementů, který se podílí na pohybu, drží mechanický element, zatímco druhý pár je stažen a vrací se zpět do výchozí pozice.

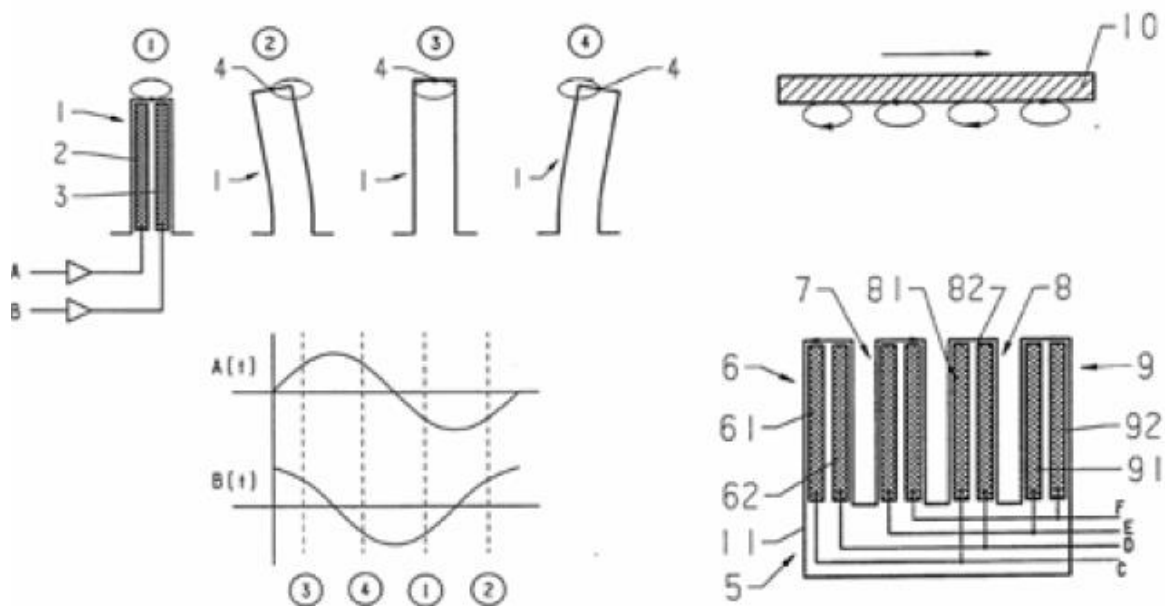


Obr. 2 Znárodnění svěracího principu - 1 - uchycení pz. části, 2 - příčný pz. element, 3 - svěrací pz. element, 4 - mechanický element. (převzato z [2])

#### 4.2.2 Kráčeující piezoelektrický motor

Kráčeující piezoelektrické motory se řadí mezi svěrací piezoelektrické motory. Motor se skládá z tyček, které jsou tvořeny dvěma od sebe izolovanými piezoelektrickými elementy. Na jeden element je přiveden sinusový signál, na druhý je přiveden signál kosinový. Díky smršťování jednoho a natahování druhého elementu je dosaženo eliptického pohybu konce tyčky, a tím i pohybu mechanického elementu.

Na obr. 3 je vidět tyčka složená ze dvou piezoelektrických elementů s přivedenými signály A a B, jejichž průběh je vidět na grafu pod nimi.

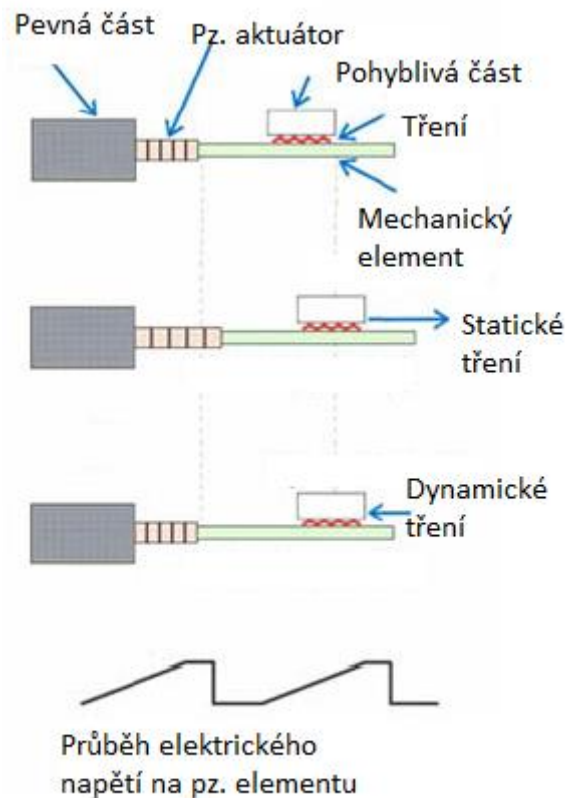


Obr. 3 Piezoelektrický motor na chodícím principu (převzato z [3])

V okamžiku 1 jsou na obou elementech záporná napětí a tyčka je stažena (nedotýká se mechanického elementu). V okamžiku 2 je signál A kladný a signál B záporný, tím dojde k protažení jednoho z pz. elementů, k ohnutí tyčky a ke kontaktu s mechanickým elementem. Signál A přechází do kladné části svého průběhu, a jelikož signál B je také kladný, tyčka se protahuje a narovná (okamžik 3). Dochází tak k pohybu mechanického elementu. Celý proces se opakuje až do okamžiku 4, kdy se pohyb ukončí a tyčka se stáhne do své výchozí pozice.

#### 4.2.3 Setrvačný piezoelektrický motor

Setrvačný piezoelektrický motor, jak už název napovídá, využívá setrvačné síly. Pohyblivá část se pomalu posune s mechanickým elementem díky protažení pz. aktuátoru (působí mezi nimi statické tření). Tento aktuátor se následně rychle stáhne, čímž dojde k rychlému pohybu mechanického elementu a sklouznutí pohyblivé části (působí mezi nimi tření dynamické). Ta jakoby zůstane na stejném místě. Můžeme to přirovnat ke stržení ubrusu z obloženého stolu, kdy na stole všechno zůstane na svém místě a ubrus je volný. Princip motoru je možné si prohlédnout na obr. 4.



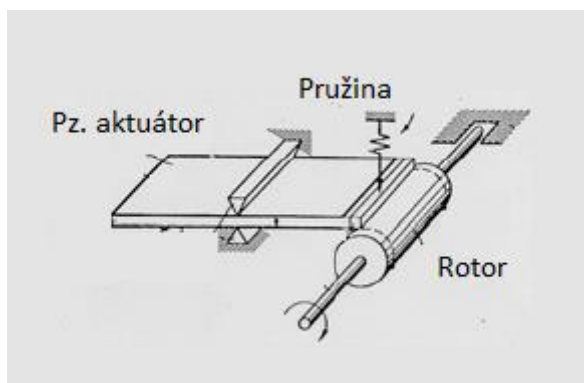
Obr. 4 Znáornění funkce setrvačného piezoelektrického motoru a průběh napětí na piezoelektrickém elementu (převzato z [3])

#### 4.2.4 Motor se stojatou vlnou

Motor se stojatou vlnou pracuje na principu mikro-pulzů. Elektrický signál přivedený na pz. aktuátor způsobí jeho periodické stahování a roztahování, tyto pulzy jsou nasměřovány na mechanický element, kterým pohybují. Můžeme je rozdělit na jednosměrné, nebo obousměrné.

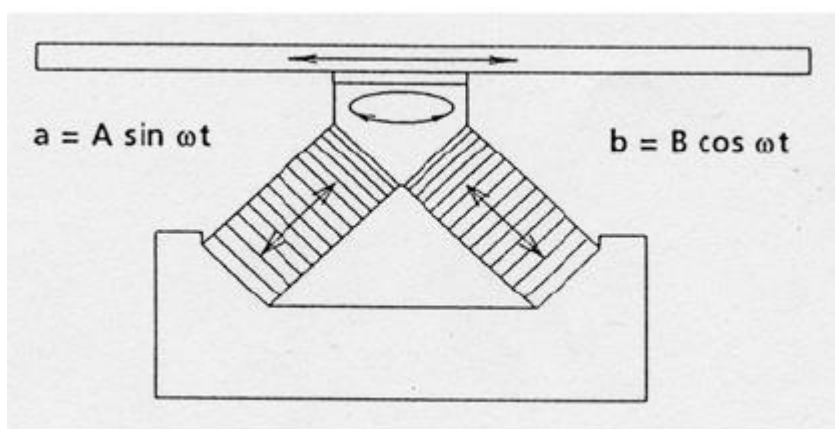
Nejjednodušší jednosměrné piezoelektrické motory by se daly přirovnat k vodnímu kolu. Mechanický element má podobu rotoru a přední strana pz. aktuátoru je k němu přitlačována pružinou, v pz. aktuátoru jsou vytvořeny oscilace a pz. aktuátor se neustále stahuje a roztahuje. Při každém roztahení pz. aktuátor zatlačí na lopatku a otočí rotorem. Princip takového motoru je možné si prohlédnout na obr. 5.





Obr. 5 Zobrazení principu jednosměrného pz. motoru se stojatou vlnou  
(převzato z [3])

Obousměrné pz. motory mohou využívat dvou pz. elementů, kdy superpozicí dvou neparalelních oscilací s různou fází dojde k vytvoření eliptického pohybu, podobně jako v případě tzv. kráčejících piezoelektrických motorů. Tento princip je vidět na obr. 6.



Obr. 6 Zobrazení principu obousměrného pz. motoru se stojatou vlnou  
(převzato z [3])

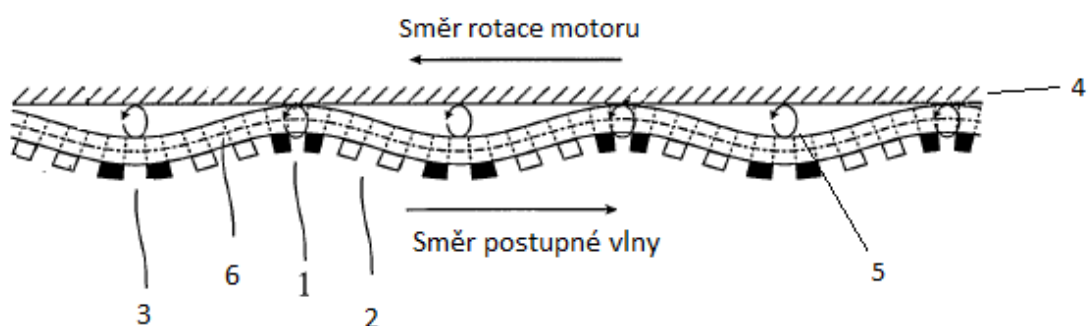
Další typy pz. motorů se stojatou vlnou využívají toho, že pz. aktuátor může být působením elektrického signálu protahován a ohýbán zároveň. Toho je možné dosáhnout složením pz. aktuátoru z většího množství pz. elementů, kdy na každý pz. element uvnitř aktuátoru je přiváděn jiný elektrický signál. Existuje větší množství různých designů využívajících tento princip.

#### 4.2.5 Motor s postupnou vlnou

PCB motor, na rozdíl od pz. motorů pracujících na krokovém principu, nevyužívá pz. elementy k vytvoření pohybu mechanického elementu, ale pomocí pz. elementů vytváří postupnou vlnu, která pohybuje mechanickým elementem.

##### 4.2.5.1 Generování postupné vlny

PCB motor využívá roztahování a smršťování pz. elementů k vytváření oscilací v nosníku. Tyto oscilace nosník rozvibrují. Pokud je nosník správně navržen a vibrace mají správnou frekvenci, v nosníku je vytvořena postupná vlna (viz obr. 7), která má amplitudu od 20 nm do 200 nm. Tato vlna poté díky tření roztočí rotor motoru.



Obr. 7 Znárodnění postupné vlny v nosníku: 1, 3 – liché dvojice pz. aktuatorů, 2 – sudá dvojice pz. aktuatorů, 4 – rotor, 5 – znárodnění pohybu segmentu nosníku, 6 – nosník, (převzato z [4])

Na aktuatory je přiveden oscilující elektrický signál. Tento signál je různý pro sudé a liché páry aktuatorů. Fáze signálu je shodná pro každý pár aktuatorů. Signál liché dvojice aktuatorů 3 je v našem případě posunutý o půl periody proti signálu liché dvojice 1. Pro sudé dvojice aktuatorů platí to samé, co pro liché dvojice s tím rozdílem, že signál na ně přivedený je fázově posunutý proti signálu přivedenému na liché dvojice aktuatorů.

Tyto signály způsobí roztážení nebo smrštění dvojic aktuatorů v závislosti na jejich fázi v daném místě. V našem případě je lichý pár 1 smrštěný a působí silou na nosník. Lichá dvojice aktuatorů 3 je roztážená, proto působí na nosník

opačně než lichá dvojice 1. Společným působením těchto sil dojde k ohnutí nosníku. Průběh napětí na sudé dvojici aktuátorů 2 prochází nulou a tato dvojice na nosník v tuto chvíli silově nepůsobí.

Takto jsou v nosníku vytvořeny oscilace, které při správném navržení přípravku vytvoří postupnou vlnu. Směr této vlny závisí na fázovém posunu signálů přiváděných na sudé a liché dvojice aktuátorů.

Liché páry vytváří v nosníku jednu stojatou vlnu a sudé páry vytváří druhou stojatou vlnu, superpozicí těchto dvou vln vznikne postupná vlna.

Rovnice vzniku postupné vlny vychází ze superpozice příčných ohybů v každém místě nosníku. Pokud si sinusový a kosinusový signál odpovídají, platí následující rovnice, kde  $a$  je amplituda stojaté vlny v nosníku o poloměru  $r$ , úhlové rychlosti  $\omega$  a amplitudě elektrického signálu  $v$ :

$$w = w_1 + w_2 \quad (1)$$

$$w = a(r, \omega, v) \cos(\omega t) \cos(3\theta) + a(r, \omega, v) \sin(\omega t) \cos(3\theta) \quad (2)$$

$$w = a(r, \omega, v) \cos(\omega t - 3\theta) \quad (3)$$

Z těchto vzorců vyplývá, že vznikne postupná vlna postupující rychlostí  $\omega/3$ . Pokud by se změnila fáze sinusového nebo kosinového signálu o  $180^\circ$  (změnilo by se znaménko v rovnici), vlna by postupovala směrem opačným.

Působením této vlny dochází v místech dotyku statoru s rotorem k pohybu (viz obr. 7). Třecí síla mezi státorem a rotorem způsobí roztočení rotoru v opačném směru než se pohybuje postupná vlna ve statoru. [4]

#### 4.2.5.2 Frekvence

Pro správnou funkci motoru s postupnou vlnou je velice důležitý výběr a nastavení vlnové délky postupné vlny. Frekvence motoru by se pokud možno měla pohybovat v pásmu ultrazvuku, aby frekvence průběhu napájecího napětí nebyla v pásmu slyšitelném pro člověka. Pokud frekvence signálů odpovídá frekvenci mechanické rezonance nosníku, dojde k zesílení amplitudy postupné vlny. Potom je možné použít průběhy s menší amplitudou napájecího napětí.

Vlnová délka by měla být vhodně zvolena tak, aby odpovídala vybranému materiálu a jeho parametrům. Frekvence mechanické rezonance nosníku by měla být stejná, jako je frekvence postupné vlny.

Je třeba, aby délka dráhy byla celočíselně dělitelná délkou vlny. Pokud by tomu tak nebylo, rozmístění aktuátorů by bylo nesymetrické a docházelo by k interferencím vln, což by vedlo ke špatné funkci motoru.

Rezonanční frekvence nosníku je závislí všech parametrech jako je tvar, tloušťka, šířka, délka, materiál, umístění pz. aktuátorů, délka a počet můstků ovlivňují rezonanční frekvenci nosníku.

Také je důležité si uvědomit, že rezonanční frekvence nosníku je závislá na okolních podmínkách, včetně hmotnosti zátěže a velikosti tření. Proto je dobré pro co největší účinnost opatřit motor obvodem pro dynamické nastavení optimální frekvence.

Nosník a můstky musí být navrhovány s ohledem na sílu, která na ně bude působit.

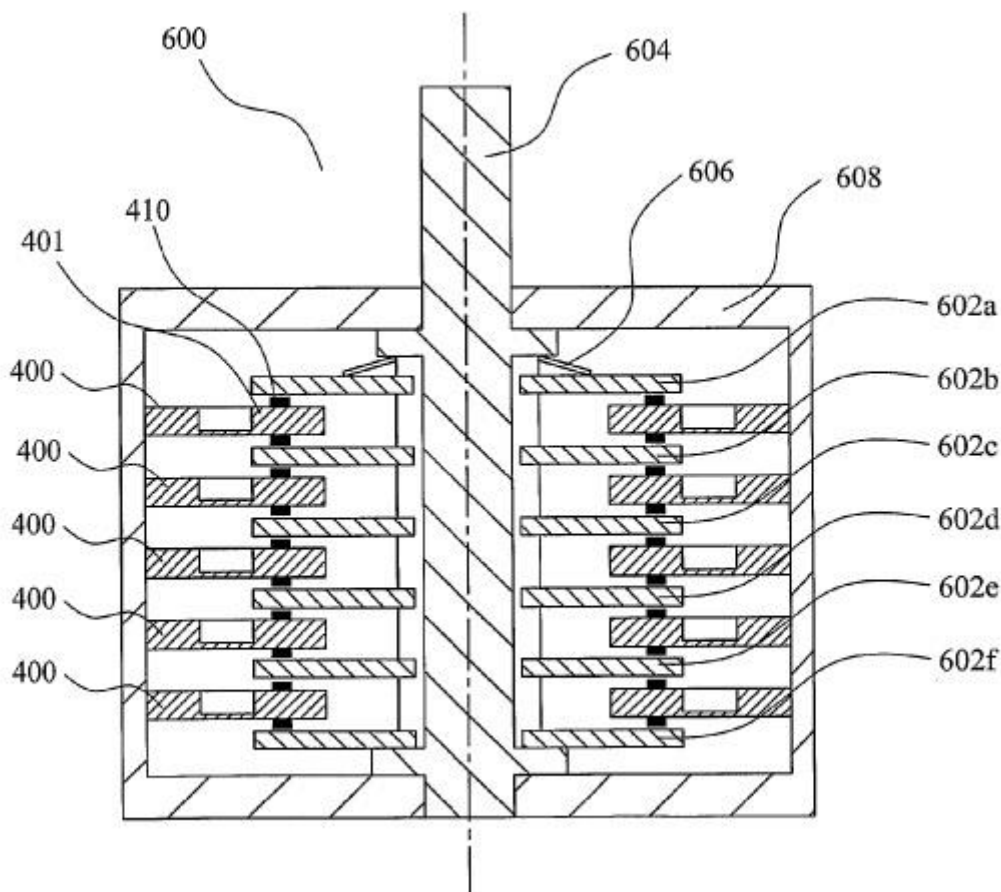
## 5 Architektura PCB motoru

Tato kapitola se zabývá architekturou PCB motoru a popisuje, jak může být motor sestaven. Popisuje také, jaké podmínky musí být splněny, aby motor fungoval, a jak zajistit jeho správnou funkci při proměnných vnějších podmínkách.

PCB motor se skládá z nosníku, který je osazen p.z. aktuátory. K němu musí být připojen ovladač, napájení a mechanický element, kterým obvykle nosník pohybuje. Je možné navrhnout motor i tak, aby se nosník pohyboval po mechanickém elementu.

### 5.1 Tvar nosníku

Motor s postupnou vlnou je nejčastěji postaven jako motor kruhový, kdy kruhový nosník má funkci statoru a působí na mechanický element (v tomto případě rotor), čímž ho roztočí. PCB motor může mít jeden nebo více nosníků, které jsou uspořádány nad sebou. Mezi nosníky aktuátorů jsou vloženy mechanické elementy, které jsou spojeny jednou hřídelí (viz obr. 8). Takovým uspořádáním lze docílit zvětšení torzní síly.

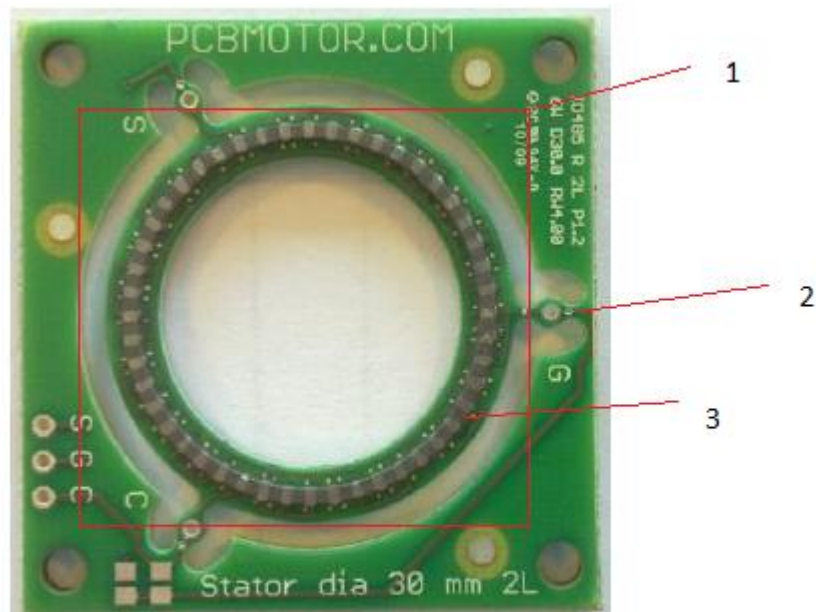


Obr. 8 Schéma PCB motoru s více nosíky nad sebou s vloženými mechanickými elementy na jedné hřídeli: 400 – DPS, 401 – nosíky, 410 – pz. aktuátory, 602 a-f – mechanické elementy na společné hřídeli - 604, 606 – pružina, (převzato z [4])

Je možné postavit motor s postupnou vlnou, který bude pohybovat mechanickým elementem po lineární nebo zakřivené dráze. Takový motor se může skládat z množství nosíků, které budou pohybovat třecím elementem po určené dráze. U takových motorů je nutné, kvůli správné funkci motoru, dávat pozor, aby v každém nosíku byla použita správná vlnová délka postupné vlny.

### 5.1.1 Nosník

Nejdůležitější část motoru s postupnou vlnou je nosník. Na obr. 9 je vidět klasický příklad nosíku vytvořeného v DPS. Nosník je v tomto případě kruh vyfrézovaný v DPS, spojený s DPS třemi můstky a osazený pz. elementy.



Obr. 9 Kruhový nosník v DPS: 1 – nosník, 2 – můstek, 3 – pz. aktuátor (převzato z [5])

Správná funkce motoru závisí přímo na parametrech nosníku. Všechny parametry jako je tvar, tloušťka, šířka, délka, materiál, umístění pz. aktuátorů, délka a počet můstků ovlivňují rezonanční frekvenci nosníku, která je důležitá pro správné navržení a správnou funkci motoru.

### 5.1.2 Stavba

Nosník může mít různý tvar a různou velikost, ale obojí musí splňovat určité podmínky.

Materiál nosníku se různí v každé aplikaci. Je vybírán tak, aby bylo dosaženo požadované rezonanční frekvence.

Nosník musí obsahovat vodiče pro rozvod napájení, které jsou nejčastěji tři: napájecí vodič pro sinusový a kosinový průběh napájecího napětí pro dvě skupiny aktuátorů a jeden pro společný vodič. Teoreticky by napájecích vodičů mohlo být více, pokud by motor obsahoval více než dvě skupiny aktuátorů, které by bylo potřeba ovládat samostatně. Vodič může vést signál do jednoho aktuátoru nebo do jejich skupiny. Vodiče mohou být umístěny na jedné straně, na obou stranách

nebo mohou být zapuštěné dovnitř nosníku. Materiál nosníku může být například sklo, epoxid, nebo keramika.

Nosník je připojen můstky ke zbytku zařízení a osazen aktuátory. Každý aktuátor musí být připojen ke dvěma vodičům, k jednomu z napájecích vodičů a k vodiči společnému. Aktuátory mohou být umístěny na jedné nebo na obou stranách. Mohou být umístěny na povrchu nebo zapuštěny. Je možné je připojit mnoha způsoby, například pájením, lepením či přivařením.

Pokud jsou aktuátory umístěny po obou stranách nosníku, je nutné, aby z každé strany byl přiložen mechanický element. Tímto uspořádáním se zvýší efektivita motoru.

### 5.1.3 Tvar nosníku

Nosník lze navrhnout jako uzavřenou smyčku symetrickou nebo nesymetrickou kolem vlastní osy. Vlnová délka postupné vlny by měla být o řád menší než nejmenší poloměr ohybu.

Nosník může být navržen i jako otevřená smyčka, poté ale konce nosníku způsobují nežádoucí odraz postupné vlny. Tyto odrazy mohou být absorbovány správným ovládním aktuátorů umístěných na koncích nosníku. Délka postupné vlny by opět měla být o řád menší než nejmenší poloměr ohybu.

### 5.1.4 Můstky

Můstky jsou velice důležitá součást nosníku. Pojí nosník se zbytkem zařízení a vedou do nosníku napájecí vodiče a vodič společný. Dále úplně nebo částečně eliminují nežádoucí vibrace v těch částech DPS, kde jsou vibrace nežádoucí. Můstky by měly být alespoň tři a měly by být navrhovány s ohledem na sílu, která na ně bude působit.

### 5.1.5 Aktuátory

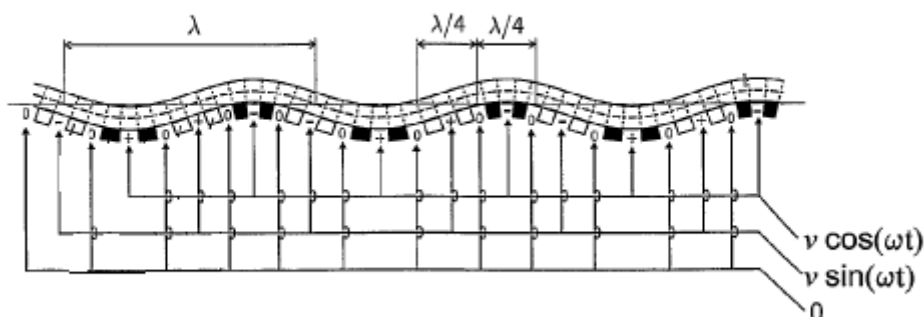
Aktuátory mohou být piezoelektrické nebo magnetostatické (roztahují se podle polarizace magnetické pole). Lze kombinovat různé typy aktuátorů na jednom nosníku. Aktuátory mohou mít různou velikost a tvar, který by měl být přizpůsoben navrhované aplikaci.



Počet aktuátorů na jedné straně nosníku by měl být nejméně 4 krát větší než je počet vlnových délek postupné vlny na její dráze ( $P \geq 4.n$ ). Doporučený počet je  $P = 4.k.n$ , kde  $k$  je počet aktuátorů v jedné podmnožině (v našem případě je touto podmnožinou dvojice aktuátorů 1 nebo 2 viz obr. 7) a  $n$  je počet vlnových délek postupné vlny. Na každou vlnovou délku by tedy měly být 4 dvojice aktuátorů. První dvojice se podílí na tvorbě jedné stojaté vlny a druhá dvojice na tvorbě druhé stojaté vlny.

### 5.1.5.1 Rozmístění a připojení aktuátorů

Rozmístění aktuátorů je pro správnou funkci kritické. Aktuátory svou interakcí s nosníkem vytvářejí vibrace, a tím i postupnou vlnu, která otáčí rotorem.



Obr. 10 Postupná vlna v nosníku (převzato z [4])

Na obr. 10 je znázorněna vlna v nosníku s aktuátory připojenými na jednotlivé napájecí vodiče. Černé páry jsou připojeny k vodiči s kosinovým průběhem napájecího napětí a ke společnému vodiči, zatímco bílé páry jsou připojeny k vodiči se sinusovým průběhem napájecího napětí a společnému vodiči. Označení signálů jako sinus a cosinus je pouze symbolické, ukazuje na jejich fázový posun o čtvrt periody.

Na obr. 10 je znázorněno, jak by měly být skupiny aktuátorů správně rozmístěny. Vzdálenost středu jedné skupiny aktuátorů k nejbližšímu středu jiné skupiny aktuátorů připojené na stejný průběh napájecího napětí musí být vždy půl vlnové délky. Pokud by tomu tak nebylo, nedošlo by k vytvoření stojaté vlny, nebo by došlo k vytvoření postupné vlny s jiným vlnovým číslem. Doporučená vzdálenost středů dvou nejbližších skupin aktuátorů připojených na jiný napájecí

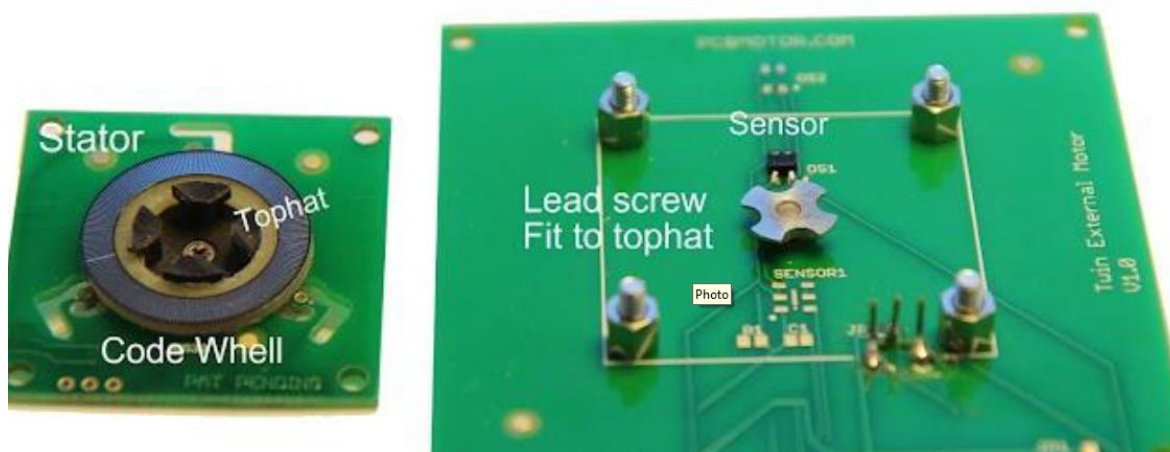
průběh je čtvrt vlnové délky. Tato vzdálenost musí být stejná jako je fázový posun signálů (posun o čtvrt periody znamená vzdálenost čtvrt vlnové délky mezi středy skupin). Takovým zapojením docílíme toho, že v uzlech jedné stojaté vlny se vždy nachází skupina aktuátorů patřící k druhé stojaté vlně. Tím je zajištěno, že bude generována pouze postupná vlna s požadovaným vlnovým číslem.

### 5.1.6 Mechanický element (rotor)

Mechanický element může mít jakýkoli tvar, pokud je po celou dobu zajištěn jeho kontakt s nosníkem. Mechanický element může být plný, může mít vyříznutý střed, nebo v jeho středu může být umístěna například závitová tyč. Tyto možnosti jsou zobrazeny na obr. 11 a 12.



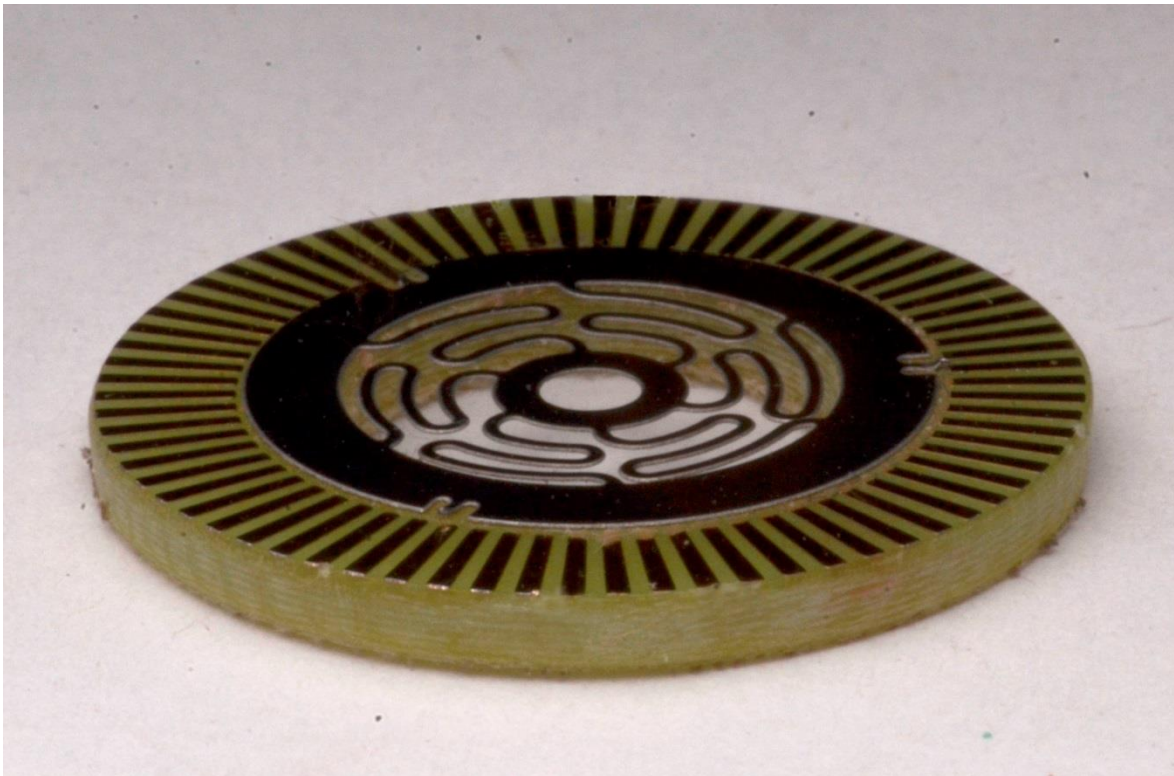
Obr. 11 Rotor s prázdným středem, pružinou a rotačním enkodérem (převzato z [6])



Obr. 12 DPS s připojením rotoru ze závitovou tyčí (převzato z [7])

Pro správnou funkci motoru je důležité smykové tření mezi nosníkem a mechanickým elementem, proto je třeba dbát na správnou úpravu povrchu mechanického elementu. V případě nedostatečného smykového tření lze na mechanický element aplikovat speciální pásku, která správné smykové tření zajistí.

Pro správný kontakt je také potřeba zajistit dostatečnou přitlačnou sílu, této síly lze dosáhnout za pomoci pružiny, viz obr. 11 a 13. Tato síla musí být minimálně 0,6 N na každých 8 pz. elementů. Pokud by byla menší, motor by mohl prokluzovat. Přitlačná síla nesmí být ani příliš velká, došlo by tím k zastavení pohybu motoru, v důsledku omezení oscilací nosníku.



Obr. 13 Rotor s pružinou a rotačním enkodérem (převzato z [8])

Materiál mechanického elementu může být libovolný, ale nesmí být zkratovány jednotlivé pz. elementy. Materiál mechanického elementu a jeho povrchová úprava ovlivňují hluk, který vzniká při otáčení a který může být nežádoucí.

Díky tomu, že mechanický element je s nosníkem spojen pouze mechanickým kontaktem, je možné mechanický element zablokovat a motor to

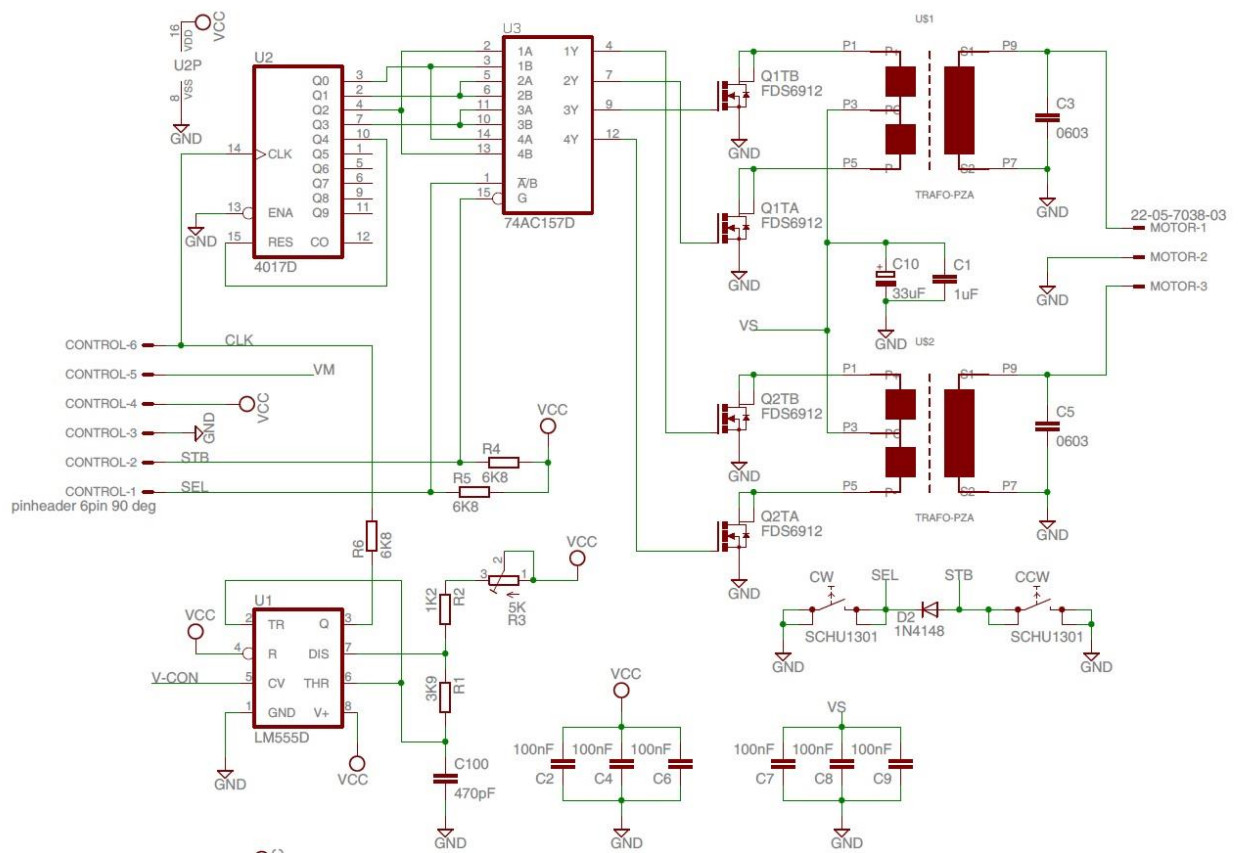
nepoškodí. Může však dojít k oděru povrchu mechanického elementu. Použitím třecí (frikční) pásky zvýšíme třecí sílu mezi statorem a rotorem a třecí element tím ochráníme proti oděru. Pokud se odře třecí páska, lze ji vyměnit nebo přelepit.

Pokud je vypnutý přívod elektřiny, je možné mechanickým elementem pootočit do nové polohy.

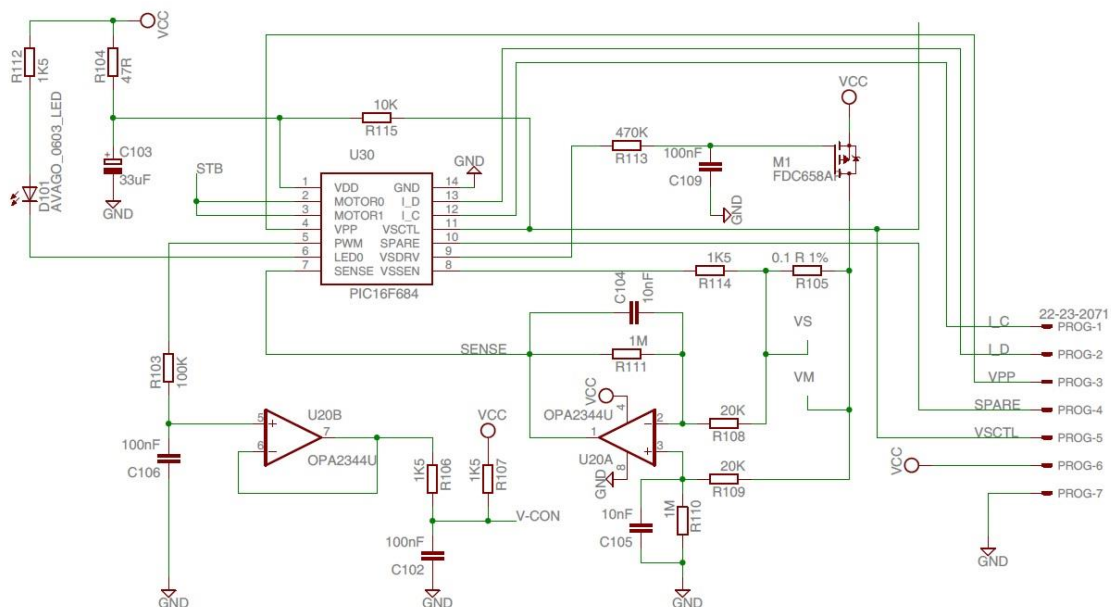
## 6 Ovladač PCB motoru

Ovladač PCB motoru je elektrický obvod, který má za úkol dodávat motoru potřebnou energii pro jeho funkci a také se starat o jeho správnou funkci. Tento ovladač je součástí dodaného PCB motoru.

Na obr. 14 a 15 (kvůli čitelnosti i v příloze) je elektrické schéma ovladače. Ovladač se skládá ze dvou částí. Část první je obvod starající se o vytvoření správných napájecích průběhů pro PCB motor. Částí druhou je obvod pro kontrolu a přizpůsobení frekvence napájecích průběhů.



Obr. 14 První část ovladače PCB motoru (převzato z [9])



Obr. 15 Druhá část ovladače PCB motoru (převzato z [9])

## 6.1 Napájení motoru

Zdroj pro PCB motor má za úkol vytvořit elektrické signály se správným tvarem, frekvencí, fází a amplitudou.

### 6.1.1 Obvod 555

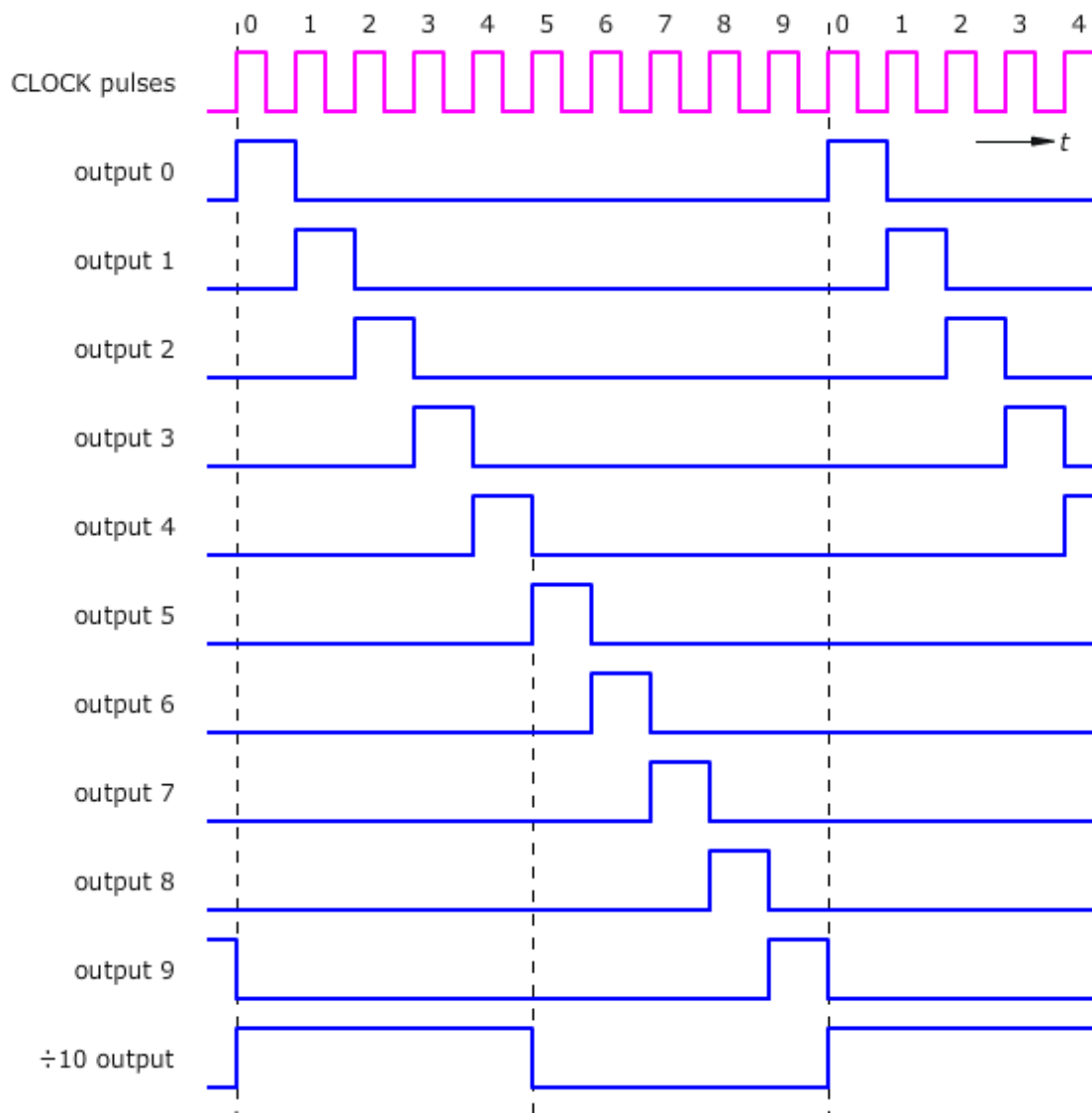
První částí ovladače je integrovaný obvod 555, tedy časovač. Úkol tohoto obvodu je vytvořit hodinový signál o správné frekvenci.

Na vývod CV obvodu 555 je připojen výstup z mikrokontroléru, který je součástí obvodu pro kontrolu a přizpůsobení frekvence napájecích průběhů. Velikost napětí přivedeného na tento vývod ovlivňuje vnitřní komparační napěťové úrovně integrovaného obvodu a lze tak měnit frekvenci, kterou bude integrovaný obvod generovat.

Nastavení potenciometru R3 ovlivňuje rozsah frekvenčního testu.

### 6.1.2 Obvod 4017D

Obvod 4017D je dekadický čítač Johnsonova typu, který lze použít jako dělič frekvence. Jeho funkce je vidět na obr. 16. V každém okamžiku jednoho cyklu hodinového signálu má pouze jeden jeho výstup hodnotu log.1.



Obr. 16 Simulace obvodu 4017D

Úkol tohoto obvodu je rozdělit hodinový signál na čtyři periodické signály, od sebe posunuté o čtvrt periody.

Tento obvod má zapojeno pět výstupů, signály Q0 až Q3 jsou zapojeny na vstup obvodu 74AC157D a slouží pro vytvoření napájecích průběhů. Výstup Q4 slouží k resetu obvodu 4017D, aby okamžitě po provedení čtyř cyklů začal znova od začátku.

### 6.1.3 Obvod 74AC157D

Obvod 74AC157D je multiplexer. Je to logický člen, který zpracovává logické hodnoty dvou vstupů a na výstupu se objeví logická úroveň vycházející z následující pravdivostní tabulky na obr. 17.

S	A	B	Z
0	1	1	1
		0	1
	0	1	0
		0	0
1	1	1	1
		0	0
	0	1	1
		0	0

Obr. 17 Pravdivostní tabulka multiplexoru (převzato z [10])

Jak je vidět z tabulky na obr. 17, logická úroveň signálu na výstupu je ovlivněna také logickou úrovní na vývodu select (A/B). V našem případě napájení PCB motoru logická hodnota tohoto vstupu určuje směr otáčení.

Každý ze signálů Q0 – Q3 generovaných integrovaným obvodem 4017D je přiveden na dva piny multiplexoru, vždy na piny A a B. Za multiplexorem následují dvě dvojice tranzistorů. Výstupy multiplexoru jsou zapojeny tak, že podle logické úrovně na vývodu select je elektrický signál přiveden na daný tranzistor.

#### 6.1.4 Tranzistory a transformátor

Elektrické signály přivedené z multiplexoru spínají dvě dvojice MOSFE tranzistorů. V momentě, kdy tranzistor sepne, začne procházet primárním vinutím transformátoru proud a dojde k transformaci napětí na sekundární vinutí. Toto napětí může být 100 až 200 krát větší než napětí napájecí. Střídavým spínáním transformátorů dojde k vytvoření střídavého napětí na straně sekundárního vinutí.

Za transformátory ještě následují kondenzátory C3 a C5, které mají za úkol upravit frekvenci elektrické rezonance vzhledem k rezonanci nosníku. Jejich velikost je navrhována v závislosti na rezonanční frekvenci nosníku a množství pz. aktuátorů, které mají charakter kapacitní zátěže.



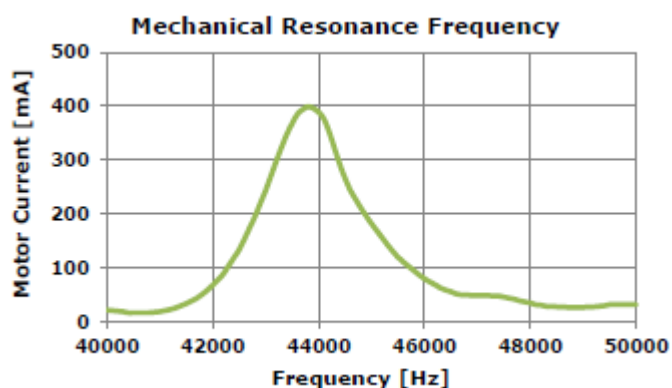
## 6.2 Obvod kontroly a přizpůsobení frekvence

Hlavní část tohoto obvodu je mikrokontrolér PIC, který celý obvod řídí. Na něj je připojen diferenční komparátor a na PWM výstup je zapojen integrační článek se sledovačem napětí.

Integrační článek má za úkol převést PWM signál na signál analogový, ten je poté přiveden na sledovač napětí. Sledovač napětí slouží k impedančnímu přizpůsobení. Má vysokou vstupní impedanci a nízkou výstupní impedanci, kvůli vysoké vstupní impedanci se sníží zatížení PWM výstupu mikrokontroléru.

### 6.2.1 Princip

Obvod kontroly a přizpůsobení frekvence má nastavit správnou frekvenci elektrických signálů pohánějících motor. Frekvence těchto signálů musí být blízká frekvenci mechanické rezonance nosníku. Jak je vidět na obr. 18, proud protékající PCB motorem stoupá při přiblížení se mechanické frekvenci nosníku.



Obr. 18 Graf mechanické rezonanční frekvence PCB motoru (převzato z [11])

Této charakteristiky využívá i mikrokontrolér. Při připojení napětí mikrokontrolér provede test frekvence v nastaveném rozsahu tím, že mění střídu PWM signálu, mění vnitřní komparační napětí integrovaného obvodu 555, dojde ke změně frekvence a následně také proudu protékajícího PCB motorem. Tento proud mikrokontrolér snímá a vybere takovou frekvenci, kdy je procházející proud největší. Toto monitorování správné frekvence probíhá i v průběhu práce motoru.

## 7 Určení polohy motoru

Jednou z hlavních výhod piezoelektrických motorů je jejich schopnost okamžitě zastavit a poté si udržet plnou torzní sílu, i když jsou odpojeni od napájení. Těchto vlastností lze naplno využít například při přesném posunu. Pro přesný posun je potřeba přesně určit polohu nebo přesně měřit vzdálenost, kterou motor urazil.

K určení polohy motoru lze využít senzory pracujících na různých principech.

### 7.1 Potenciometrické senzory

Jak napovídá název, potenciometrické senzory pracují na principu potenciometru, tedy se změnou polohy se mění odpor, což způsobí změnu výstupního napětí. Mají přesnost až 0,01 mm. Jejich hlavní nevýhoda je omezený úhel otáčení a potřeba použít převodníku.

### 7.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory pracují na kapacitním principu. Existují dva typy podle způsobu změny kapacity. Prvním možností je, že se hýbe dielektrikum, druhá možnost je, že se mění plocha překryvu elektrod. Tyto senzory dosahují přesnosti až 0,01 mm. Jejich nevýhoda je, že u většiny nelze určit směr pohybu.

### 7.3 Induktivní senzory

Primární vinutí transformátoru těchto senzorů je umístěno mezi dvěma sekundární vinutí. Jádrem transformátorů je posuvné, poloha jádra určuje indukci transformátoru a z toho je vyhodnocována poloha. Pro moji práci jsou nevhodné, protože lze použít pouze pro lineární měření.

### 7.4 Optické senzory

Optický senzor se skládá ze tří částí: vysílače optického signálu, detektoru signálu a optického enkodéru.

Dělí se na dva typy:

- absolutní - podle vyčtené hodnoty přímo určují polohu

- přírůstkový – během posunu odečítají body, z jejichž počtu je následně určena poloha

Optické senzory fungují na principu pohlcení optického signálu nebo jeho odrazu.

První typ vysílá optický signál na jedné straně a podle toho jestli signál projde k senzoru nebo neprojde je vyhodnocen posun. Výhoda tohoto typu je nižší cena optického enkodéru, protože nepotřebuje odrazivá místa. Nevýhoda je, že obvod systému určení polohy se musí nacházet po obou stranách optického enkodéru.

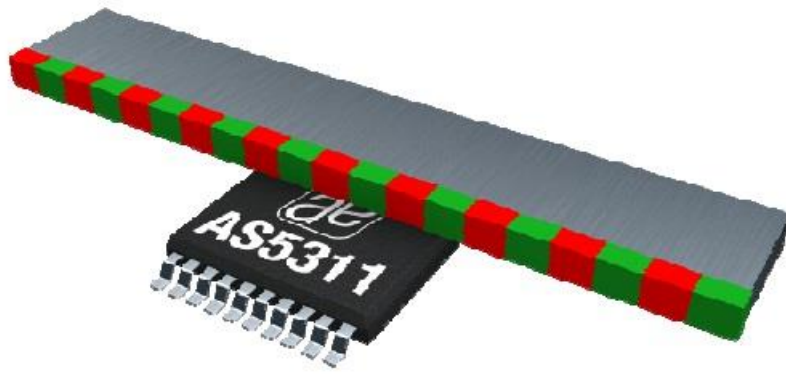
Druhý typ využívá odraz optického signálu na detektor. Výhoda tohoto typu je, že obvod systému určení polohy se nachází pouze na jedné straně enkodéru.

Přesnost optických senzorů závisí na hustotě pohlcujících/odrazivých ploch. Přesnost průmyslově vyráběných systémů dosahuje až 5 nm.

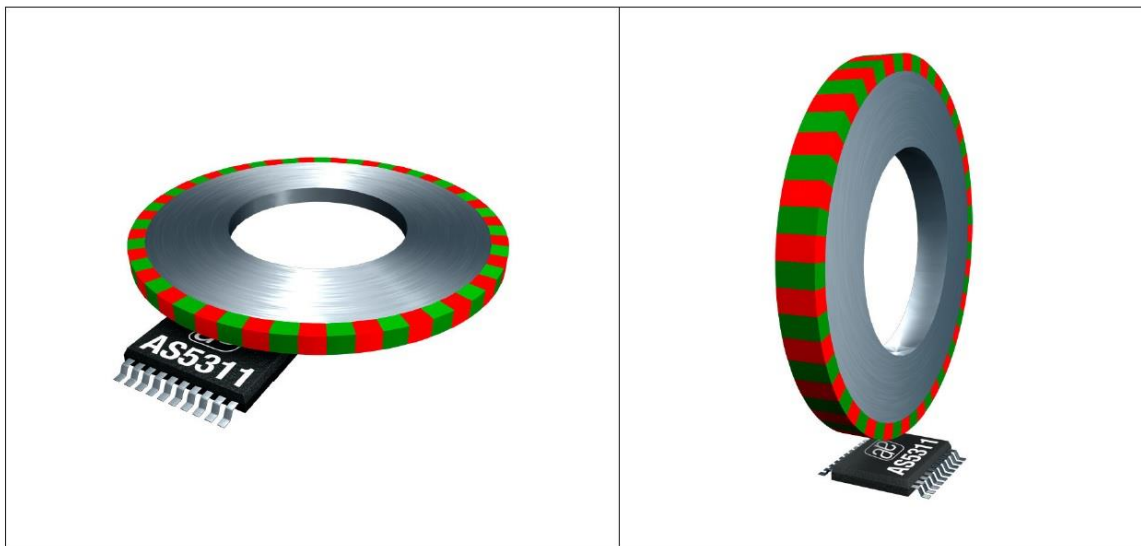
## 7.5 Senzory na principu Hallova jevu

Senzory na principu Hallova jevu se skládají z magnetického pásku (kotouče) a samotného senzoru. Pásek je rozdělen na magnetické segmenty. V senzoru jsou Hallovy sondy, které měří intenzitu magnetického pole pásku. Pokud se pásek pohne, magnetické pole se změní a dané intenzitě magnetického pole je přiřazena hodnota. Přesnost měření závisí na délce magnetických segmentů a na tom, jaké změny magnetického pole dokáže senzor rozlišit. Tyto senzory dosahují přesnosti větší než 0,5  $\mu\text{m}$ . Nevýhoda vyšší přesnosti je pokles maximální rychlosti, při které senzor dokáže správně určit polohu.

Tyto senzory lze využít jak pro měření lineárních pohybů, tak pohybů rotačních, viz obr. 19 a 20. Na těchto obrázcích je také vidět, že senzor může být umístěn pod magnetickým páskem (kotoučem) nebo vedle něj.



Obr. 19 Senzor AS5311 u magnetického pásku (převzato z [12])



Obr. 20 Magnetický senzor AS5311 u magnetického kotouče (převzato z [12])

Různé senzory na principu Hallova jevu se liší v přesnosti, maximální rychlosti pohybu a ve formátu výstupních dat.

Formáty výstupních dat:

- přírůstkový - A + B + index
- analogový
- PWM

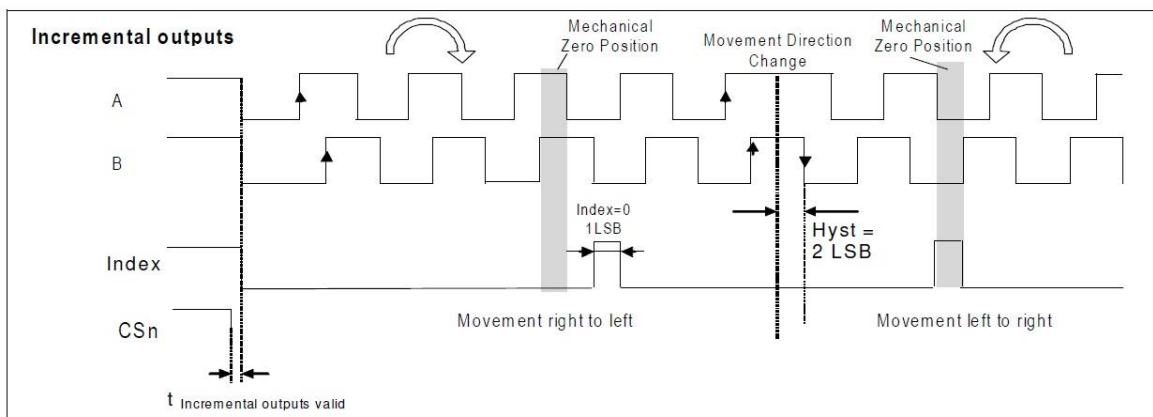
- SSI
- sběrnice I<sup>2</sup>C

Přírůstkový formát je vidět na obr. 21. Skládá se ze tří výstupních signálů a jednoho signálu vstupního.

Signál Index se změní na log.1 při každém přechodu z jednoho magnetického segmentu na další.

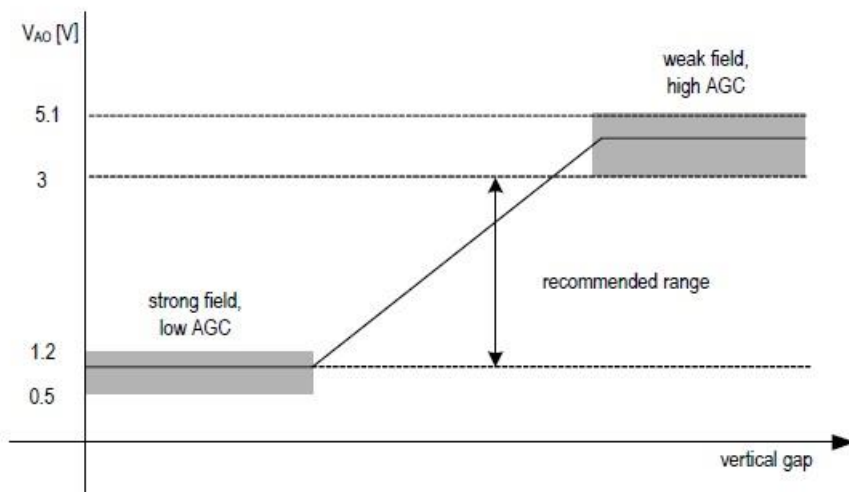
Signály A a B se mění při pohybu a každá náběžná nebo sestupná hrana určuje posun o danou vzdálenost. Použitím těchto dvou signálů najednou a jejich vzájemného fázového posunu je dosaženo dvojnásobné přesnosti. Je tak získán také údaj o směru pohybu. Pokud signál A předbíhá signál B, pohybuje se pásek zprava doleva a pokud signál B předbíhá signál A, pohybuje se pásek naopak.

Signál CS<sub>n</sub> je jediný vstupní signál a slouží pro aktivaci přírůstkového výstupu.



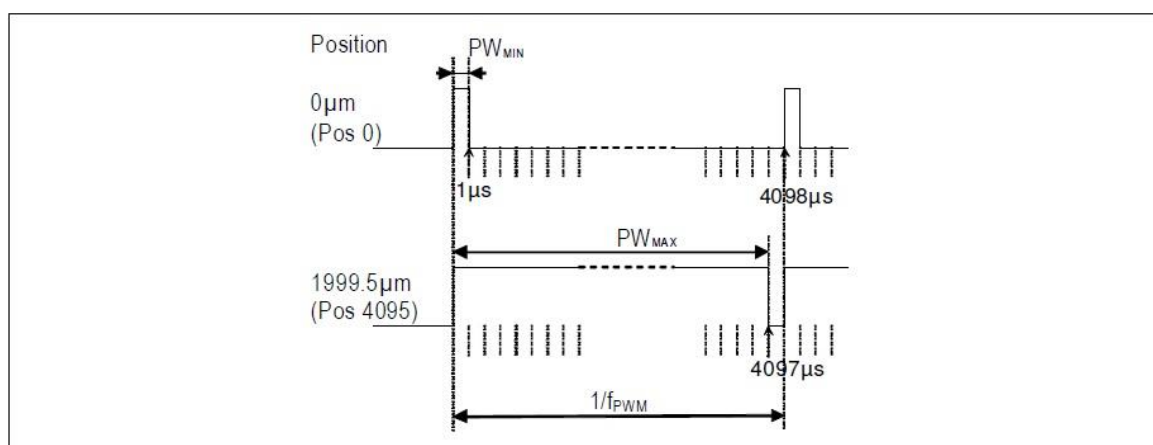
Obr.21 Přírůstkový výstup (převzato z [12])

Analogový formát je vidět na obr. 22. Tento výstup neslouží ke čtení dat o poloze senzoru, ale předává pouze informaci o síle magnetického pole a slouží ke kontrole správné funkce senzoru. Čím silnější je magnetické pole, tím menší napětí je na analogovém výstupu.



Obr. 22 Analogový výstup (převzato z [13])

PWN výstup je vidět na obrázku 23. Doba trvání impulzu PWM signálu je odvozena od polohy magnetického segmentu. Každá mikrosekunda trvání impulzu (log.1) odpovídá jednomu dílku posunu magnetického pásku vůči senzoru - na obr. 28 to je 0,488  $\mu\text{m}$ .



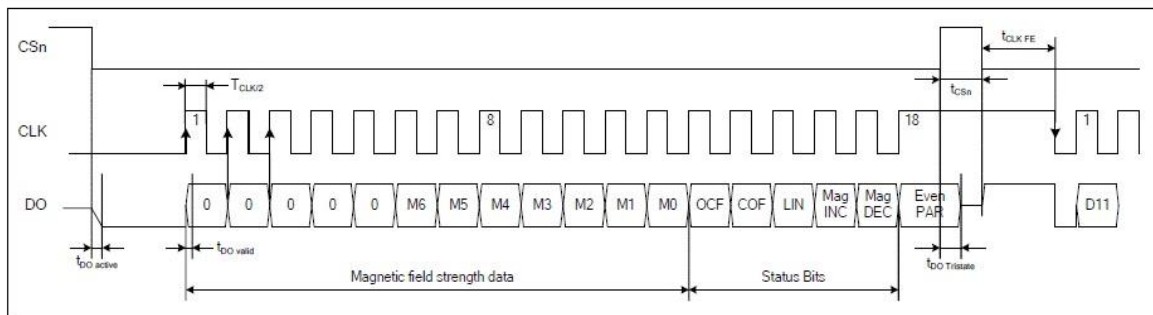
Obr. 23 Sériový PWM výstup (převzato z [12])

SSI formát je vidět na obr. 24. SSI výstup se skládá ze dvou signálů vstupních a jednoho výstupního.

Vstupní signály jsou signály CSn a Clock. CSn slouží pro aktivaci SSI rozhraní a signál Clock slouží pro synchronizaci posílání a čtení dat.

Jedno čtení se skládá z 18 bitů. Prvních 12 bitů reprezentuje 12-ti bitové číslo, toto číslo polohu magnetického segmentu vůči senzoru. Následujících 6 bitů

jsou data reprezentující platnost předchozích 12 bitů. Mezi tyto bity patří například kontrolní součet, síla magnetického pole nebo linearita čtení.

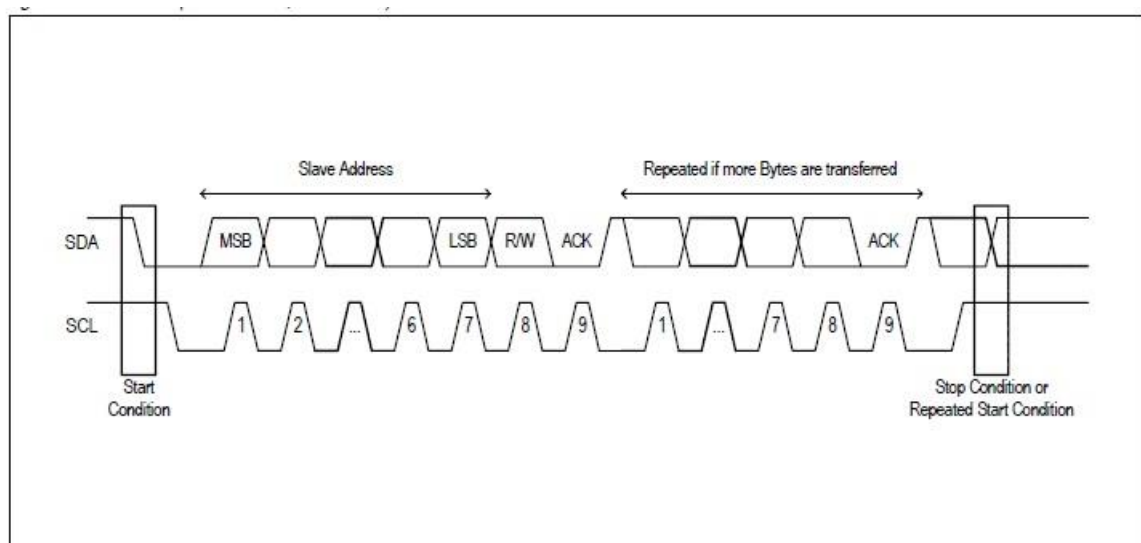


Obr. 24 Sériový SSI výstup (převzato z [12])

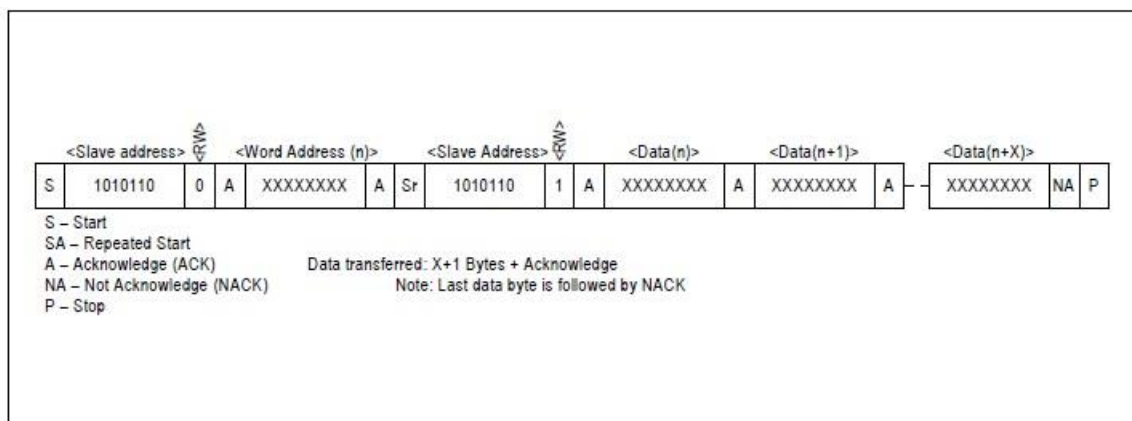
I<sup>2</sup>C je sběrnice typu master-slave, je tedy vhodná pro ovládání většího množství senzorů jedním mikrokontrolérem.

Na obr. 25 je vidět průběh komunikace master-slave, kdy je odeslána adresa slave, případně je odeslán ukazatel na paměť, kam se budou ukládat data od slave. Po každých 8 bitech následuje odezva slave, že data byla obdržena.

Na obr. 26 je znázorněn formát komunikace master-slave, kdy master odešle adresu slave a ukazatel na paměť, kam má slave zapisovat data a následně začne slave data odesílat.



Obr. 25 I<sup>2</sup>C slave adresa a zápis pointeru (převzato z [14])



Obr. 26 I<sup>2</sup>C čtení dat – slave příjem a odeslání dat (převzato z [14])



## 8 Realizace

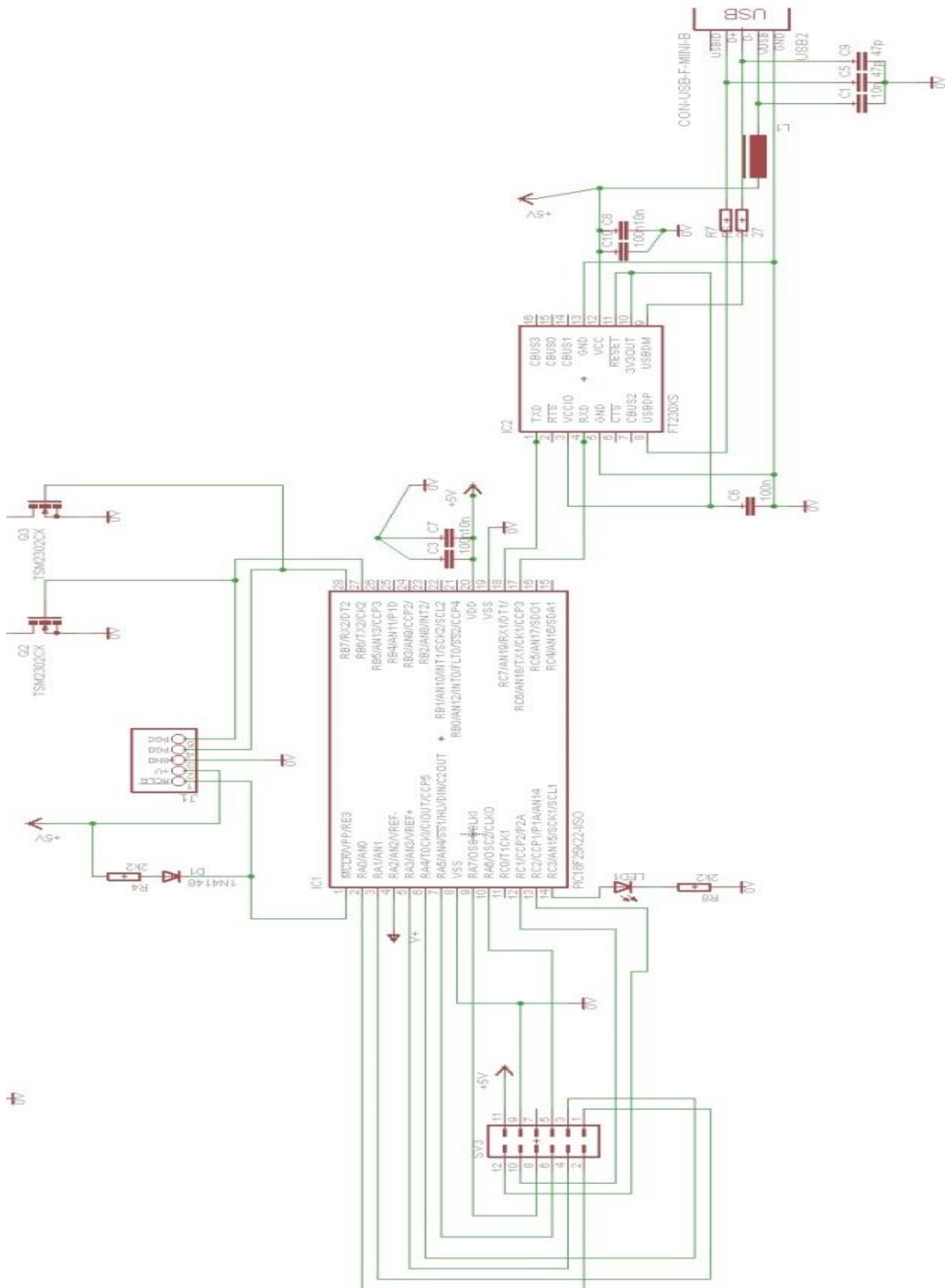
Navrhl a realizoval jsem prototyp přípravku pro přesný kruhový posun s využitím PCB motoru. Tento přípravek má ukázat možnosti využití PCB motoru a má ukázat, jak je takový motor možné ovládat.

Pro maximální využití možností PCB motoru je nutné pro jeho řízení použít systém určení polohy a mikrokontrolér, který uskuteční vykonání zadaných pokynů.

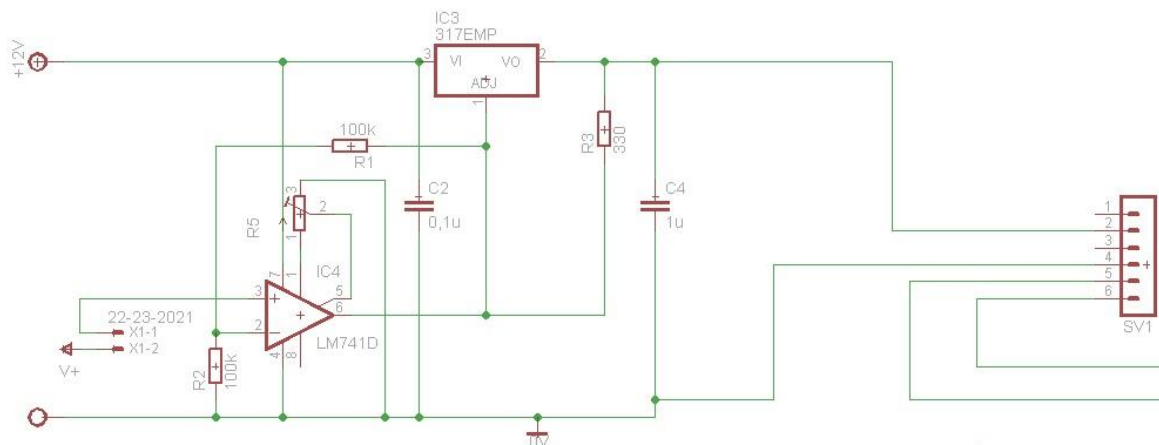
V obvodech jsem využil SMD součástek ze dvou důvodů. První důvod byl, že SMD provedení je moderní a není nutné DPS zbytečně provrtávat. Druhý důvod byl dodržení jednotného rázu obvodu a jeho estetičnost, protože některé součástky se v jiném provedení než je SMD nevyrábějí.

### 8.1 Řídicí obvod

Řídicí obvod se skládá ze zdroje napětí a řídicího mikrokontroléru, na který je připojen převodník USB-UART pro komunikaci s PC a senzor polohy. Schéma těchto obvodů je na obr. 27 a 28.



Obr. 27 Schéma řídicího obvodu – část s mikrokontrolérem



Obr. 28 Schéma napájecího zdroje pro PCB motor

### 8.1.1 Mikrokontrolér

Vybral jsem mikrokontrolér PIC18F25K22. Důležité parametry pro výběr mikrokontroléru byly cena, pracovní frekvence, dostatečné množství vstupů a výstupů a především integrovaný D/A převodník, který je důležitý pro řízení napájecího napětí PCB motoru.

Zapojení řídicího obvodu je jednoduché. Mezi napájecí pin mikrokontroléru PIC18F25K22 a společný vodič jsou připojeny dva blokovací kondenzátory C3 a C7 o kapacitách 10 nF a 100 nF. Tyto kondenzátory slouží k pokrytí vyšší spotřeby mikrokontroléru při překlápění logických úrovní.

Dále je na mikrokontrolér připojen standardní ICSP konektor a dva MOSFET tranzistory.

ICSP konektor je k mikrokontroléru připojen podle doporučeného zapojení v katalogovém listu. Konektor slouží k naprogramování mikrokontroléru. K programování mikrokontroléru jsem použil vypůjčený programátor PicKit 3.

Tranzistory mají za úkol spínat výstupy enable a select multiplexoru. Při sepnutí tranzistoru Q1 je enable pin multiplexoru připojen na zem, multiplexor začne pracovat a dojde k dodání energie motoru. Sepnutí tranzistoru Q2 určuje směr otáčení motoru.

Řídící elektrody tranzistorů Q1 a Q2 jsou připojeny na výstupy mikrokontroléru RB6 a RB7. Drains těchto tranzistorů jsou připojeny na šesti vývodový konektor SV1, který slouží k propojení řídicího obvodu s ovladačem

PCB motoru. Tranzistory jsou konkrétně připojeny na vývody SEL a STB ovladače PCB motoru. Tyto vývody jsou propojeny s vývody Select a Reset multiplexoru 74AC157D a přes „pull-down“ rezistory na napájení. Source tranzistorů je připojen na společný vodič. Použil jsem tranzistory MOSFE s N kanálem (konkrétně TSM2302CX) kvůli velké rychlosti spínání a vypínání a správné hodnotě spínacího napětí.

Všechny vývody RA (kromě vývodů RA2 a RA4) a vývody RC1 a RC2 mikrokontroléru jsou připojeny na konektor SV3, který slouží pro propojení mikrokontroléru se senzorem polohy AS5311. Jelikož jsem použil komunikaci mikrokontroléru se senzorem pomocí SSI rozhraní, stačilo by použít tři vývody, CSn, DO a Clock, já jsem navíc použil vývod Index. Vývod RA7 vytváří CSn signál, tedy spuštění komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem. Vývod RC1 slouží pro příjem dat ze senzoru. Vývod RC2 poskytuje hodinový signál pro synchronizaci komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem. K vývodu RA5 je připojen signál Index, který se aktivuje vždy při přechodu mezi segmenty magnetického pásku, čímž se zjednoduší zpracování dat. Ostatní vývody jsem zapojil hlavně z důvodu výukové funkce zařízení. Na každý elektrický spoj jsem přidal vývod, na který je možné se připojit a sledovat průběh signálu, i když ho samotný mikrokontrolér nevyužívá.

Vývod RA2 mikrokontroléru slouží jako výstup DA převodníku a je připojen na neinvertující vstup operačního zesilovače LM741. Vývod RA4 lze připojit v případě potřeby. Tento pin není připojen z důvodu použití jeho funkce časovače.

Celý tento obvod je napájen z USB konektoru. Tento typ napájení jsem vybral hlavně z toho důvodu, že stačí obvod připojit k jakémukoli počítači s USB portem a je možné pracovat. Dalším důvodem bylo využití tohoto USB konektoru pro komunikaci s počítačem a zjednodušení celého obvodu.

### **8.1.2 Převodník USB/USART**

Převodník převádí komunikaci USART na USB tam i zpět a usnadňuje komunikaci s počítačem, bylo třeba o kabel méně a nebylo nutné připojovat další konektor.

Integrovaný obvod FT230XS jsem vybral proto, že je levný a práce s ním je jednoduchá. Obvod stačí připojit k napájení, k mikrokontroléru a k USB konektoru. Obvod obsahuje vlastní oscilátor a všechno časování a synchronizaci si řídí sám.

Obvod FT230XS disponuje vlastní paměť a 4 nastavitelnými vývody. Tyto vývody lze využít například pro blikání LED diodou při příjmu nebo odesílání dat, ale lze je použít také jako standardní I/O vývody, nebo na ně lze poslat hodinový signál o frekvenci 6 MHz, 12 MHz nebo 24 MHz.

Obvod je zapojen podle doporučeného zapojení pro napájení 5 V. Piny Rx a Tx převodníku jsou propojeny s piny Tx2 a Rx2 mikrokontroléru. Mezi napájecí vodič převodníku a vodič společný jsou opět zapojeny dva blokovací kondenzátory o kapacitách 10 nF a 100 nF sloužící k pokrytí okamžité spotřeby.

### 8.1.3 Zdroj napětí pro PCB motor

Pro napájení PCB motoru jsem použil zapojení s lineárním stabilizátorem napětí LM317, ovládaného pomocí DA převodníku mikrokontroléru připojeného na operační zesilovač LM741. Hodnota výstupu DA převodníku ovlivňuje napájecí napětí motoru, a ovlivňuje tak rychlost otáčení.

K těmto integrovaným obvodům jsou připojeny kondenzátory a rezistory, které slouží k nastavení jejich správné funkce. Obvod by měl být napájen z laboratorního zdroje napětím 12V.

Obvod LM317 je lineární stabilizátor s nastavitelným výstupním napětím. Toto napětí se obvykle nastavuje odporovým děličem připojeným mezi vývod výstupní a vývod adjust. Tento integrovaný obvod se snaží udržet výstupní napětí o 1,25 V vyšší než je napětí na vývodu adjust. Výstupní napětí není nastaveno odporovým děličem, ale na vývod adjust je přivedeno napětí z operačního zesilovače LM741 v neinvertujícím zapojení. Zesílení je nastaveno rezistory R1 a R2 na  $A_v = 2$ . Odpor obou rezistorů R1 a R2 je 100 kΩ. Na kladný vstup operačního zesilovače je přivedeno napětí z D/A převodníku mikrokontroléru, na výstupu operačního zesilovače se objeví napětí dvakrát vyšší než je toto napětí a je přivedeno na vývod adjust integrovaného obvodu LM317. Tento obvod na výstupu nastaví dané napětí.

Mezi výstup obvodu LM317 a jeho vývod adjust je připojen rezistor R3 o odporu 330  $\Omega$ . Tento odpor funguje jako předzátěž.

## 8.2 Systém určení polohy natočení PCB motoru

Pro určení polohy natočení PCB motoru jsem použil senzor AS5311, který pracuje pouze v kombinaci se správným magnetickým páskem.

### 8.2.1 Senzor AS5311

Obvod AS5311 je senzor od firmy Austria Micro Systems a pracuje na principu Hallova jevu.

Senzor se vyznačuje přesností vyšší než 0,5  $\mu\text{m}$ , čehož je dosaženo využitím magnetické pásky s magnetickými segmenty o délce 2 mm a tím, že tento senzor dokáže jeden magnetický segment rozdělit na 4096 částí.

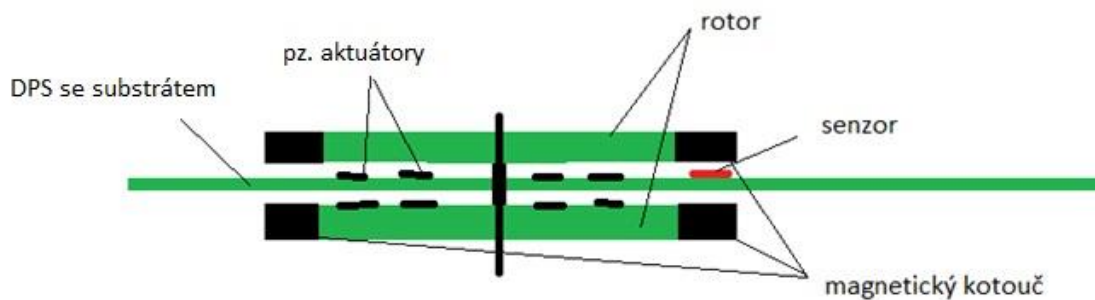
Aby senzor správně pracoval, respektive, aby senzor stíhal správně číst hodnotu intenzity magnetického pole, nesmí se senzor vůči magnetickému pásku pohybovat rychlostí větší než je 0,65 m/s a měl by být vzdálen maximálně 0,6 mm od magnetické pásky.

Senzor umožňuje čtení dat ve třech různých formátech. Těmito formáty jsou:

- přírůstkový
- PWM
- SSI

Senzor AS5311 jsem vybral z následujících důvodů:

- Jeho použití a čtení dat je jednoduché. Stačí přidat magnetický kotouč, správně senzor umístit a propojit s mikrokontrolérem, který data přesně zpracuje pomocí SSI výstupu.
- Senzor se dobře hodí pro použití s PCB motorem, v profesionálním návrhu může být rotor PCB motoru přímo přizpůsoben na připojení magnetického kotouče a samotný senzor může být osazen přímo na desce s motorem. Náčrt realizace je vidět na obr. 28.



Obr. 28 náčrt realizace PCB motoru s magnetickým senzorem polohy

- Vysoká přesnost senzoru se hodí pro maximální využití možností motoru.

Pokud použijeme kotouč o průměru 13 cm, na jehož okraji je umístěn magnetický pásek pro čtení polohy, odpovídá posun o 0,5  $\mu\text{m}$  posunu o 0,8 úhlové vteřiny (dle katalogu lze dosáhnout přesnosti až 0,5 úhlové vteřiny [6, 15]).

### 8.2.2 Magnetický pásek MS10

Ke každému senzoru musí být použit příslušný magnetický pásek nebo magnetický kotouč, který splňuje dané parametry. Z pohledu senzoru jsou hlavní charakteristiky zejména délka magnetických segmentů a intenzita magnetického pole. Pokud bychom použili pásek s jinou délkou magnetických segmentů nebo špatně magnetovaný pásek, senzor by měřil chybně.

Další důležité parametry magnetických pásků jsou maximální a minimální teplota. Při překročení těchto limitů by se mohly změnit magnetické vlastnosti pásku, což by vedlo ke špatnému měření. Magnetický pásek MS10 lze použít od teploty  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$ .

Poslední důležitý parametr, zejména z pohledu mechanického návrhu, je minimální poloměr ohybu, který v našem případě činí 6,5 cm.

Pásek může být připevněn i na magnetickém materiálu, v takovém případě musí být připevněn na povrchu, nesmí být do něj zanořen.

### 8.2.3 Realizace magnetického kotouče

Na školní prototyp jsem použil magnetický pásek pro měření lineárního pohybu, protože magnetické kotouče se navrhují na míru zadané aplikaci, kdy samotný návrh se pohybuje kolem 4 000 Kč. V profesionálním řešení by se tato částka rozpočítala mezi vyrobené kusy.

Abych mohl magnetický pásek použít jako magnetický kotouč, bylo potřeba vyrobit kotouč, na který by se magnetická páska připevnila. Jelikož nejmenší poloměr ohybu magnetické pásky je 6,5 cm, bylo potřeba vyrobit disk s průměrem alespoň 13 cm. Kvůli tomu, aby se PCB motor nepoškodil, bylo nutné vyrobit kotouč o minimálním průměru. K vyrobenému disku jsem kolmo připájel měděný pásek a na něj přilepil pásek magnetický. Takto vyrobený kotouč jsem přilepil sekundovým lepidlem k rotoru motoru (viz obr. 29).



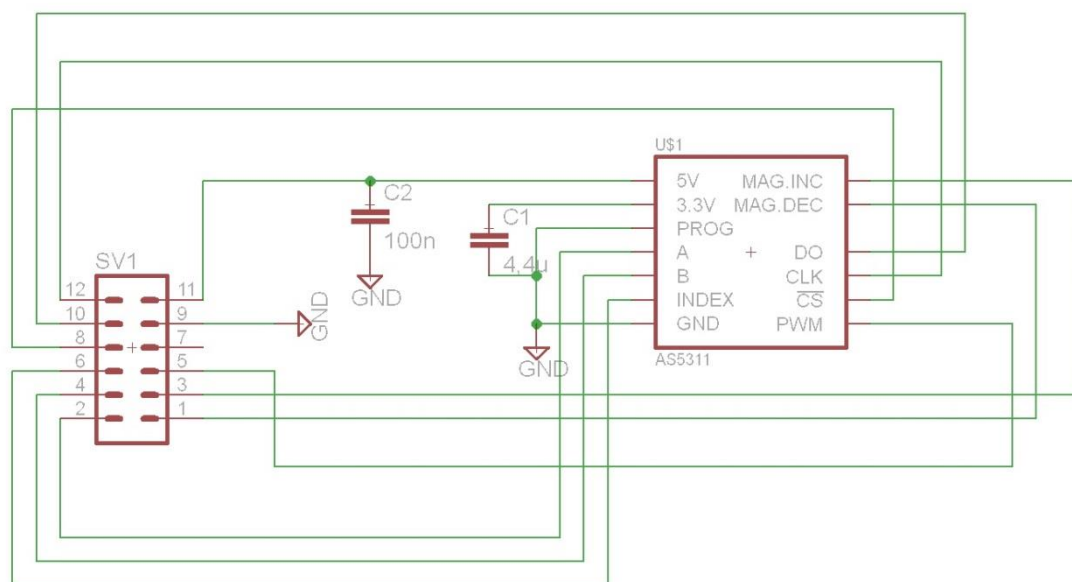
Obr. 29 Vyrobený kotouč s magnetickým páskem a rotorem motoru



## 8.2.4 Obvod senzoru

Pro senzor jsem vyrobil samostatnou desku s plošným spojem kvůli snadnější manipulaci. Následně bylo nutné senzor správně umístit vůči magnetické pásce.

Samotný obvod senzoru je zapojen podle doporučeného zapojení v katalogovém listu senzoru AS5311. Obvod se skládá z integrovaného obvodu senzoru, blokovacího kondenzátoru C2 o kapacitě 100 nF a kondenzátoru C1, který může mít kapacitu 2,2  $\mu$ F až 10  $\mu$ F. Tyto kondenzátory by měly být co nejbližší samotnému obvodu, ale nesmí bránit posuvu magnetického pásku. Musí být umístěny buď mimo dráhu posunu, nebo by neměly být vyšší než pouzdro senzoru. Já jsem místo kondenzátoru C1 zapojil dva kondenzátory o kapacitě 2,2  $\mu$ F paralelně. Kapacitu 4,4  $\mu$ F jsem zvolil pro jistotu, abych se zbytečně nepřibližoval dolní hranici doporučené kapacity. Paralelní zapojení dvou menších kondenzátorů jsem zvolil, protože kondenzátory SMD0805 o kapacitě 2,2  $\mu$ F jsou nižší než integrovaný obvod senzoru AS5311. Schéma obvodu je vidět na obr. 30.



Obr. 30 Schéma zapojení senzoru AS5311

## 8.2.5 Sestavení

Jako platformu pro motor a senzor jsem zvolil jednostrannou cuprexitivovou desku o rozměrech 200 mm x160 mm. Cuprexitivovou desku jsem zvolil, protože je

snadno dostupná, je dostatečně pevná, ale zároveň lehká, snadno se s ní pracuje a měl jsem snadný přístup k nástrojům pro její upravení. Jelikož magnetický kotouč má průměr 13 cm, zvolil jsem rozměr desky 200 mm x 160 mm, aby nejmenší rozměr desky byl větší než průměr kotouče a kotouč nepřesahoval přes hrany desky a byl tak alespoň částečně chráněn.

Na desce s obvodem senzoru jsem si odměřil, v jaké minimální výšce nad platformou se musí nacházet kotouč s magnetickým páskem. Poté jsem měl dvě možnosti. Buď zvednout celý obvod motoru výš nad platformu, nebo zvednout samotný stator motoru výše nad ovladač motoru. Rozhodl jsem se pro zvednutí samotného statoru, protože pokud bych tak neučinil, musel bych vyřešit problém s konektorem ovladače motoru. Tento konektor by blokoval propojení rotoru s kotoučem s magnetickým páskem. Mohl jsem sice samotný konektor kompletně vyměnit za konektor ohnutý nebo stávající konektor ohnout, ale chtěl jsem se vyhnout jakýmkoli větším zásahům do původního obvodu motoru.

Abych zvedl stator motoru výše, nahradil jsem nevyhovující distanční sloupky mezi ovladačem motoru a statorem dvěma čtveřicemi distančních sloupků se závitem na jednom konci a dírou na šroubek na konci druhém. Mezi tyto dvě dvojice jsem přidal navíc cuprexitovou desku, která má za úkol omezit nežádoucí pohyb hřídele motoru. Volil jsem nejnižší možnou délku distančních sloupků tak, aby součet jejich délky a tloušťky cuprexitové desky byl větší než vzdálenost, o kterou jsem potřeboval stator motoru zvednout.

Senzor jsem umístil tak, aby se nacházel na kolmici mezi hranou platformy a středem motoru. Desku s obvodem senzoru jsem k platformě přidělal pomocí profilu ve tvaru „L“.

Umístění senzoru jsem nastavil tak, aby se magnetický pásek při otáčení senzoru nedotýkal a zároveň, aby při otáčení bylo co nejméně míst, ve kterých senzor vyčítá špatné výsledky.

### 8.3 Program mikrokontroléru

Na obr. 31 je znázorněn vývojový diagram hlavního programu pro mikrokontrolér. Tento program lze rozdělit na dvě následující části:

- 1) Start – nastavení vstupních parametrů
- 2) Určení polohy
  - hrubé
  - přesné

### 8.3.1 Start

Program při startu nastaví následující hodnoty:

- 1) vzdálenost, kterou má senzor urazit - hrubou v úsecích dlouhých 2 mm a přesnou v úsecích dlouhých 0,5  $\mu\text{m}$
- 2) rychlost otáčení nastavením hodnoty DA převodníku
- 3) směr otáčení motoru připojením/odpojením pinu SEL na společný vodič
- 4) zapnutí motoru připojením pinu STB na společný vodič

### 8.3.2 Určení polohy

Odečítání polohy motoru jsem rozdělil na dvě části z důvodu efektivnější práce mikrokontroléru.

První část je hrubé měření pomocí signálu Index. Mikrokontrolér kontroluje signál na Index a pokud se na něm objeví log.1, sníží hrubou vzdálenost, kterou je nutné urazit. To se opakuje do doby, než je hrubá vzdálenost nulová.

Ve chvíli, kdy je hrubá vzdálenost nulová, přejde mikrokontrolér na měření přesnější. Přesnější měření využívá výstupu SSI senzoru, který vrací hodnoty od 0 do 4095. Toto číslo udává polohu s přesností 0,488  $\mu\text{m}$  v rámci jednoho magnetického segmentu dlouhého 2 mm. Podle toho, jakým směrem se motor točí, se postupuje od začátku nebo od konce segmentu. Určení polohy pomocí SSI rozhraní je rozebráno v kapitole 7.3.2.1.

Ve chvíli, kdy motor urazí požadovanou vzdálenost, respektive dorazí na požadovanou pozici, mikrokontrolér odpojí pin STB od společného vodiče a motor se zastaví.

#### 8.3.2.1 Určení polohy pomocí SSI rozhraní

Vývojový diagram na obr. 32 znázorňuje komunikaci po SSI rozhraní. Program nejdříve nastaví počáteční hodnoty, vynuluje hodnotu proměnné *senzor*,

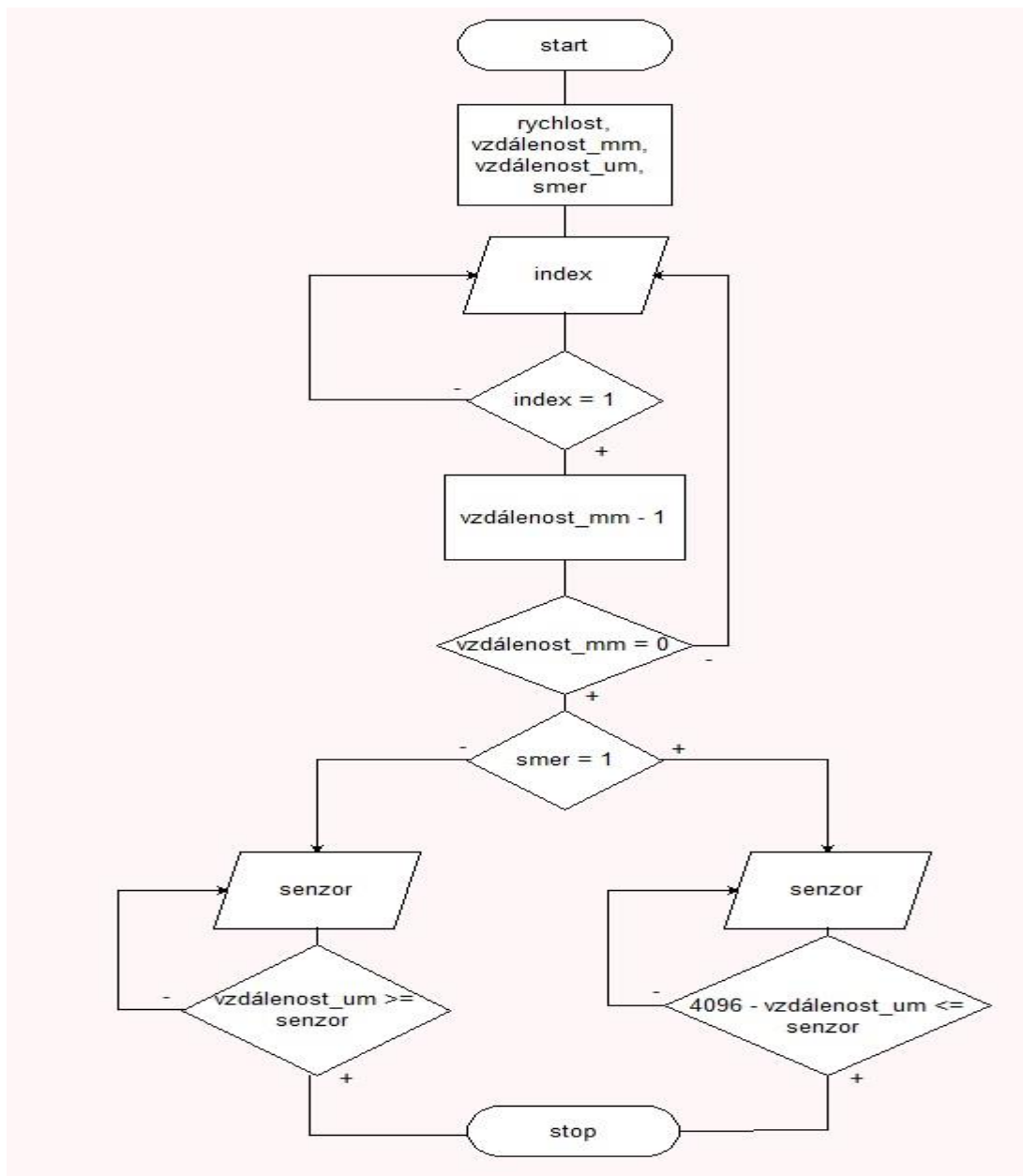
pro jistotu nastaví počáteční hodnotu CLK na log.1, aby došlo k předání správných dat podle komunikačního diagramu a nastaví signál CSn na log.0, čímž oznámí senzoru začátek komunikace.

Následuje 18 bitů synchronizovaných programovaným hodinovým signálem CLK.

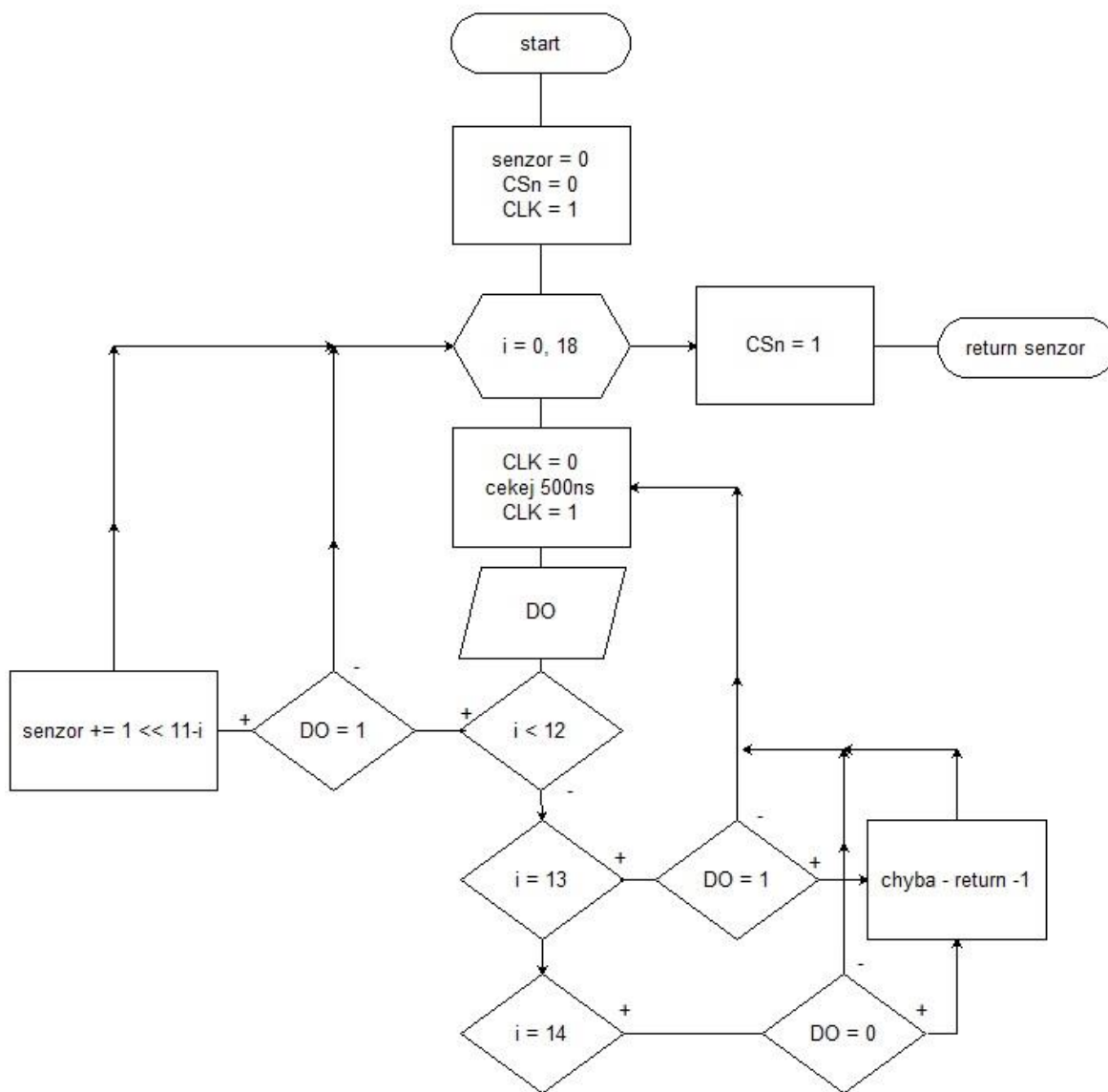
Prvních 12 bitů je datových, dohromady reprezentují dvanácti bitové číslo. Hodnota tohoto čísla udává polohu segmentu magnetického pásku vůči senzoru. Pokud je na vstupu DO log.1, dojde k bitovému posunu jedničky o daný počet pozic. Jelikož senzor začíná nejvyšším bitem, posouvá se jednička o  $11 - i$  pozic.

Třináctý až osmnáctý bit jsou kontrolní bity, které udávají, jestli datové bity jsou platné. Abych zrychlil práci mikrokontroléru, využil jsem pouze dva nejdůležitější bity. Bit COF, který kontroluje, jestli je hodnota magnetického pole dostatečně silná a nezpůsobuje chybu. A bit LIN, který kontroluje linearitu čtení dat. Pokud je senzoru dán dostatečný čas na spuštění a senzor je v pořádku, bit OCF by měl být vždy platný. Bity MAG Inc a MAG Dec informují pouze o síle magnetického pole. Bit parity jsem vynechal kvůli zrychlení práce mikrokontroléru.

Pokud mikrokontrolér zjistí, že bity COF nebo LIN mají chybovou hodnotu, funkce vrátí hodnotu chyby, tedy -1. Pokud jsou data platná, vrací funkce hodnotu vyčtenou ze senzoru.



Obr. č. 31 Vývojový diagram hlavního programu



Obr. 32 Vývojový diagram funkce pro přesné měření

## 9 Měření

Cíl měření byl ověřit základní vlastnosti PCB motoru. Měření jsem rozdělil na ověření základních charakteristik a měření vlivu charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí na práci motoru.

Ověření základních charakteristik by se mělo shodovat s údaji z manuálu PCB motoru a potvrdit tak jejich platnost.

Měření vlivu charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí by mělo zjistit vliv změny tvaru napájecích průběhů, změny frekvence nebo změny fázového posunu napájecích průběhů na práci motoru.

### 9.1 Ověření základních charakteristik

Ověřil jsem dvě základní charakteristiky motoru, první je volt-ampérová charakteristika, druhou charakteristikou je rychlost otáčení v závislosti na napájecím napětí.

#### 9.1.1 Měření volt-ampérové charakteristiky motoru

Teorie:

Volt-ampérová charakteristika PCB motoru by měla být lineární, proud protékající motorem by měl být přímo závislý na napětí.

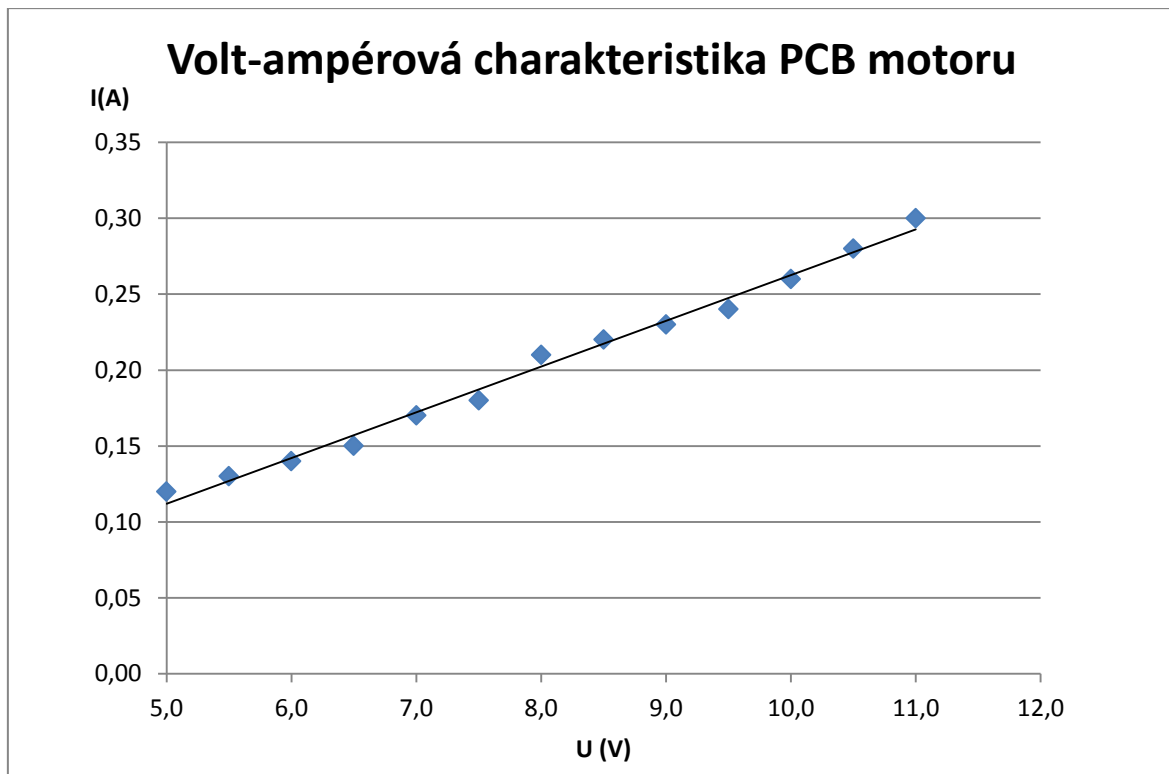
Měření:

Pomocí laboratorního zdroje jsem měnil napájecí napětí a přitom na zdroji odečítal proud protékající obvodem.

Výsledky:

Tab. 1: Volt-ampérová charakteristika PCB motoru

U(V)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
I(A)	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18	0,21
U(V)	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	
I(A)	0,22	0,23	0,24	0,26	0,28	0,30	



#### 9.1.2 Měření závislosti rychlosti otáčení na napájecím napětí

Teorie:

Se vzrůstajícím napájecím napětím roste proud protékající motorem a se vzrůstajícím proudem roste amplituda postupné vlny vybuze­né v nosníku. Rychlost otáčení motoru by tedy měla být lineárně závislá na napájecím napětí.

Měření:

Pro měření jsem využil pouze řídicí obvod motoru.

Rozpojení magnetického pásku jsem použil jako referenční bod, jakmile senzor vyčetl chybu, mikrokontrolér začal pomocí vnitřního časovače T0 měřit čas. Každý následující průjezd rozpojeného místa magnetického pásku nad senzorem, znamenal dokončení otáčky. Při každém měření jsem měřil čas pěti otáček pro zpřesnění měření.

Mikrokontrolér pracuje na frekvenci 16 MHz, jeden pracovní cyklus trvá 4 cykly mikrokontroléru, použil jsem „prescaler“ 1/256. Jeden cyklus časovače trvá



64  $\mu$ s. Takováto přesnost byla pro moje měření zbytečná, a proto jsem kvůli zjednodušení programu měření přidal „prescaler“ 1/100.

Výsledky:

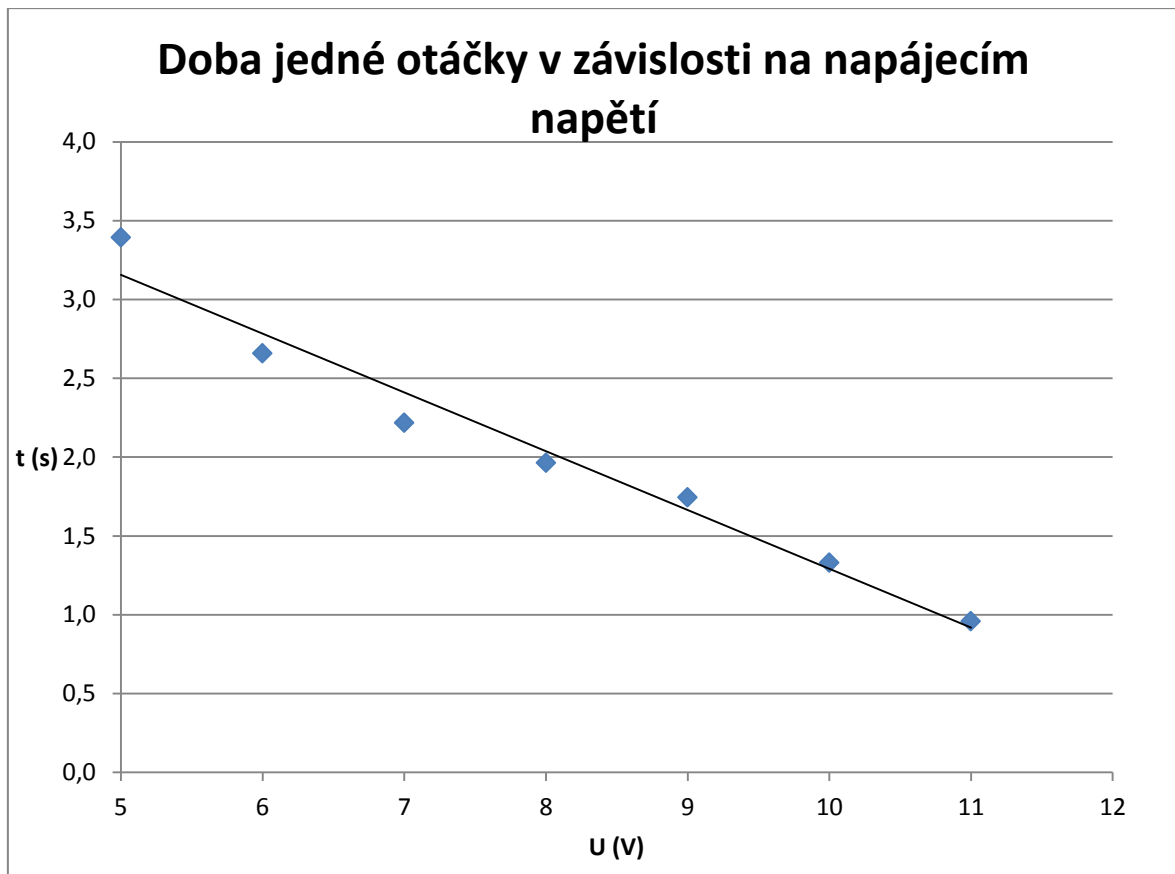
Tab. 2: Měření doby otáčení v závislosti na napájecím napětí

U (V)	5			6		
počet měření	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)
1	2622	16,7808	3,3562	2057	13,1648	2,6330
2	2655	16,9920	3,3984	2063	13,2032	2,6406
3	2676	17,1264	3,4253	2110	13,5040	2,7008
$\bar{x}$	2651	16,9664	3,3933	2077	13,2907	2,6581

U (V)	7			8		
počet měření	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)
1	1680	10,7520	2,1504	1491	9,5424	1,9085
2	1745	11,1680	2,2336	1540	9,8560	1,9712
3	1769	11,3216	2,2643	1568	10,0352	2,0070
$\bar{x}$	1731	11,0805	2,2161	1533	9,8112	1,9622

U (V)	9			10		
počet měření	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)
1	1334	8,5376	1,7075	1021	6,5344	1,3069
2	1367	8,7488	1,7498	1035	6,6240	1,3248
3	1385	8,8640	1,7728	1059	6,7776	1,3555
$\bar{x}$	1362	8,7168	1,7434	1038	6,6453	1,3291

U (V)	11		
počet měření	počet cyklů	$t_5$ (s)	$t_1$ (s)
1	695	4,4480	0,8896
2	745	4,7680	0,9536
3	805	5,1520	1,0304
$\bar{x}$	748	4,7893	0,9579



## 9.2 Měření vlivu charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí

Cíl měření byl zjistit, jaký vliv budou mít změny charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí na funkci PCB motoru, případně najít limity kdy motor přestane pracovat. Těmito charakteristikami měly být:

- změna tvaru průběhů napájecího napětí
- změna frekvence průběhů napájecího napětí
- změna fázového posunu průběhů napájecího napětí

### 9.2.1 Napájení motoru

Pro toto měření, bylo nutné vytvořit takový obvod, který by byl schopný dodat motoru signál o amplitudě alespoň 100 V na frekvenci 45 kHz a výkon do 6 W.

K dispozici jsem měl laboratorní zdroj s maximálním napětím 600 V a laboratorní generátor signálu. Potřeboval jsem zesilovač, který by zvládl zesílit signály ve tvaru sinus, obdélník, případně trojúhelník. Postavil jsem tedy

jednoduchý tranzistorový zesilovač. Vybral tranzistor typu MOSFET kvůli vysokému zesílení, konkrétně tranzistor IRF820. Tento tranzistor jsem vybral, kvůli maximálnímu napětí drain-source 500 V, nízkému maximálnímu proudu a rozložení jeho výstupních charakteristik. Maximální proud jsem volil co nejnižší, aby se nejvíce přiblížil proudu, který využívá samotný PCB motor. Výstupní charakteristiky jsem volil tak, aby byly co nejrovnoměrněji rozmístěné a bylo nízké zkreslení.

Tranzistor je zapojen v zapojení se společným drainem.

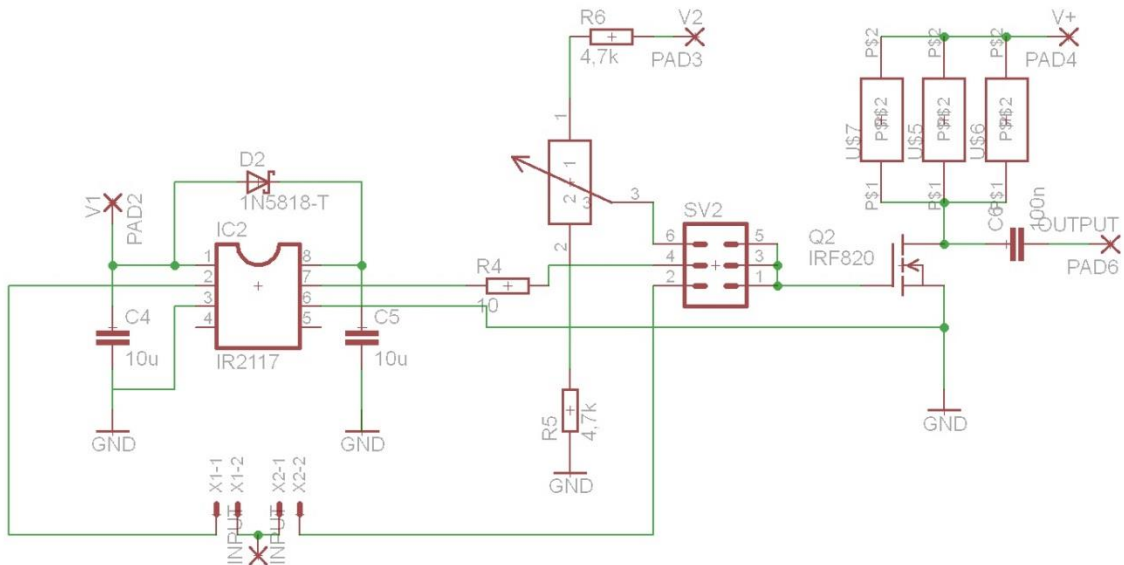
Na řídicí elektrody lze připojit samostatně generátor signálu, obvod pro nastavení pracovního bodu a generátor signálu přes kondenzátor, nebo budič tranzistoru.

Generátor signálu lze na gate připojit přímo, poté je nutné na něm nastavit offset pro nastavení pracovního bodu.

Obvod pro nastavení pracovního bodu se skládá ze dvou rezistorů R5 a R6 o odporu 4,7 k $\Omega$  a potenciometru o maximálním odporu 22 k $\Omega$ . S obvodem pro nastavení pracovního bodu je nutné připojit generátor signálu přes oddělovací kondenzátor.

Obvod budiče IR2117 tranzistoru je zapojen podle doporučení v katalogovém listu.

Na drain tranzistoru je zapojen rezistor R1 o odporu 27 k $\Omega$  a maximálním ztrátovém výkonu 10W (lze připojit další odpory paralelně pro snížení celkového odporu), tento rezistor slouží pro omezení maximálního proudu tekoucího tranzistorem a kondenzátor C6 o velikost 100 nF, tento kondenzátor slouží k oddělení stejnosměrné složky, kondenzátor je zapojen sériově s piezoelektrickými elementy statoru, které jsou kapacitního charakteru, měl by tedy být co největší, aby úbytek napětí na něm byl co nejmenší. Schéma zesilovače je na obr. 33.



Obr. 33 Schéma obvodu zesilovače

### 9.2.2 Měření

Měření vlivu změny frekvence

Nastavené hodnoty:

- měření pomocí obvodu s nastavením pracovního bodu
- napětí obvodu nastavující pracovní bod: 10,6 V
- amplituda budícího signálu: 330 mV
- napájecí napětí zesilovače: 450 V
- napájecí napětí motoru špička-špička: 180 V

Výsledky:

Tab. 3 Měření doby otáčení v závislosti na frekvenci napájecího průběhu

f (kHz)	43	45	47	44	43
$t_3$ (s)	58	N/A	N/A	N/A	N/A

Motor se nám povedlo na první pokus roztočit při frekvenci 43 kHz, rychlost otáčení byla velice nízká. Při následné změně frekvence se nám motor již roztočit nepodařilo, a to ani když jsme se vrátili na frekvenci 43 kHz.

## 10 Diskuze

Seznámil jsem se s principem práce PCB motoru a s využitím zakoupeného vzorku jsem postavil funkční prototyp zařízení pro přesný posun. Následně jsem ověřil měřeními základní charakteristiky tohoto zařízení a pokusil jsem se naměřit i charakteristiky další.

### 10.1 Výsledky realizace

Prototyp zařízení pro přesný kruhový posun se skládá z řídicího obvodu, obvodu určení polohy a PCB motoru. Zařízení se povedlo úspěšně realizovat, a to i přestože použité komponenty se nehodí k manuálnímu zpracování.

Zařízení dokáže využít přesnosti dané motorem a systémem určení polohy. PCB motor a systém polohy, který využívá senzor na Hallově principu a magnetický kotouč, se vzájemně velice dobře doplňují.

#### 10.1.1 Řídicí obvod

Řídicí obvod pracuje bezchybně. Ovládá spínání motoru, směr i rychlost otáčení a dokáže přesně určit natočení motoru díky senzoru polohy.

Na tomto obvodu by šlo zlepšit rychlost vyčítání dat ze senzoru, čímž by se zlepšila přesnost vyčítání polohy při otáčení motoru. Toho by šlo dosáhnout použitím rychlejšího mikrokontroléru nebo využitím mikrokontrolérů dvou. První mikrokontrolér by se staral o komunikaci se senzorem a druhý mikrokontrolér by zpracovával data přijatá ze senzoru a řídil motor.

Zvětšení rozsahu napájecího napětí PCB motoru by šlo provést výměnou operační zesilovače 741 za operační zesilovač typu „rail-to-rail“ např. MCP6141. Stejného výsledku by se dalo dosáhnout změnou napájecího napětí operačního zesilovače z nesymetrického na „symetrické“. V uvedeném zapojení byla nejnižší hodnota napájecího napětí, které šlo dosáhnout 5 V.

#### 10.1.2 Systém určení polohy:

Systém určení polohy v mém prototypu je funkční na 90 % obvodu, není tedy zdaleka dokonalý, a to zejména z důvodu využití magnetického pásku pro lineární posun místo magnetického kotouče pro posun kruhový. Magnetický

kotouč by byl příliš nákladný, a proto jsem využil improvizované řešení přidělení magnetického pásku na vyrobený kotouč.

Vzhledem k tomu, že konstrukce byla vyráběna v běžné mechanické dílně za použití manuálních metod, přesnost výroby je na hraně únosnosti. Umístění jednotlivých součástí bylo nutné mnohokrát upravovat, aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku.

Magnetický kotouč je v jednom místě přerušeny z důvodu využití pásku. V tomto místě senzor nemůže vyčíst polohu magnetické pásky, a proto pro přesný posun by bylo nutné, aby se senzor tomuto místu vyhnul.

Z nepřesnosti manuální výroby kotouče pro magnetický pásek vychází chyby určení polohy magnetickým senzorem. Kotouč není přesně kruhový, to způsobuje, že vzdálenost mezi senzorem a magnetickým páskem se v průběhu otáčení nepatrně mění. To má vliv na přesnost čtení polohy.

Vlevo od přerušení, z čelního pohledu, se nachází asi 4 cm dlouhý úsek pásku, který je při otáčení příliš daleko od senzoru a senzor z něj nedokáže správně vyčíst data.

Kotouč s magnetickým páskem je pro takto malý PCB motor příliš těžký, zpomaluje rychlost otáčení a způsobuje, že se motor spolehlivě roztočí až od napájecího napětí 5 V.

## 10.2 Výsledky měření

Ověření základních charakteristik proběhlo podle očekávání. Měření vlivu napájecích signálů na činnost motoru se nepodařilo realizovat.

### 10.2.1 Ověření základních charakteristik

Ověřil jsem, že volt-ampérová charakteristika PCB je lineární a že rychlost lineárně stoupá s napájecím napětím.

Měření rychlosti otáčení, ale nebylo tak jednoduché, jak by se na první pohled mohlo zdát. Měření jsem musel několikrát opakovat, protože rychlost otáčení byla občas vyšší při nižším napětí. Zjistil jsem, že to bylo způsobeno dlouhým během motoru. Pokud se motor dlouho otáčel, stator se zahřál, tím se

změnila jeho rezonanční frekvence, nebylo dosaženo resonance v rotoru, klesla amplituda postupné vlny a motor zpomalil.

Zpomalení v důsledku delšího běhu motoru je vidět i na datech v tabulce 2 na straně 49. Každý další průběh je o něco pomalejší.

Vždy po měření otáčení na jednom napájecím napětí, jsem motor zastavil a nechal vychladnout, až po té jsem byl schopen dosáhnout očekávaných výsledků.

Z toho vyplývá, že PCB motory nejsou vhodné v aplikacích, které vyžadují dlouhodobé otáčení.

### **10.2.2 Měření vlivu charakteristických parametrů průběhů napájecího napětí**

Měření vlivu napájecích signálů na otáčení motoru se nepodařilo uskutečnit.

Při prvním pokusu se nám sice podařilo motor roztočit, ale nepodařilo se nám to již zopakovat.

Amplituda průběhů napájecího napětí byla pouze 90 V, zatím z neznámých důvodů, přestože při testování dílčích obvodů byla amplituda signálu až 180 V. Při měření jsme pozorovali, že změna jednoho průběhů napájecího napětí ovlivnila druhý průběh napájecího napětí.

Problémy při měření způsobovalo složité a zdouhavé nastavování fázového posunutí napájecích signálů pomocí laboratorního generátoru, kdy při změně nastavení frekvence generátoru bylo třeba znovu nastavit fázové posunutí obou signálů. To znemožnilo spojitě nastavení frekvence a hledání rezonanční frekvence PCB motoru.

Tyto problémy by šlo vyřešit jedním z následujících řešení nebo jejich kombinací.

Možná řešení:

- Postavení lepšího zesilovače.
- Využitím dvou oddělených zdrojů napětí.
- Využitím programování signálového generátoru.
- Použitím nezatíženého PCB motoru. Pro nezatížený PCB motor by mohla dosažená amplituda napájecích signálů být dostatečná.

## 11 Závěr

Postavil jsem funkční prototyp zařízení pro přesný kruhový posun využívající PCB motor. Zjistil jsem, že použité komponenty se příliš nehodí pro kusovou výrobu kvůli velké náročnosti na přesnost zpracování a vysoké ceně jednotlivých kusů. Předpoklady pro průmyslové zpracování jsou ale velmi dobré. Změřil jsem základní charakteristiky PCB motoru a potvrdil tak jejich platnost. Při měření jsem zjistil, že PCB motory se nehodí pro aplikace vyžadující dlouhodobé spuštění motoru. Měření vlivu změn charakteristických vlastností průběhů napájecího napětí se nepodařilo uskutečnit.

V dalších pracích by bylo potřeba vyřešit problémy, které se vyskytly při měření vlivu změn charakteristických vlastností průběhů napájecího napětí, například návrh speciálního zesilovače pro měření, nebo vytvoření přípravku pro snadné nastavení frekvence a fázového posunu průběhů napájecího napětí.



## 12 Literatura

- [1] Drives control [online]. [cit. 14-11-2013] Dostupný z WWW: <<http://www.drives.co.uk/fullstory.asp?id=2524>>.
- [2] Svěrací pz. motor [online]. [cit. 14-11-2013] Dostupný z WWW: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Piezomotor\\_type\\_inchworm.gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Piezomotor_type_inchworm.gif)>.
- [3] SPANNER, K., Survey of the Various Operating Principles of Ultrasonic Piezomotors, White Paper for Actuators, Karlsruhe: 2006, WWW: <[www.actuator.de](http://www.actuator.de)>.
- [4] ELLESGAARD et al., Electomechanical wave device, US Patent č. US 7 723 900 B2, 2010.
- [5] PCB Motor ApS., Design Rules PCBMotor, 2010, Dostupný z WWW: <<http://pcbmotor.com/>>.
- [6] PCB Motor ApS., Rotor s prázdným středem [online]. [cit. 14-11-2013] Dostupný z WWW: <<http://pcbmotor.com/>>.
- [7] PCB Motor ApS., How to Reduce Motor Size by Integrating Accurate, Low Cost Piezo Motors, A White Paper for Electronic, Mechanical & Design Engineers, 2011 Dostupný z WWW: <<http://pcbmotor.com/>>.
- [8] PCB Motor ApS., Rotor s pružinou [online]. [cit. 14-11-2013] Dostupný z WWW: <<http://pcbmotor.com/information/faqs-21/>>.
- [9] PCB Motor ApS., PCB MOTOR Driver/Tracking for Evaluation Kit, 2009 Dostupný z WWW: <<http://pcbmotor.com/>>.
- [10] Pravdivostní tabulka multiplexoru [online]. [cit. 10-11-2013] Dostupný z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Multiplexer>>.
- [11] PCB Motor ApS., Start Kit – User Guide v1.0, 2012 Dostupný z WWW: <<http://pcbmotor.com/>>.
- [12] ams AG, Katalogový list AS5311 v1.00, Dostupný z WWW: <[www.austriamicrosystems.com](http://www.austriamicrosystems.com)>.

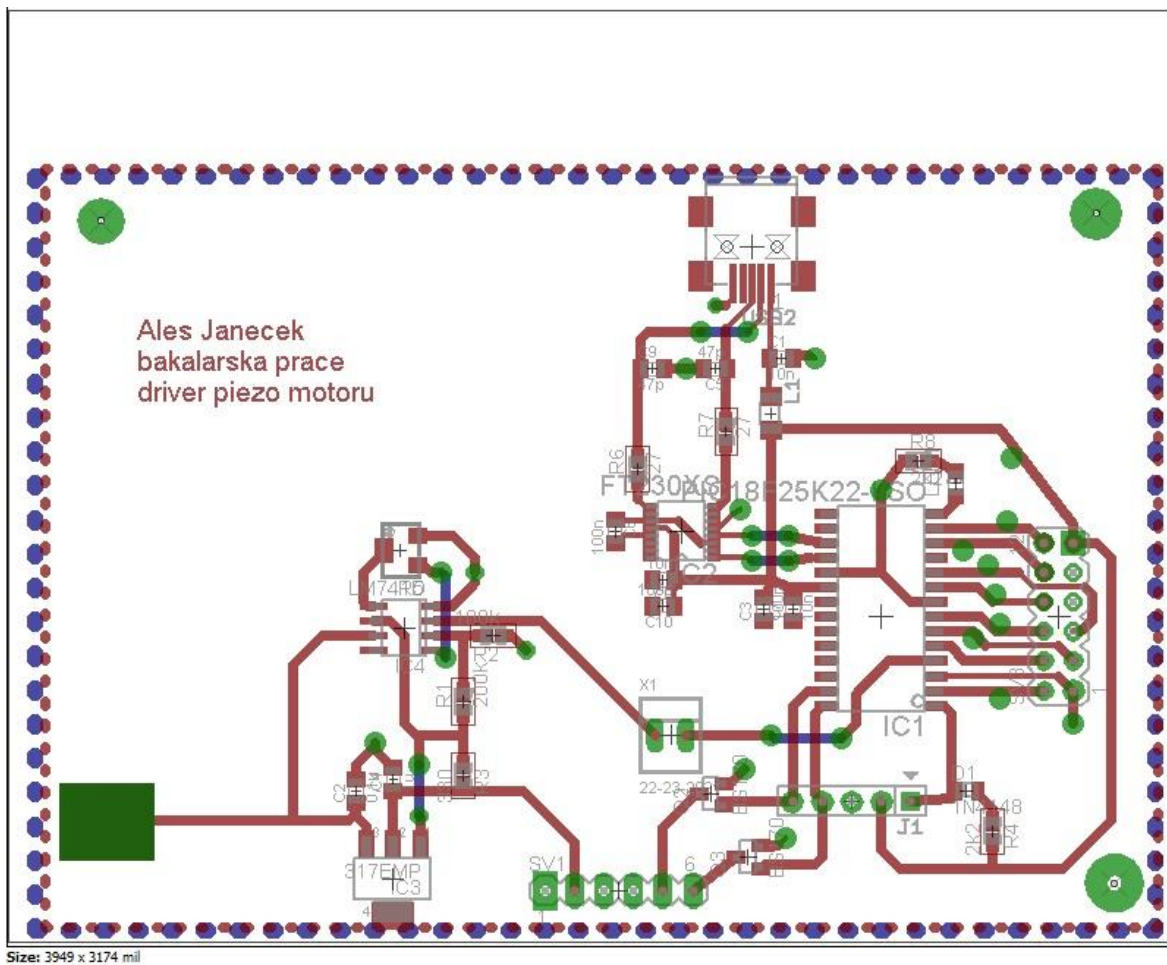
- [13] ams AG, Katalogový list AS5304 v1.09, Dostupný z WWW:  
<[www.austriamicrosystems.com](http://www.austriamicrosystems.com)>.
- [14] ams AG, Katalogový list NSE-5310 v1.50, Dostupný z WWW:  
<[www.austriamicrosystems.com](http://www.austriamicrosystems.com)>.
- [15] PCB Motor ApS., High Resolution Piezo Motor Technology Record [online].  
[cit. 27-12-2013] Dostupný z WWW:  
<<http://www.youtube.com/watch?v=osBpjtqnDBE>>.
- [16] Engineersgarage, Position sensor [online]. [cit. 20-11-2013] Dostupný z  
WWW: <<http://www.engineersgarage.com/articles/position-sensors?page=5>>.
- [17] Semiconductor Components Industries, Katalogový list MC74AC157/D r.5,  
2001.
- [18] FTDI Chip, Katalogový list FT230X USB TO BASIC UART IC v1.1, 2012.
- [19] Microchip, Katalogový list PIC18(L)F2X/4XK22, 2010, ISBN: 978-1-60932-  
398-1.
- [20] Aruna Prabath Rubasinghe, PWM řízení obvodu LM317 [online]. [cit. 5-10-  
2013] Dostupný z WWW:  
<[http://pandatron.cz/?2684&pwm\\_rizeni\\_obvodu\\_lm317](http://pandatron.cz/?2684&pwm_rizeni_obvodu_lm317)>.

## Přílohy

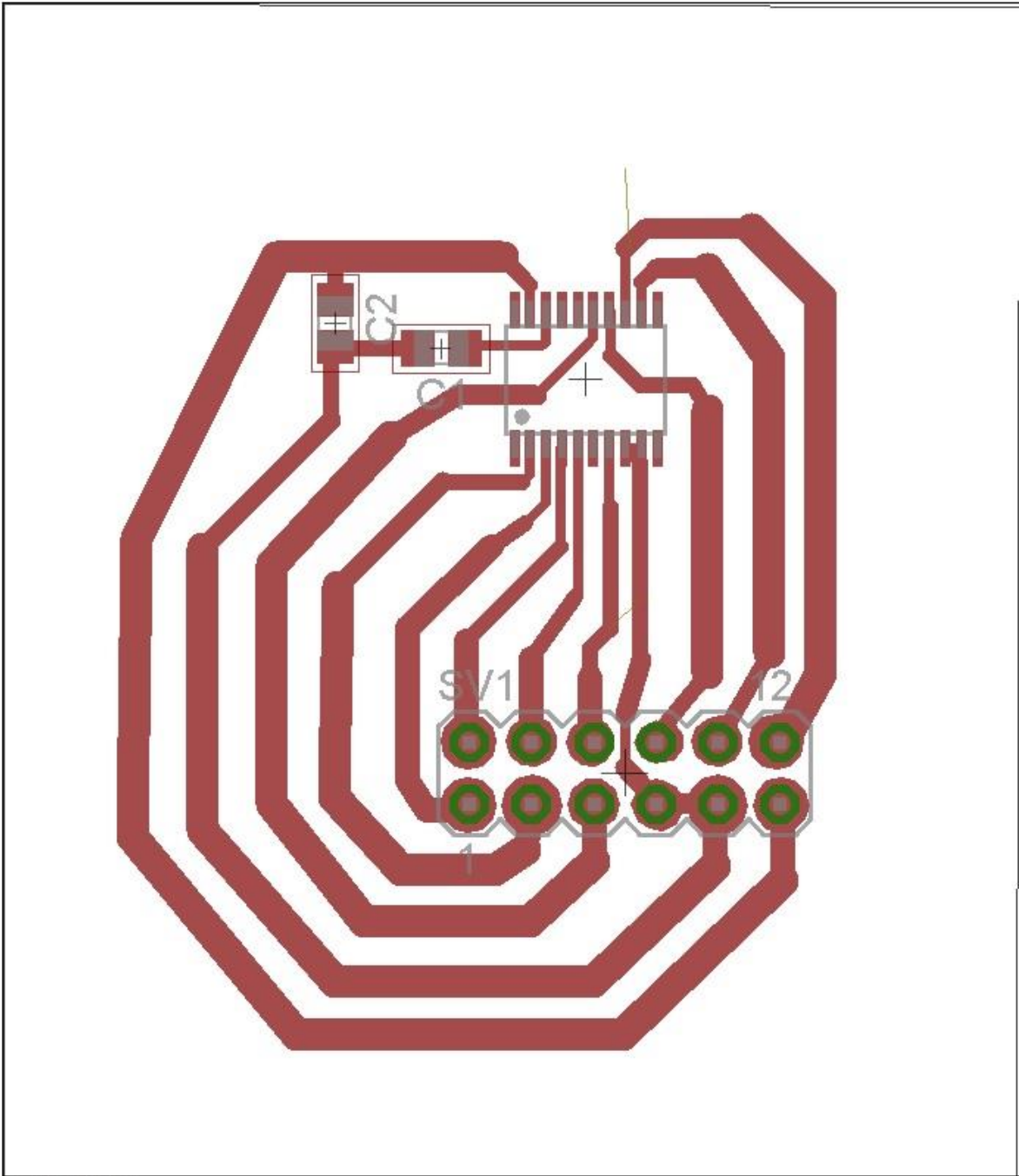
Příloha 1 Seznam součástek a jejich hodnoty:

PIC18F25K22-I/SO	
FT230XS	
LM741	
LM317	
AS5311	
MS10	
IRF820	
IR2117	
rezistory	10, 27, 330, 2k2, 4k7, 27k, 100k
potenciometr	22k
kondenzátory	10n, 100n, 47p, 1u, 2,2u, 10u
USB konektor	
Přístrojové zdířky	

## Příloha 2 Řídící obvod

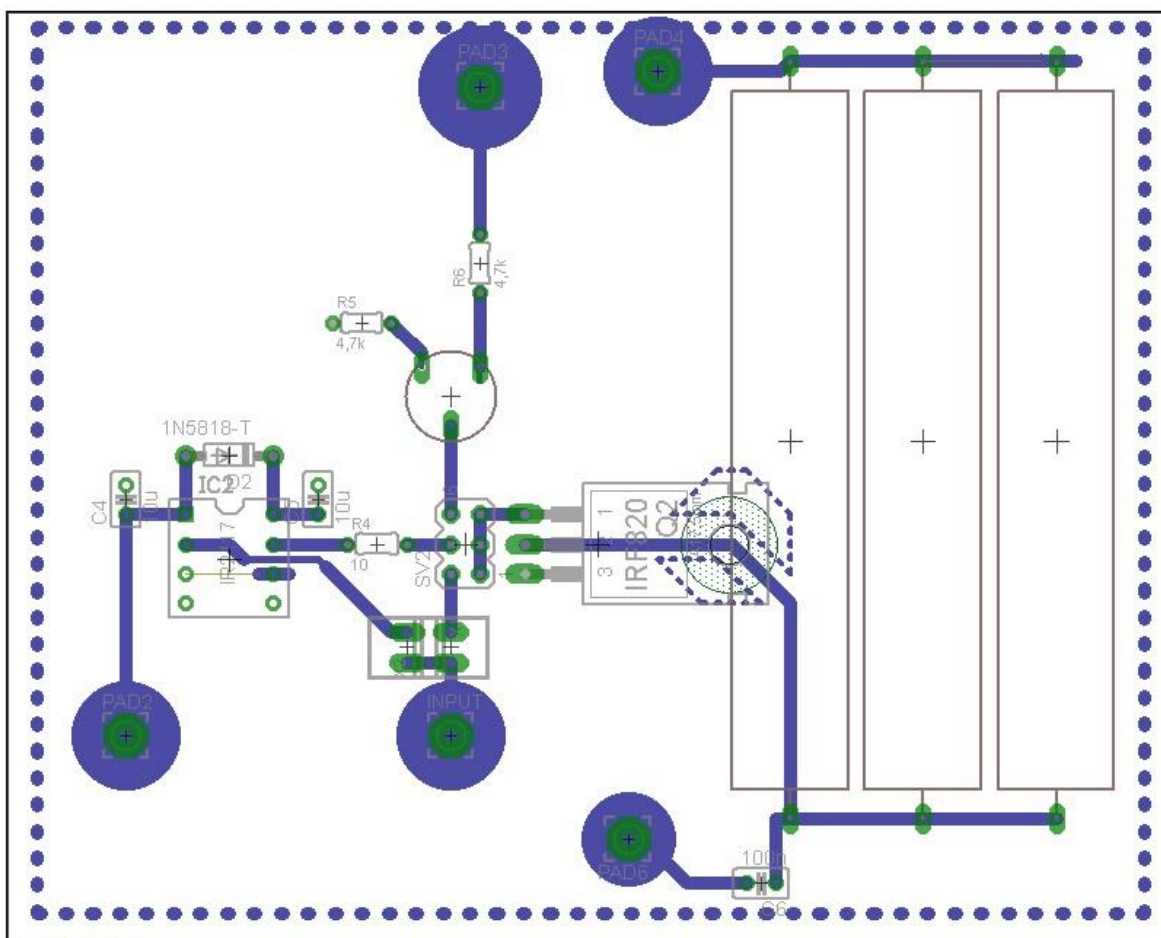


## Příloha 3 Obvod senzoru



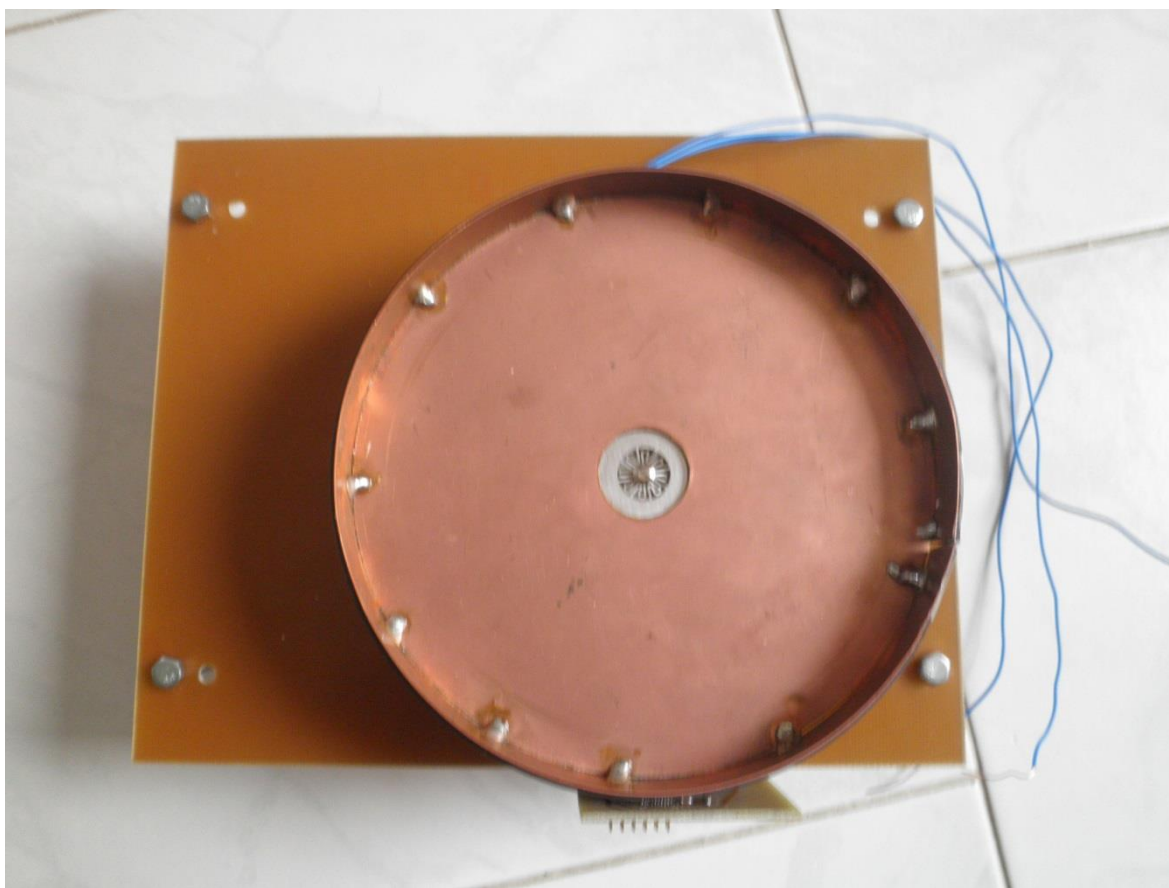
Size: 41.6 x 48 mm

# Příloha 4 Obvod zesilovače



Size: 3.937 x 3.15 inch

Příloha 5 Vyrobený prototyp - vrchní náhled



Příloha 6 Vyrobený prototyp – kotouč s magnetickým páskem

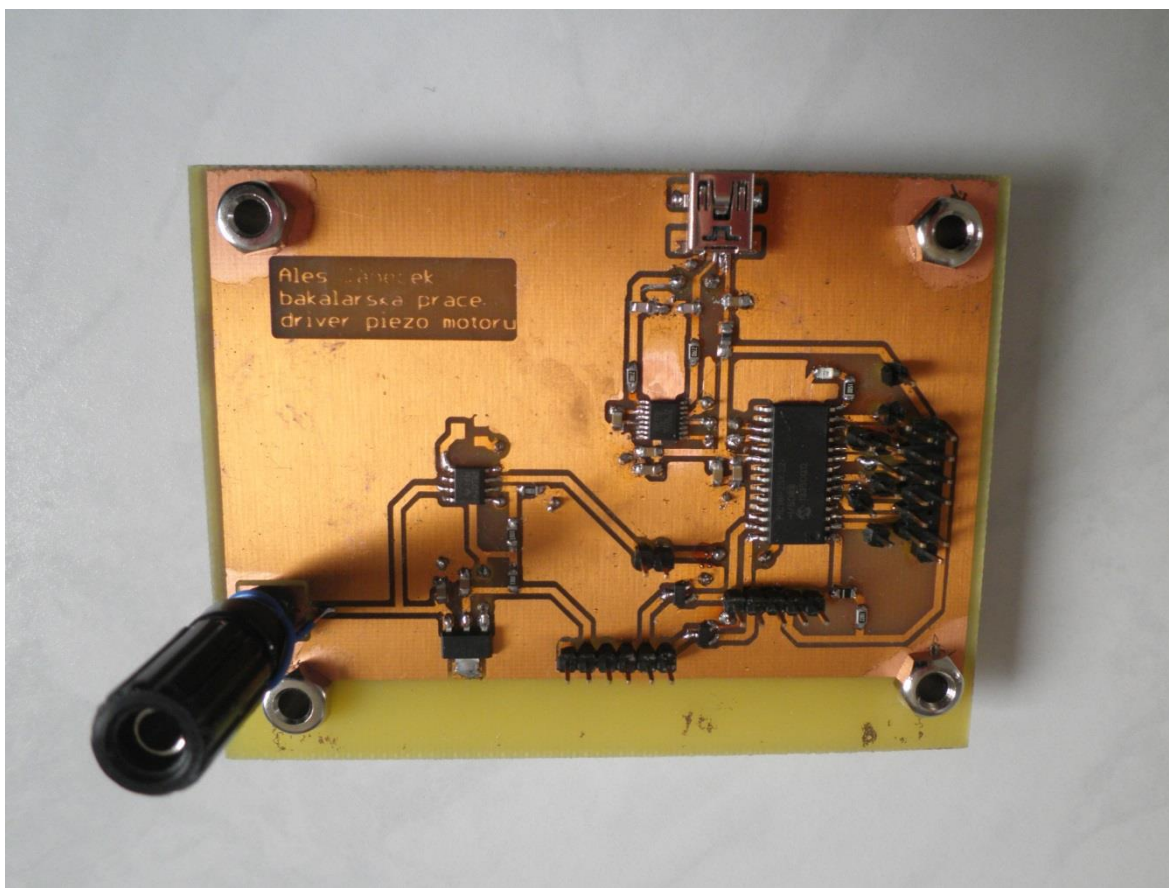




Příloha 7 Vyrobený prototyp – boční náhled



Příloha 8 Vyrobený prototyp – řídicí obvod



Příloha 9 Vyrobený prototyp – zesilovač

