

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

**Ovládací obvod pro dvouosý piezoelektrický  
posuvný stolek**

**květen 2014**

**Bakalant: Daniel Hátle**

**Vedoucí práce: Ing. Pavel Kulha, Ph.D.**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **H Á T L E Daniel**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Ovládací obvod pro dvouosý piezoelektrický posuvný stolek**

### **Pokyny pro vypracování:**

1. Seznamte se s principem funkce a způsobem řízení lineárního piezoelektrického motoru PiezoLEGS.
2. Proveďte rešerši principů měření velmi malých posunutí vhodných pro implementaci ve dvouosém posuvném stolku.
3. Navrhněte a realizujte ovládací obvod pro řízení dvou nezávislých piezomotorů přes USB rozhraní s počítačem s možností připojení enkodéru pro měření polohy.
4. Naprogramujte rutinu pro ovládání a měření polohy v prostředí LabView.
5. Navrhněte mechanickou konstrukci pro posuvný xy stolek s možností zástavby piezoelektrických motorů a enkodérů polohy.
6. Otestujte a zhodnoťte dosažené výsledky.

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] <http://www.piezomotor.se>
- [2] Váňa V.: ARM pro začátečníky, BEN-Technická literatura, 2009
- [3] Yiu J.: The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors, Newnes, 2013
- [4] Fraden J.: Handbook of Modern Sensors, Springer, 2011

Vedoucí: **Ing. Pavel Kulha, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

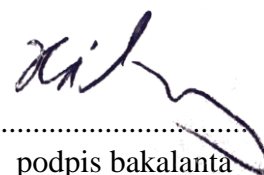
Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 30. 1. 2014

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry

Datum: 23.5.2014



.....  
podpis bakalanta



**Anotace:**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem řídicího obvodu pro piezomotory Piezolegs Linear 6N. Ovládací obvod byl navrhnut tak, aby bylo možné ovládat dva nezávislé piezomotory současně. Dva piezomotory lze využít pro pohon souřadnicového polohovacího stolku, jehož konstrukce byla navržena v jedné z kapitol. V ovládacím obvodu je využito různých integrovaných obvodů, plnicích funkce spínaných zdrojů, datový a převodník, generátorů hodin i výstupních zesilovačů. Obvody jsou popsány a je uvedeno jejich zapojení. Generace hodinového taktu a datové převodníky jsou plně programově nastavitelné, což umožňuje vylepšovat vlastnosti ovládacího obvodu a ladit chod piezomotorů. Pro snímání polohy piezomotorů jsou používány magnetické lineární enkodéry, jejichž výstupy zpracovává výkonný ARM procesor. Tímto procesorem je také řízen celý ovládací obvod a zprostředkovávána komunikace s virtuálním přístrojem napsaným v LabView. V bakalářské práci je také řešen návrh a osazení plošného spoje ovládacího obvodu.

**Klíčová slova:**

piezomotor, Orcad, SPICE, D/A převodník, dc-dc převodník, stm32, discovery, AD9106, lineární, cdce913

**Summary:**

This bachelor thesis deals with designing circuit for driving piezoelectric motors Piezolegs Linear 6N. The piezodriver has been designed to drive two separate piezoelectric motors. Two motors can be used for driving double axis stage, which has been designed as well. Piezodriver uses various integrated circuits for performing tasks like clock generation, voltage regulation, digital to analog conversion and voltage amplification. Integrated circuits are described and their final circuit connection is displayed. Clock and sample generation is digitally adjustable, which allows user to change piezodrivers properties and piezomotor performance. Position of motors is sensed by magnetic linear encoders whose data are processed by powerful ARM processor. ARM processor manages all integrated circuits and communication with LabView virtual instrument. The printed circuit board design and assembly is included in thesis.

**Keywords:**

piezomotor, Orcad, SPICE, digital to analog converter, dc-dc converter, stm32, discovery, AD9106, linear, cdce913

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>7</b>
1.1 Cíle práce .....	7
<b>2. Princip funkce a způsob řízení piezomotoru .....</b>	<b>8</b>
2.1 Piezoelektrický jev.....	8
2.2 Piezomotor .....	9
<b>3. Principy měření velmi malých posunutí .....</b>	<b>12</b>
3.1 Kapacitní senzory .....	12
3.2 Indukční senzory.....	14
3.3 Magnetické senzory .....	15
3.4 Optické enkodéry.....	17
<b>4. Návrh a realizace ovládacího obvodu .....</b>	<b>18</b>
4.1 Stávající ovládací obvod PMD-90.....	18
4.2 Vlastní návrh ovládacího obvodu .....	19
4.3 Realizace ovládacího obvodu .....	38
4.4 Firmware ovládacího obvodu .....	41
4.5 LabView.....	43
4.6 Návrh mechanické konstrukce.....	45
<b>5. Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>6. Použité zdroje.....</b>	<b>47</b>
<b>7. Přílohy.....</b>	<b>48</b>
Příloha A – Kompletní schéma .....	48
Příloha B – Plošný spoj.....	53
Příloha C – Návrh konstrukce polohovacího stolku .....	59

# 1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem obvodu pro ovládání dvou piezoelektrických motorů, pracujících na principu hnacích nohou. Katedra mikroelektroniky má k dispozici ovládací obvod pro piezomotory, který umožňuje ovládat pouze jeden piezomotor, což je plně dostačující pro testování motoru a měření charakteristik jeho chodu, ale pro polohování nějakého předmětu ve dvou osách již nedostačuje a ani pro tento účel není určen. Sloučením navrhovaného ovládacího obvodu, dvou piezomotorů a souřadnicového stolku získáme možnost polohovat předměty v rozlišení mikrometrů až nanometrů. Hotový ovládací obvod a souřadnicový stolek bude později využíván v kombinaci s laserem pro tzv. ‘laser beam writing’. Tato metoda lze využít pro laserovou expozici fotocitlivých materiálů při výrobě plošných spojů, kde je pro expozici fotorezistu zatím tradičně využíváno masky a zdroje ultrafialového záření. Laser, který může pohybovat v nanometrovém rozlišení, nalezneme využití také ve tvorbě integrovaných optických chobvodů a dalších mikrostruktur.

V práci je popsáno na jakých principech fungují piezomotory a jakým způsobem řízení lze dosáhnout vysokých rozlišení motorů. Dále byly uvedeny příklady senzorů vhodných pro měření velmi malých posunutí. Pro ovládací obvod byly vybrány vhodné součástky. Jejich popis, případné výpočty, simulace a konečné zapojení v ovládacím obvodu je vždy popsáno v samostatné kapitole. Pro tvorbu elektrického schématu a simulace částí obvodů byl použit program Orcad Capture. Po odstranění veškerých chyb ve schématu, byl v Orcad PCB Editoru navrhnout plošný spoj. Spoj byl vyroben ve společnosti PragoBoard s.r.o. a osazen ve školní laboratoři.

Ovládací obvod byl navržen tak, aby byl maximálně nastavitelný a použitelný i pro jiné účely než řízení piezomotorů. Postaven je z moderních digitálních obvodů, které tuto volnost v nastavení maximálně umožňují. Jelikož řídicí obvod umožňuje připojení jakéhokoliv řadiče ke svému konektoru, na který jsou vyvedeny veškeré sběrnice, může být obvod použit i pro procvičení nastavování integrovaných obvodů a jejich hodnocení. Pro tento účel jsou nejzajímavějšími obvody určitě digitální převodníky, které zvládají mnohem více, než k čemu jsou v této úloze používány. Jejich součástí je například obvod přímé digitální syntézy DDS, jehož výstup lze modulovat průběhy uloženými v paměti převodníku.

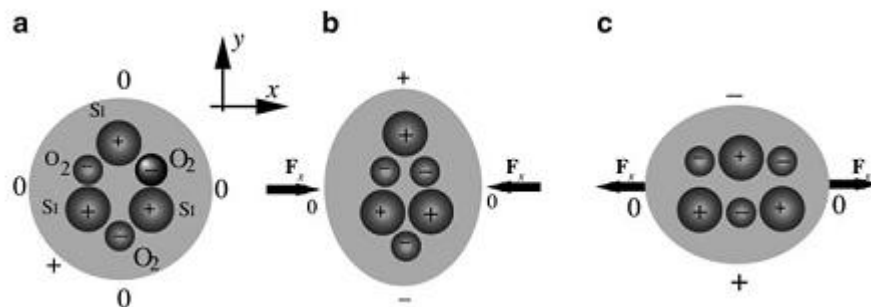
## 1.1 Cíle práce

- provést rešerši principů měření velmi malých posunutí
- navrhnout a odsimulovat ovládací obvod
- realizovat ovládací obvod
- naprogramovat virtuální nástroj pro LabView
- navrhnout mechanickou konstrukci dvouosého polohovacího stolku

## 2. Princip funkce a způsob řízení piezomotoru

### 2.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev je tvorba elektrického náboje na povrchu mechanicky namáhaného krystalického materiálu. Tento jev se vyskytuje v přírodě například v křemenu ( $\text{SiO}_2$ ), ale také v člověkem uměle vytvořených keramických materiálech. Piezoelektrický jev lze demonstrovat na jednoduchém modelu popsáním A. Meissnerem vyobrazeným na obrázku 2.1. Krystal oxidu křemíku je znázorněn jako kruhová molekula s jedním křemíkovým a dvěma kyslíkovými atomy obíhajícími dokola. Krystal je ořezán podél os  $x$ ,  $y$  a  $z$ . V jedné „buňce“ jsou tři atomy křemíku a šest atomů kyslíku. Každý atom křemíku má čtyři protony a jeden pár atomů kyslíku ( $\text{O}_2$ ) má 4 elektrony, tedy bez mechanického namáhání je krystal elektricky neutrální. Pokud ale působí síla  $F_x$  podél osy  $x$ , podobně jako na obrázku 2.1b, hexagonální krystalová mřížka je deformována, atomy se přeskupí, na straně křemíku se objeví kladný náboj a na straně kyslíku náboj záporný. Tedy podél osy  $y$  se objeví elektrický náboj. Naopak v případě roztáhnutí krystalu (2.1c) se polarita obrátí. Pro měření náboje musí být na krystal připojeny elektrody [1].



Obr. 2.1. Model pro popis piezoelektrického jevu [1]

Naopak pokud je na elektrody krystalu přivedeno napětí, dochází k deformaci krystalu. Tento jev se nazývá inverzním piezoelektrickým jevem, který je klíčový pro funkci piezoelektrického motoru.

Piezomotorové elementy jsou vyráběny z uměle vytvořených piezoelektrických materiálů, které jsou vyráběny z oxidů kovů ve formě jemných prášků. Prášky jsou poté namlety, smíchány a kalcinovány. Výsledkem je prášek požadovaného chemického složení, který se smíchá s pojivem, utváří do požadovaného tvaru a vypálí. Pojivka se během procesu vypalování vypaří. Po vychladnutí se vytvoří na krystalu elektrody například katodovým napařováním. Takto vytvořené krystaly ale ještě nemají piezoelektrické vlastnosti. K jejich získání se musí ohřát na teplotu mírně nižší než je Curieho teplota (teplota, při které ztrácí materiál piezoelektrické vlastnosti). Poté je vystaven silnému elektrickému poli. Tím dojde ke správnému natočení dipólů. Mezitím se nechává materiál chladnout. Po vychladnutí a odstranění elektrického pole zůstávají dipóly správně natočené a umělý piezokrystal je hotov [1].

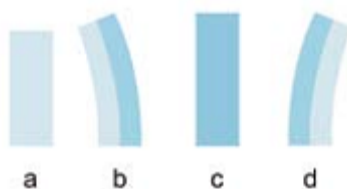


## 2.2 Piezomotor

Tato kapitola popisuje, na jakém principu pracuje lineární piezomotor Piezo Legs Linear 6N, který jsem měl k dispozici. Na obrázcích je demonstrováno, jak je motorem dosaženo lineárního pohybu a jaké průběhy napětí jsou pro piezomotor vhodné. Všechny uvedené principy platí i pro rotační piezomotory Piezo Legs Rotary, které pracují na stejném principu a liší se pouze přípojevacím konektorem, z důvodu zabudovaného absolutního senzoru polohy.

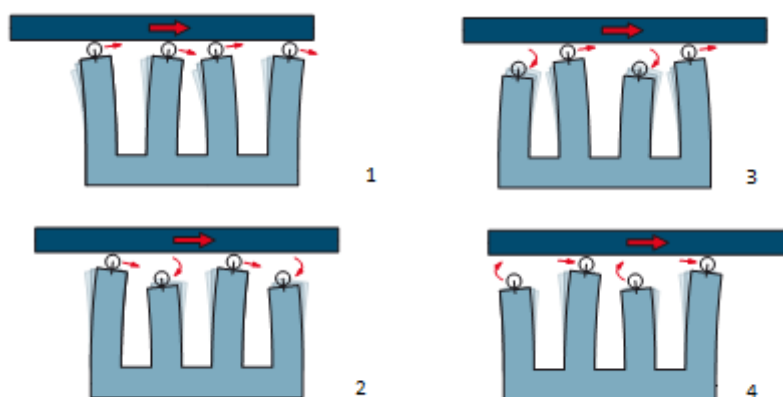
### Princip pohybu lineárního piezoelektrického motoru

Tyčkou piezomotoru pohybují čtyři keramické nožky. Jedna taková nožka se dá představit jako piezokeramický 'bimorph'. To znamená, že nožka je tvořena ze dvou na sobě elektricky nezávislých částí – ty jsou od sebe odděleny. Díky tomuto uspořádání se může hnací nožka po přiložení napětí ohýbat do stran a být či nebýt v kontaktu s hnanou tyčkou. Pro snadnější pochopení jsou všechny polohy 'bimorphu' na obrázku 2.2. Tmavě modrou barvou je označena část, na kterou je přiloženo napětí.



Obr. 2.2. Polohy hnací nožky [3]

Protože z důvodu ztráty kontaktu s hnanou tyčkou jedna hnací nožka rozhodně nestačí, jsou v piezomotoru použity čtyři, lépe řečeno dva páry. Pro řízení dvou párů 'bimorphních' hnacích nohou potřebujeme čtyři fáze. Určitým sledem těchto fází vytvoříme vhodný pohyb hnacích nohou a dosáhneme tak pohybu hnané tyčky. Výrobce nazývá tento pohyb hnacích nohou jako 'Piezolegs Walking Principle' [4].



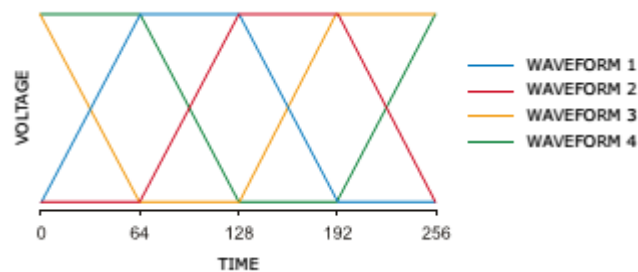
Obr. 2.3. Princip pohybu [4]

Na obrázku 2.3 je znázorněno, jak se dosáhne lineárního pohybu hnané tyčky piezomotoru. Na začátku je na všech elementech nějaké napětí. Šipky ukazují kam se

## 2. Princip funkce a způsob řízení piezomotoru

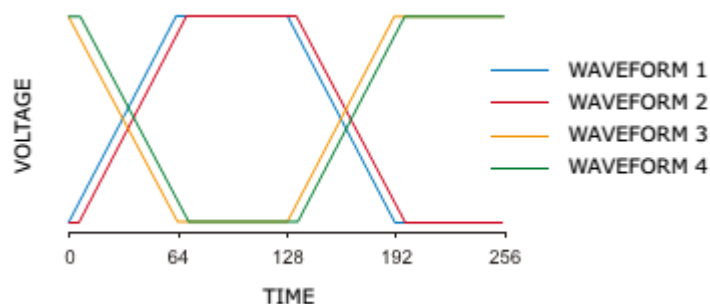
pohybuje hnaná tyčka nebo hnací noha. První pár (nožka 1 a 3) zůstává v kontaktu s tyčkou a pohybuje s ní doprava. Druhý pár (2. a 4. nožka) ztrácí kontakt a začíná se nahýbat doleva. Poté se druhý pár dotkne tyčky, a začne s ní pohybovat doprava, zatímco první pár ztrácí kontakt a nahýbá se doleva. Tento postup je opakován, dokud nedosáhneme požadované polohy motoru.

Pro správnou funkci motoru jsou požadovány čtyři fáze. Průběhy všech fází mohou být stejné a pro pohyb motoru je pouze musíme oproti sobě vhodně posunout tak, že fáze po stranách jedné nožky jsou oproti sobě posunuté o  $90^\circ$  a fáze jednotlivých párů jsou posunuté o  $180^\circ$ . Motor lze budít různými průběhy fází. S různými průběhy můžeme dosahovat například vysokých rozlišení, vysoké rychlosti a konstantního pohybu. Motor lze budít i sinusovým průběhem, ale s ním nedosáhneme nikterak dobrých výsledků. Použijeme tedy například průběh, který pohybuje hnací nožkou do tvaru kosočtverce. Takový signál lze vidět na obrázku 2.4 [4].



Obr. 2.4. Kosočtvercový průběh [3]

Při  $90^\circ$  posunutí fází piezomotor dělá plné kroky, které jsou dlouhé jednotky  $\mu\text{m}$ . Pro zkrácení kroků můžeme snížit fázové posunutí mezi páry hnacích nohou a dosáhnout tak zkrácení kroku například o 90% viz obrázek 2.5. Pokud požadujeme ještě kratší krok, musíme zvolit metodu mikro-krokování [4].



Obr. 2.5. Zkrácení kroku [3]

### Piezo Legs LINEAR 6N

Tento piezomotor je vyráběn firmou Piezomotor Uppsala AB a funguje na principech předem popsaných. Přesně pro tento model je navržena mechanická konstrukce souřadnicového stolku.



Obr. 2.6. Piezo legs Linear 6N [3]

Piezomotor je velice jednoduché konstrukce. Ve spodní části jsou ukryty hnací nohy, které jsou v přímém kontaktu s hnanou tyčkou. Horní část je tvořena pouze ložiskovým domkem se dvěma válcovými ložisky, které jsou přidržovány pružinou. Jeho nejdůležitější vlastnosti se nachází v tabulce 2.1.

Tab. 2.1. Vlastnosti piezomotoru Piezolegs Linear 6N [3]

řázové napětí	0 - 42	V
rozlišení	10	nm
maximální délka kroku	3	$\mu\text{m}$
kapacita fáze	430	nF
přidrzná síla	7.3	N
řrekvenční rozsah	0-2100	Hz
rozsah teplot	-20 - +70	$^{\circ}\text{C}$
spotřeba	5	mW/Hz

### 3. Principy měření velmi malých posunutí

Tato kapitola obsahuje popisy některých používaných senzorů polohy, jako například kapacitní senzory, lvd't a různé lineární enkodéry. Předposlední podkapitola popisuje senzor, pro který bylnavrhnut ovládací obvod.

#### 3.1 Kapacitní senzory

Pracují na principu změny kapacity kondenzátoru, kterým je tvořen senzor. Změna kapacity může být způsobena změnou vzdálenosti elektrod, změnou aktivní plochy elektrod nebo permitivity dielektrika. To také vyplývá ze základních vzorců pro vý počet kapacity deskového nebo válcového kondenzátoru.

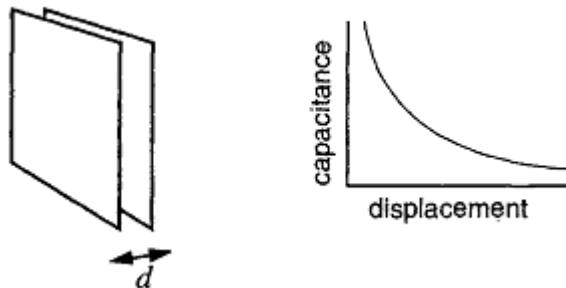
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (3.1)$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (3.2)$$

Kapacitní senzory se používají nejen přímo pro měření posunutí nějakého předmětu, přiblížení, hladiny, ale jsou také hlavními stavebními prvky dalších a složitějších senzorů, například pro měření zrychlení (akcelerometry), síly a tlaku – tedy vlastně jakýkoliv MEMS, protože lze lehce integrovat mikrostrukturu kondenzátoru přímo do čipu.

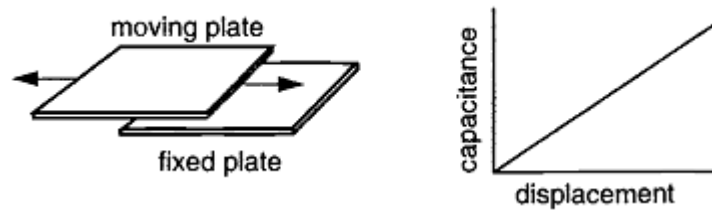
Senzory lze zapojit samostatně (jeden kondenzátor) – toto zapojení je ale citlivé i na pohyb v jiných než chtěných osách (například naklonění jedné elektrody), tomu můžeme zabránit přidáním další elektrody a zapojením do můstku – tedy diferenciální zapojení. Diferenciální zapojení přináší další výhody. Není potřeba referenční kondenzátor, a protože vý stupem je podíl nevádí nám změny napájecího napětí nebo změny permitivity, které mohou být způsobeny teplotou nebo vlhkostí prostředí.

Pro měření posunutí se tedy využívá změny vzdálenosti elektrod nebo plochy. V případě změny vzdálenosti elektrod se kapacita nemění lineárně, což vyplývá i ze vzorce pro deskový kondenzátor. Závislost kapacity na posunutí je na obrázku 3.1. Toto zapojení je vhodné pro měření velmi malých posunutí a je velice citlivé, ale rozsah tohoto zapojení je malý.



Obr. 3.1. Změna vzdálenosti elektrod, nelineární průběh kapacity [16]

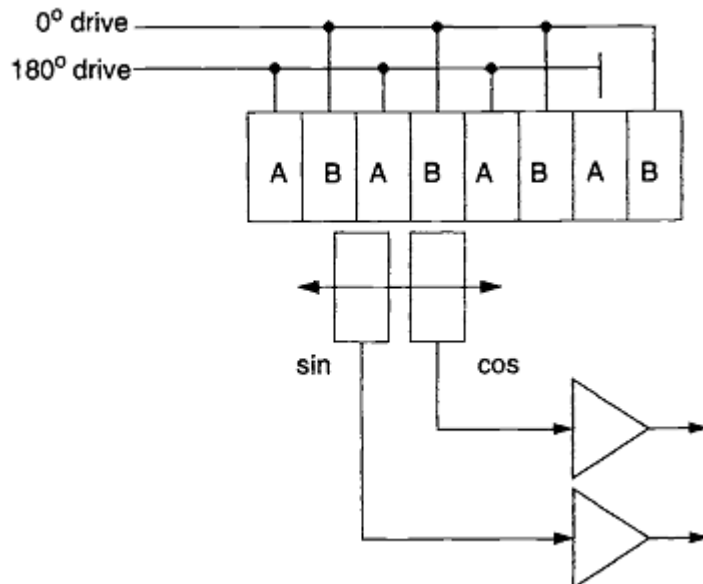
Pro větší rozsah, tedy měření větších posunutí, je vhodnější měnit plochu překrývajících se elektrod. Zde je průběh kapacity lineární, ale snižuje se citlivost.



Obr. 3.2. Změna plochy elektrod, lineární průběh kapacity [16]

Pro vyhodnocování výstupu kapacitních senzorů slouží několik typů obvodů. Nejjednodušším takovým obvodem je kapacitní dělič buzený střídavým proudem. Dále můžeme vyhodnocovat změny kapacit pomocí můstků, zesilovačů, synchronního demodulátoru nebo RC / LC oscilátorů. Jejich frekvence je řízena kapacitou senzoru.

Pokud požadujeme zachování vysokého rozlišení a velký rozsah (desítky centimetrů) můžeme použít kapacitní lineární enkodér. Kapacitní enkodér je složen ze statické a posuvné části viz obrázek 3.3.



Obr. 3.3. Lineární kapacitní enkodér princip [16]

Na elektrodách statoru (na obrázku prvky A a B), jsou sinové a kosinové průběhy. Ty jsou snímány párem elektrod umístěných na posuvné části pomocí kapacitní vazby. Snímané průběhy jsou trojúhelníkové/sinové a jsou dále vyhodnocované elektronicky. Protože jsou snímací elektrody oproti sobě posunuté o 90°, lze rozlišovat směr pohybu. Statická i posuvná část může být tvořena vytisknutý mi plošný mi spoji. Tento způsob měření posunutí se vyskytuje například v digitálních posuvkách [16].

Pro měření posunutí piezomotoru potřebujeme rozsah senzoru maximálně 10 cm (delší hnaná tyč se pro PiezoLegs Linear 6N nevyrobí) a rozlišení jednotek  $\mu\text{m}$  až desítek nm. Sensory založené na změně vzdálenosti elektrod splňují rozlišení, dokonce ho mnohokrát převyšují, ale nezvládají takto velký rozsah. Například společnost Physik

Instrumente (PI) nabízí kapacitní senzory pro snímání pozice s rozšířeným rozsahem až 1000  $\mu\text{m}$ , rozlišením 10 pm a linearitou až 0.01%. Jedná se o modely D-050, D-100.

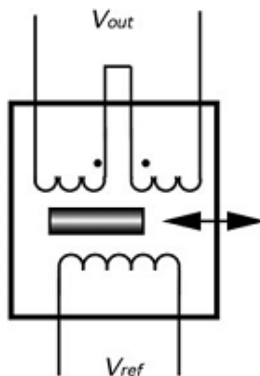


Obr. 3.4. Physik Instrumente D-100 [17]

Dále se v nabídce nacházejí pouze jedno elektrodové senzory. Tyto i senzory výše jsou pro naše účely nevhodné. Jsou vhodné spíše pro bezkontaktní měření vibrací, excentricity, tloušťky a přiblížení. Další možností je použití kapacitního lineárního enkodéru. Lineární enkodéry se ale vyrábějí i na jiných principech, a osobně bych kapacitní nepoužil, hlavně protože se mi nepodařilo najít vhodný produkt s požadovaným rozlišením k zakoupení.

### 3.2 Indukční senzory

Indukčním senzorem v této kapitole je LVDT. Zkratka znamená ‘Linear Variable Differential Transformer’, do češtiny není překládána. Jedná se o transformátor pro měření posunutí, jehož výstup je lineární. LVDT má jedno primární vinutí, které je buzeno sinusovým průběhem se stabilizovanou amplitudou, dvě sekundární vinutí, která jsou zapojena s opačnou fází a pohyblivé feromagnetické jádro. Měřený předmět pohybuje jádrem transformátoru, které je uloženo ve válcovém otvoru. Pokud je feromagnetické jádro umístěno uprostřed transformátoru, výstupní napětí dvou sekundárních vinutí se odečtou a na výstupu je napětí nulové. Porovnáním fází primárního a sekundárního vinutí zjišťujeme směr posunutí. Frekvence oscilátoru musí být minimálně desetkrát vyšší než nejvyšší frekvence, kterou se bude měřený předmět pohybovat [1].



Obr. 3.5. Princip LVDT [1]

LVDT je vhodný i pro velká posunutí a jeho maximální rozlišení je závislé pouze na použité elektronice vyhodnocování. Na obrázku 3.6 je ukázka LVDT GHSA 750 series od společnosti Macro Sensors.



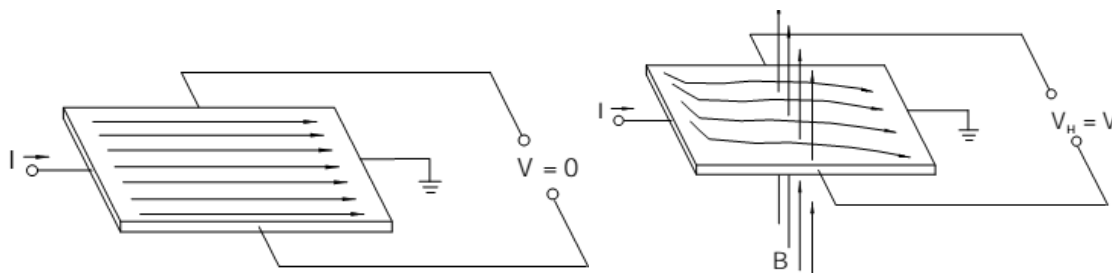
Obr. 3.6. Macro Sensors LVDT [21]

### 3.3 Magnetické senzory

Zástupcem magnetických senzorů jsou například senzory založené na Hallově efektu. V těchto senzorech je jako snímací prvek používána Hallova sonda. Princip této sondy je znázorněn na obrázku 3.7. Na obrázku vlevo se nachází polovodičový materiál (Hallův element), kterým protéká proud a není přítomné magnetické pole  $B$ . Elektrody, na kterých měříme napětí, jsou připojeny kolmo ke směru proudu. Pokud není přítomné magnetické pole, na těchto svorkách nemáme žádné napětí. Pokud přítomné je, objeví se na svorkách napětí. Velikost napětí lze určit podle vzorce 3.3.

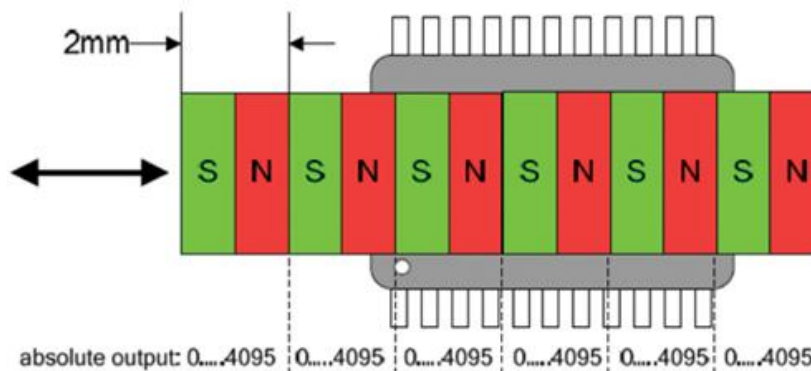
$$U = I \times B \quad (3.3)$$

Jedná se o vektorový součin proudu a magnetické indukce. Protože napětí které se objeví na svorkách sondy je velice malé, musí být zesíleno. Sonda je integrovatelná a spolu s ní lze integrovat i zesilovač a tepelné kompenzace. Měřit lze směr a velikost magnetické indukce  $B$ .



Obr. 3.7. Princip Hallova senzoru [18]

Senzory polohy založené na tomto principu mohou být realizovány více způsoby. Vždy je potřeba nějaký zdroj magnetické indukce, např. permanentní magnet. Sondy lze také vložit do magnetického obvodu transformátoru. Magnet se může pohybovat v okolí sondy nebo je sonda přilepena na permanentním magnetu a k němu je přibližován feromagnetický materiál.



Obr.3.8. Magnetický enkodér [19]

Já se zde zaměřím na magnetický inkrementální lineární enkodér, kde Hallova sonda, zesilovače i digitální vyhodnocovací obvod jsou integrovány do pouzdra čipu. V jeho těsné blízkosti (0.3 mm) se pohybuje magnetizovaný proužek, který střídá magnetické póly, viz obr. 3.8. Změny v polaritě jsou vyhodnocovány polem Hallových sond, ze kterého do digitálního signálního procesoru vycházejí dva o 90° posunuté signály – jedná se o kvadrurní enkodér. Na obrázku je zobrazen obvod AS5311 od společnosti Austria microsystems, což je 12ti-bitový enkodér. Jeho rozlišení je menší než 0.5 $\mu$ m a maximální rychlost pohybu magnetického proužku je 650 mm za sekundu.

#### Kvadrurní enkodér Nanos

Je magnetický lineární kvadrurní enkodér pracující na principu popsaném v kapitole 3.3. Napájen je napětím 5V a má dva výstupy A a B, což jsou o 90° posunuté signály, kde posunutí těchto signálů oproti sobě závisí na směru pohybu piezomotoru. Signály zpracovává mikrořadič připojený k desce ovládacího obvodu. Maximální rychlost posuvu, při které enkodér zvládá ještě správně počítat je 250 mm za sekundu, při rozlišení až 61 nm. Tento senzor je momentálně používán pro měření polohy piezomotoru. Jeho kompaktní velikost umožňuje jednoduché umístění na navrhovaný souřadnicový stolek. Magnetický proužek stačí k souřadnicovému stolku pouze přilepit lepidlem. I pokud bude proužek nalepen špatně a je například umístěn nerovnoběžně se senzorem, poloha bude měřena správně. Musíme pouze dodržet vzdálenost proužku od senzoru.

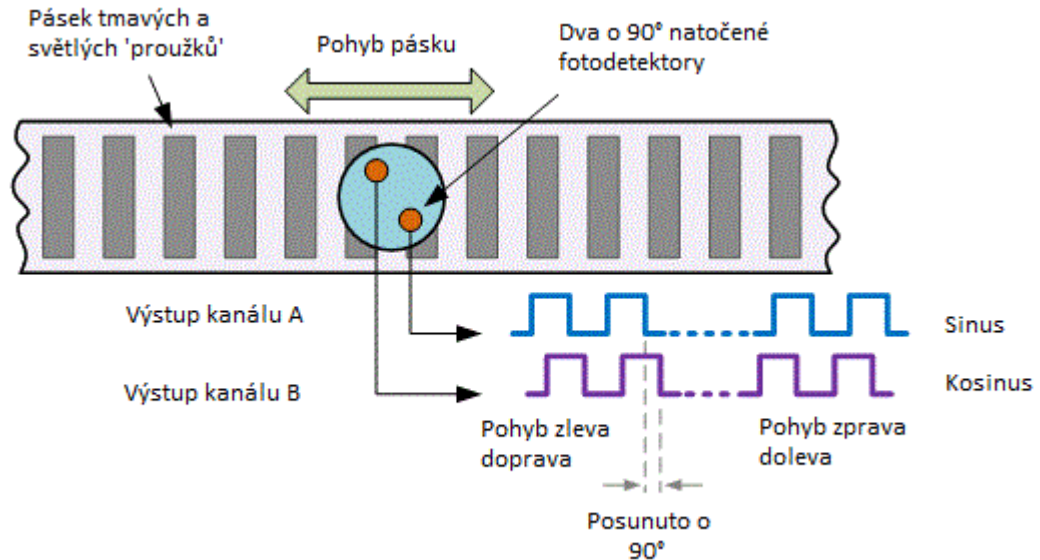


Obr. 3.9. Kvadrurní enkodér Nanos Instruments GmbH [22]



### 3.4 Optické enkodéry

Na stejném principu jako magnetický a kapacitní lineární inkrementální enkodér, pracují i optické enkodéry. Pouze s tím rozdílem, že na pásku se nestřídá severní a jižní magnetický pól, ale průsvitný a neprůsvitný proužek, skrze který svítí zdroj světla na fotodetektor. Také optické enkodéry mohou dosahovat rozlišení jednotek nm.



Obr. 3.10 Inkrementální optický enkodér[2]

## 4. Návrh a realizace ovládacího obvodu

Společně s piezomotorem od společnosti Piezomotor je v ‘demokitu’ také dodáván ovládací obvod PMD-90. Toto zařízení jsem testoval v rámci individuálního projektu a vytvořil pro něj ovládací virtuální přístroj v prostředí LabView. Navrhovaný ovládací obvod používá stejnou sadu ovládacích příkazů, pouze obohacenou o možnost výběru ze dvou piezomotorů. Tím je zajištěna kompatibilita s virtuálním přístrojem. Protože obvod PMD-90 umožňuje ovládat pouze jeden piezomotor, navrhnul jsem ovládací obvod, který umožňuje řídit piezomotory dva. To je nutnost například pro dvouosý polohovací stolek.

### 4.1 Stávající ovládací obvod PMD-90

PMD-90 je řídicí obvod pro piezomotory typu piezolegs. Komunikace probíhá pomocí portu USB. Za tímto portem se nachází převodník z USB na RS-232. Napájí se stejnosměrným zdrojem 12-24V (viz Obr 3.1), a umožňuje řídit jeden piezomotor dvěma způsoby. Jeden ze způsobů využívá zpětnou vazbu a druhý ne. U řízení motoru bez zpětné vazby můžeme odhadnout délku kroku motoru a tedy i odhadnout polohu hnané tyče. Tato metoda je ale velice nepřesná, zvláště pokud požadujeme rozlišení v řádu mikrometrů a výše. Její snad jediné využití je pro demonstraci funkce piezomotoru.

Obvod umožňuje připojení senzoru polohy pro přesnější řízení. Vstup senzoru na PMD-90 je vhodný například pro magnetický kvadrantní enkodér Nanos, popsany ve třetí kapitole. Tyto enkodéry jsou vyráběny v různých možných rozlišeních a v ‘demokitu’ je takový to enkodér s rozlišením 61 nm. Připojení senzoru umožňuje polohovat tyč motoru velice přesně, ale řešení zpětné vazby není řešené tak, jak bych si představoval. Data ze senzoru polohy jsou v tomto řídicím obvodu pouze ukládána do jednoho registru, ze kterého může uživatel určit přesnou polohu. Tento registr není v programu driveru nijak využíván. Řízení piezomotoru tedy probíhá tak, že příkazy přes sériovou linku nastavíme rychlost motoru a dalším příkazem nastavíme o kolik kroků chceme s hnanou tyčí ‘popojet’.

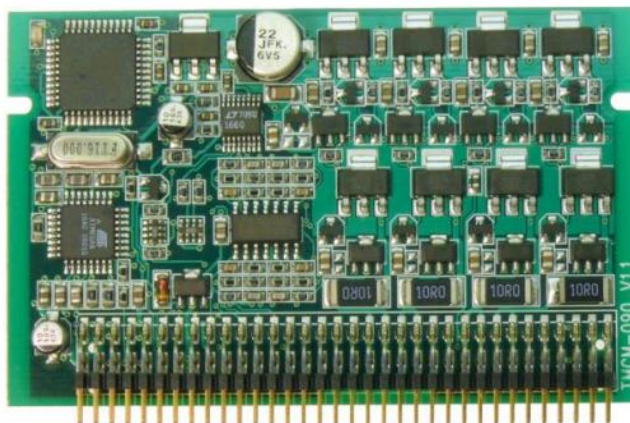


Obr 4.1. PMD101 [5]

Po rozpořhování motoru musíme opět přes sériovou linku kontrolovat stav registru polohy a ve správný čas motor zastavit. Zde ale nastávají problémy s rychlostí vyhodnocování této polohy. Protože s driverem komunikujeme rychlostí pouhý  $\mu$

57,6 kiloBaudů, velice často nestihnáme číst polohu dostatečně rychle, a náš zpětnovazební program nestihne motor zastavit včas. My bychom například chtěli zastavit motor na poloze 5. Co nejrychleji v co nejkratších intervalech čteme opakovaně registr polohy, ale vyčteme pouze posloupnost 1, 4, 6 – kýženu polohu 5 jsme nestihli přečíst, a motor nám „ujel“. Toto lze sice řešit hysterezí, ale každý jeden pulz který ztratíme, pro nás znamená špatnou polohu zde o 61nm. Kdyby hlídání polohy zpracovával již procesor v ovládacím obvodu, toto by se pravděpodobně nestávalo.

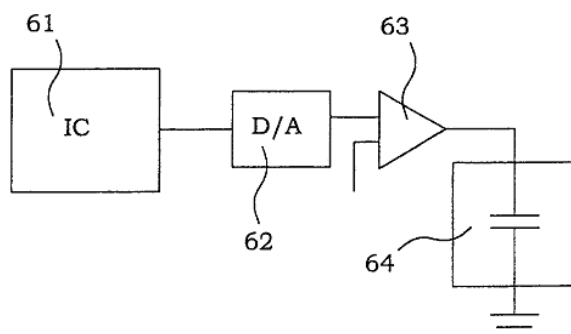
K PMD-90 samozřejmě nejsou dostupná žádná schémata, ale zjistil jsem, že elektroniku pro tento driver vyrábí společnost TRINAMIC. Konkrétně jde o model TCMC-090, který lze zakoupit samostatně za cenu asi 300 dolarů. Tento modul se zapojuje do dalšího modulu, který se stará o komunikaci s okolním světem a regulaci napětí. Na obrázku tohoto modulu jsou vidět výstupní zesilovače čtyř výstupních fází, paměť pro vzorky a také datový převodník. Výstupní zesilovače jsou zde tvořeny tranzistory. V mém návrhu jsem se vydal u řešení této části cestou výkonových operačních zesilovačů, která je jednodušší na návrh, mohou ale nastat komplikace se stabilitou, které jsou způsobeny hlavně kapacitním charakterem zátěže.



Obr. 4.2. Trinamic TCMC-090[6]

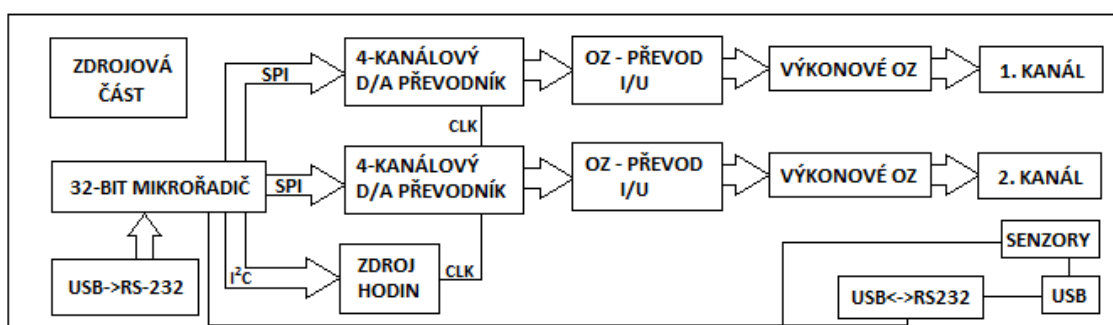
## 4.2 Vlastní návrh ovládacího obvodu

Doporučený způsob řízení piezomotorů lze zjistit přímo z patentů společnosti Piezomotor. Konkrétně v patentu US 6,337,532 B1 se nachází velmi stručný obrázek, který způsob řízení popisuje viz obr. 4.3. Blok 61 je řídicí obvod, zde doporučeno FPGA následováno D/A převodníkem (62), výkonovým zesilovačem (63) a modelem zátěže (64). Jako zátěž je zde nakreslen kondenzátor, protože připojené piezoelektrické elementy jsou vlastně tvořeny keramikou mezi elektrodami, což je kondenzátor. Jedna fáze motoru má kapacitu přibližně 430 nF a je závislá na teplotě. Velikost změny kapacity závisí na typu keramiky ze které je vyroben hnací element motoru. Tento způsob řízení je ten z nejjednodušších, a například se zde nenachází žádný blok rekuperace. Funkce rekuperace se nachází u složitějších obvodů, které energii uloženou do kapacitní zátěže ukládají a opět ji používají, narozdíl od tohoto řešení, kde se pouze přemění na teplo. Tento způsob řízení je tedy jednoduchý pro návrh a jeho jedinou nevýhodou je špatná účinnost. Na tomto jednoduchém schématu je založen mnou navržený ovládací obvod a také již zmíněný obvod PMD-90.



Obr. 4.3. Piezomotor patent – způsob řízení [7]

Na obrázku 4.4 je zjednodušené schéma navrženého obvodu, jehož jednotlivé části budou do podrobnosti popsány v následujících kapitolách. Na blokovém schématu jsou zobrazeny nejdůležitější části. Zdrojová část, která ve skutečnosti tvoří asi třetinu osazené desky, je tvořena čtyřmi na sobě závislými zdroji. Pro spolehlivou funkci všech



Obr. 4.4. Blokové schéma řídicího obvodu

ostatních bloků potřebujeme následující napětí: 48, 5, +3.3, -3.3 a 1.8V. Zdroje jsou tvořeny zvyšujícími ('step-up') a snižujícími ('step-down') stejnosměrnými převodníky, v případě napětí 1.8V si vystačíme pouze s lineárním stabilizátorem. Dalším důležitým blokem je řídicí 32-bitový mikrořadič, který pomocí sběrnic I<sup>2</sup>C a SPI ovládá zdroj hodin a dva 12-bitové D/A převodníky. Také zprostředkovává komunikaci s počítačem, ke kterému se připojuje přes USB 2.0. Mikrořadič není na řídicí desce napájen přímo, ale připojuje se pomocí 24-pinového konektoru, který se nachází vprávním dolním rohu desky.

#### a) Napájecí zdroje

Digitální a analogové obvody, ze kterých se skládá celkový řídicí obvod, požadují různé velikosti napětí, a podobně jsou na tom i samotné piezomotory. Aby se k desce nemuselo připojovat pět různých napájecích zdrojů, nacházejí se na ní stejnosměrné regulátory napětí a lineární stabilizátory, které tato napětí tvoří. Díky tomu se řídicí obvod připojuje pouze k jednomu stejnosměrnému zdroji o napětí 18-22V, který zvládá dodat alespoň 50W, což dnes splňuje například většina notebookových adaptérů. Podobně je řešeno i napájení driveru popsaného v kapitole 4.1.

Pro piezomotory slouží zvyšující převodník, na jehož výstupu je 48V. Toto napětí je maximální přípustné pro piezomotory. Nicméně toto napětí se na zátěži nikdy neobjeví. Jeden až dva volty musíme odečíst kvůli výkonovým operačním zesilovačům

na výstupi jednotlivých fází. Je to způsobeno tím, že tyto OZ nejsou tzv. 'rail-to-rail', tedy nedokáží mít na výstupu přímo kladné nebo záporné napájecí napětí. Tento fakt ničemu nevádí, protože velikosti vzorků a zisky zesilovačů budou nastaveny pro maximální výstupní napětí asi 42V.

Další potřebné napětí je 1.8V. Toto napětí požaduje pouze jádro obvodu pro generaci hodin. Protože výstupy tohoto obvodu jsou napájeny napětím 3.3V, nejsou na tento zdroj kladeny nijak vysoké výkonové nároky. Zdroj je řešen lineárním stabilizátorem.

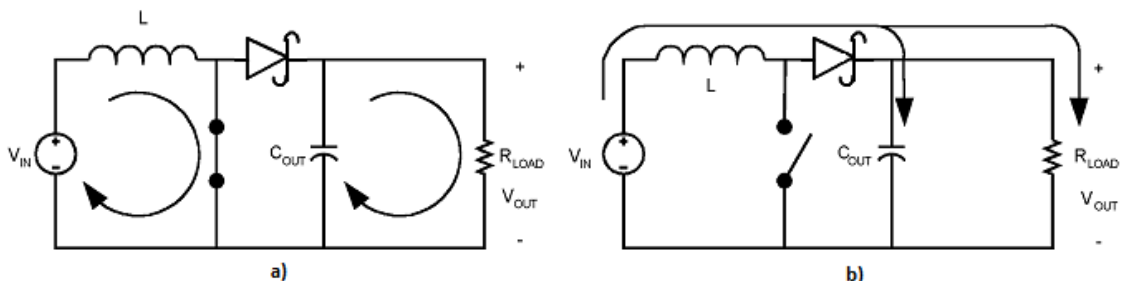
Dále jsou potřeba zdroje  $\pm 3.3V$ . Kladné 3.3V napájí oba datové převodníky a výstupní zesilovače generátoru hodin. Oba zdroje jsou současně používány jako symetrické napájení pro operační zesilovače umístěné za datové převodníky, kde plní funkci převodníků proudu na napětí. Záporné napětí 3.3V je nutné pro dosažení nulového výstupního napětí výstupních zesilovačů.

Poslední požadované napětí je 5V, který m senapájí senzory a mikrořadič. Pro velmi nízký odběr senzorů (do 50mA) a mikrořadiče (max. 100mA), je toto napětí odebíráno ze sběrnice USB 2.0. Sběrnice takovýto odběr dovoluje, ale o tom jestli bylo zvolené řešení tohoto zdroje rozumné, rozhodne až testování.

Před popisem jednotlivých částí zdrojů musím alespoň jednoduše popsat principy, na kterých pracují různé typy převodníků stejnosměrného napětí. Prvním typem je stejnosměrný převodník zvyšující napětí, druhý je stejnosměrný převodník snižující napětí a třetím je invertující převodník. Všechny zde použité spínané převodníky používají k získání napětí jako akumulací prvek cívku. Tedy nikde není používána např. nábojová pumpa, která cívku ke své funkci nepotřebuje.

### Zvyšující (step-up) regulátor

Principiální schéma převodníku zvyšujícího napětí se nachází na obrázku 4.5. V kroku a) dochází k ukládání energie do induktoru L. Mezitím je do zátěže dodáván proud z výstupního kondenzátoru. V bodě b) dojde k rozepnutí spínače. Cívkou nadále prochází proud stejným směrem, ale polarita napětí na ní se změní. Tedy získali jsme dva sériově řazené zdroje napětí. Výstupní kondenzátor je poté nabit na součet těchto napětí. Mezi cívkou a kondenzátorem je zařazena dioda, která zabraňuje toku proudu zpět do zdroje. Jako spínač slouží rychlý tranzistor, který je řízen spínacím obvodem, například LM3478 který používám pro získání napětí 48V.

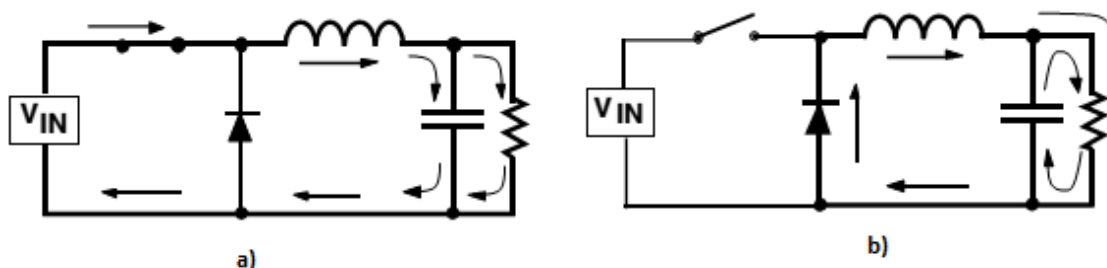


Obr. 4.5. Princip step-up převodníku [8]

### Snižující (step-down) regulátor

Snižující, 'step-down', 'buck' převodník používáme pro snížení napětí. Snižovat napětí lze jednoduše i pomocí lineárních stabilizátorů, ale s lineárním stabilizátorem dosahujeme velmi malé účinnosti. Se snižujícím převodníkem lze jednoduše dosáhnout účinnosti vyšší než 90%. Účinnost je závislá na zatížení – při nižším zatížení než na které byl zdroj navržen se účinnost mírně snižuje.

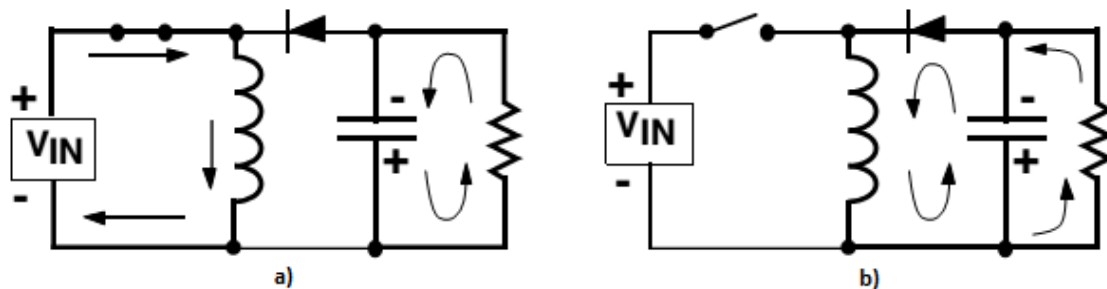
Principiální schéma se nachází na obrázku 4.6. V bodě a) je spínač (tranzistor) sepnutý a dioda uzavřena. Proud prochází přes indukčnost, do které se akumuluje energie. Na indukčnosti je rozdíl vstupního a výstupního napětí. V bodě b) je tranzistor rozepnut. Indukčnost udržuje stejný směr proudu. Polarita napětí na indukčnosti se změní, dioda se otevře, a obvod je kompletní. Napětí na indukčnosti se odečítá od výstupního, tedy získáváme nižší výstupní napětí. Pro tento účel lze použít například integrovaný obvod LM2674.



Obr. 4.6. Princip step-down převodníku [9]

### Invertující (buck-boost) regulátor s induktorem

Za pomoci invertujícího regulátoru můžeme vytvořit nižší nebo vyšší napětí opačné polaroty. Principiální schéma tohoto regulátoru se nachází na obrázku 4.7. Tento regulátor obsahuje indukčnost.



Obr. 4.7. Princip buck-boost regulátoru [9]

V části a) obrázku 4.7 je do zátěže dodáván proud z kondenzátoru, zatímco je do indukčnosti ukládána energie. Kondenzátor musí být v dalším kroku znovu dobít. Dioda je uzavřena. V dalším kroku b) je spínač rozpojen. Dioda je změnou polaroty na indukčnosti otevřena a obvod je uzavřen. Indukčnost nyní zásobuje proudem jak kondenzátor, tak i zátěž.

### Zdroj 48V

Napětí 48V vytváříme z dodaných 18-22V pomocí zvyšujícího stejnosměrného převodníku, v katalozích výrobců se převodník také označuje jako 'boost converter'. Pro tento zdroj jsem vybral integrovaný obvod od Texas Instruments LM3478. Uvedený



obvod zjednodušuje návrh spínaného zdroje. Pomocí několika přídavných rezistorů a kondenzátorů můžeme vytvořit námi požadovaný zdroj. Navíc jsou v obvodu již nastavené velmi užitečné funkce, jako je například soft-start zdroje, ochrana proti zkratu na výstupu, ochrana proti přehřátí obvodu a přepětová ochrana. Zdroj s již vypočítanými hodnotami součástek je na obrázku 4.9.

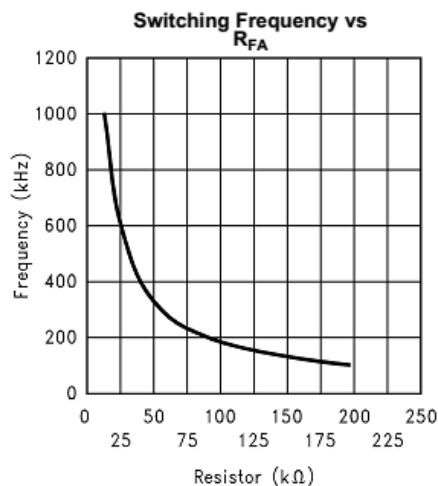
Pro výpočet ostatních součástek je důležité si určit spínací frekvenci. LM3478 nám umožňuje nastavit frekvenci v rozmezí 100 kHz až 1 MHz. Frekvence se nastavuje pouze jedním rezistorem připojeným k pinu FA/SD. S vyšší frekvencí můžeme navrhnout zdroj s například menším induktorem, a šetřit tak místo. V návrhu je zvolena frekvence 500 kHz. Hodnotu rezistoru pro nastavení frekvence můžeme vyčíst z grafu na obr. 4.8 nebo pomocí vzorce 4.1, který je aproximací tohoto průběhu.

$$R_{FA} = 4.503 \cdot 10^{11} \cdot f_s^{-1.26} \quad (4.1)$$

Výpočet pro 500 kHz

$$R_{FA} = 4.503 \cdot 10^{11} \cdot 500000^{-1.26} = 29.7 \text{ k}\Omega \quad (4.2)$$

Tedy z řady E96 volíme rezistor 29,4 kΩ. Další potřebnou věcí je nastavení výstupního napětí. To se nastavuje napěťovým děličem z výstupního napětí. Na obrázku 4.9 jsou to rezistory R16 a R17. Napětí z děliče je přivedeno na pin FB. Dělič nastavíme tak, aby na pinu FB bylo napětí 1.26V. U zdroje se také nastavuje maximální dovolený proud do zátěže. Ten se nastavuje pomocí snímacího rezistoru, který je v obvodu 'source' spínacího tranzistoru. Tento rezistor také slouží k ochraně proti zkratu a kdykoliv se na něm objeví napětí vyšší než 343mV, dojde k rapidnímu snížení spínací frekvence. Po odstranění zkratu se frekvence obnoví na původní hodnotu.



Obr. 4.8. Nastavení frekvence obvodu LM3478 [8]

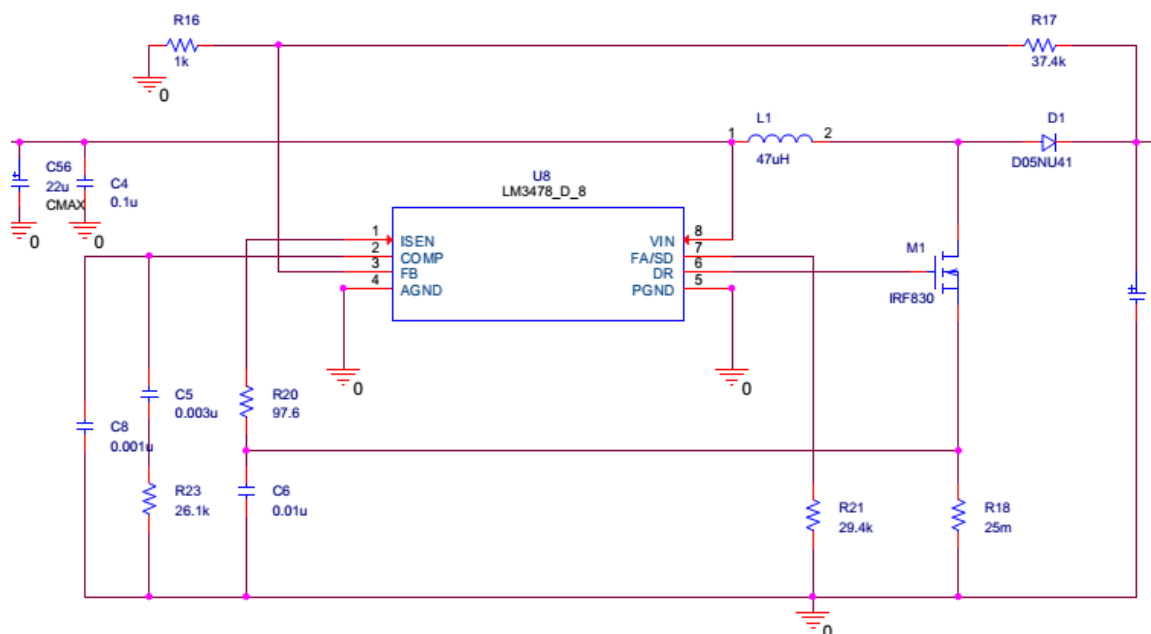
Nyní musíme vybrat vhodné hlavní prvky: diodu, spínací tranzistor, vstupní a výstupní kondenzátory. Doporučenou diodou pro takovýto zdroj je rychlá Schottkyho dioda s malým úbytkem napětí. Tato dioda musí být určena na vyšší než špičkový proud. Špičkový proud můžeme vypočítat podle vzorce 4.3,

$$I_{Dpeak} = I_{OUT} / (1 - D) + \Delta I_L \quad (4.3)$$

kde  $I_{out}$  je výstupní proud zdroje,  $D$  je 'duty cycle' (zde 0.62) a  $\Delta I_L$  je proudová špička na cívce.

Uvedl jsem několik jednoduchých věcí pro výpočet, ale ne u všech prvků je výpočet jejich hodnot až takto přímočarý. Grafy v datových listech, ze kterých se odečítají hodnoty součástek nejsou vždy kompletní, a občas se dá narazit na chybu ve vzorcích. Proto, aby ruční výpočet neskončil tragédií a nefunkčním zdrojem, nabízí nám Texas Instruments (dále TI) pro zjednodušení výborný nástroj pro návrh zdrojů. Jedná se o volně dostupnou webovou aplikaci Webench designer, část Power Architect. Webench zvládá spočítat téměř jakýkoliv zdroj – samozřejmě s integrovanými obvody od TI. Dokáže navrhnuté zdroje i simulovat, což je například ve SPICE docela tvrdý oříšek. Po zadání požadovaných vlastností má uživatel na výběr z mnoha řešení, a je pouze na něm jestli si zvolí jako hlavní kritérium pro výběr cenu, ekologičnost nebo „rozlehlost“ návrhu. Aplikace je navíc ověřována návrháři, kteří pokud naleznou chybu, je ihned opravena a ostatní uživatelé jsou o ní varováni emailem.

Tuto aplikaci jsem použil pro výpočet součástek, a pouze ověřil správnost výpočtu klíčových součástek.



Obr. 4.9. LM3478 zapojení zdroje 48V

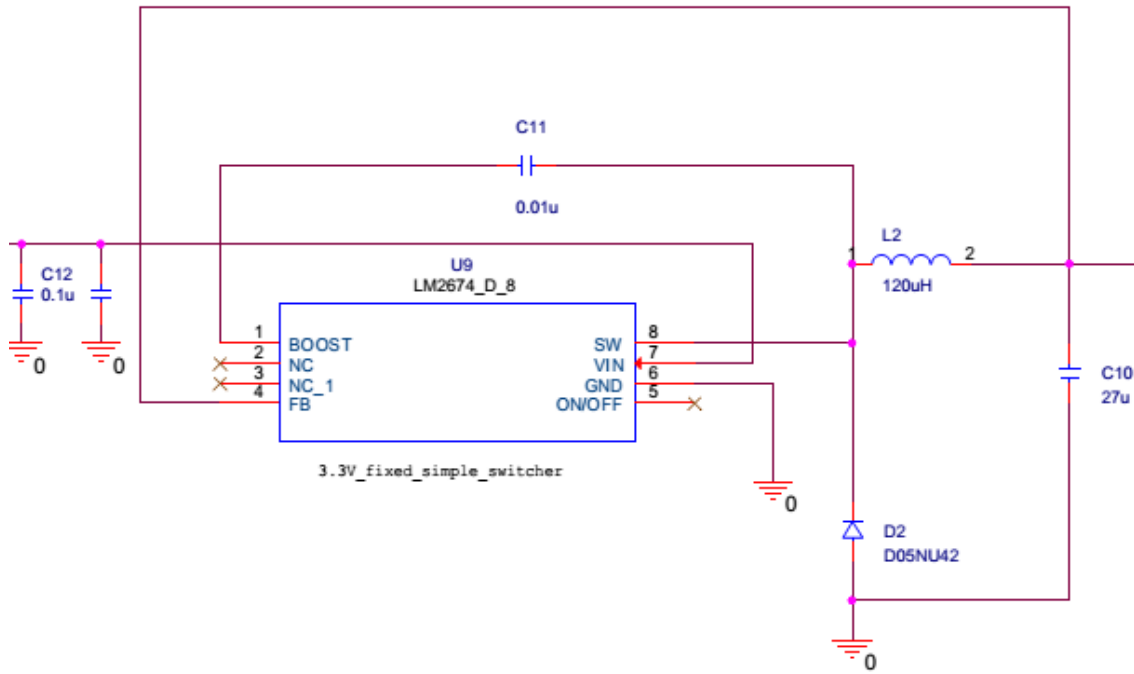
### Zdroj +3.3V

Napětí +3.3V vytváříme také z dodaných osmnácti voltů. Protože požadované napětí je nižší než napětí dodávané, použijeme snižující převodník stejnosměrného napětí. V cizí literatuře ‘step-down converter’, ‘buck’. Pokud se podíváme na schéma zapojení tohoto zdroje na obr. 4.10, uvidíme mnohem jednodušší zapojení než u zdroje v předešlé kapitole. U předešlého zdroje je dodávaný řídicí obvod jen a pouze řídicí obvod, ke kterému se musí připojit spínací tranzistor, dělič pro nastavení napětí, různé kompenzace a podobně. Je tedy označován jako ‘kontrolér’. V případě zdroje 3.3V je zvolen kontrolér s integrovaným spínacím tranzistorem. Integrovaný jsou i veškeré kompenzace, a mnou vybraný modul má i předem nastavené výstupní napětí (není podmínkou). Na jednu stranu dostáváme jednoduchý na zprovoznění a perfektně vyladěný obvod pro realizaci zdroje. Na druhé straně jsou zde jistá omezení. Nelze změnit výstupní napětí, spíná se na určené frekvenci. Hotový zdroj může dodat pouze



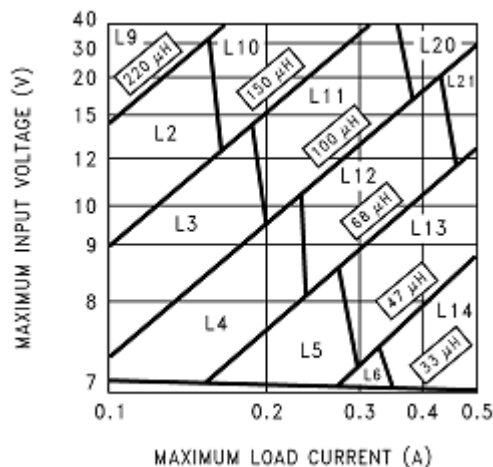
určitý maximální proud do zátěže, protože spínací tranzistor je integrován a nelze měnit. Tedy u tohoto obvodu ztrácíme volnost návrhu, kterou umožňuje kontrolér.

V tomto případě ale potřebujeme pouze fixní napětí 3.3V, tedy nedostatky nás neovlivňují. Obvod, který jsem pro tento zdroj vybral je obvod LM2674 ve verzi výstupního napětí 3.3V. Obvod dodá do zátěže maximálně 500mA, spíná na frekvenci 260 kHz a podporuje vstupní napětí 8-40V.



Obr. 4.10. LM2674 zapojení zdroje +3.3V

V případě tohoto zapojení jsou hodnoty buď dány výrobcem nebo se odečtou z jednoduchého grafu. Zadaná je například hodnota kondenzátoru C11, připojeného k pinu BOOST. Indukčnost cívky L2 se odečte z grafu. Ukázka grafu se nachází na obrázku 4.11. Graf není zcela kompletní, ale lze z něho odhadnout alespoň minimální hodnotu indukčnosti. V návrhu je zvolena indukčnost 120uH.

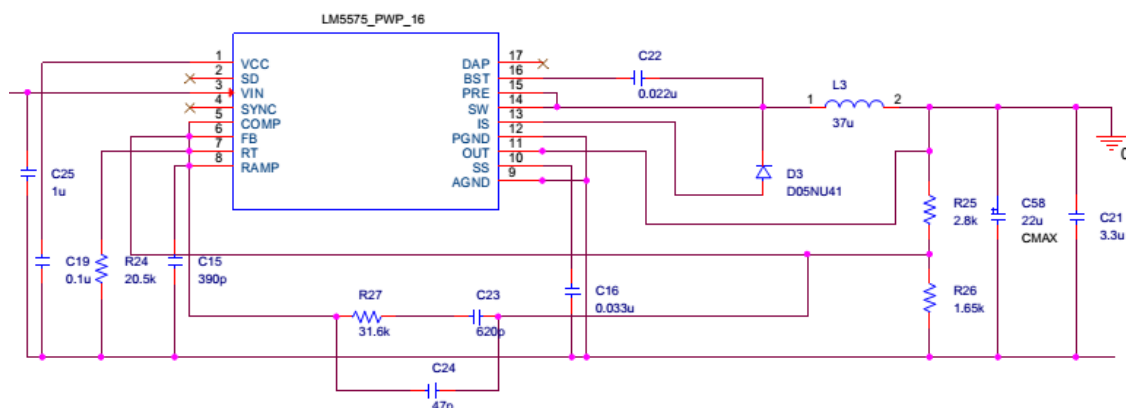


Obr. 4.11. LM2674 výběr indukčnosti [8]

### Zdroj -3.3V

Zdroj záporného napětí 3.3V na rozdíl od dvou předešlých nemá na vstupu adaptér 18-22V, ale je napájen z již vytvořeného napětí 48V. Funguje na principu snižujícího spínaného zdroje. Napětí 48V tedy snižujeme na požadovaných -3.3V. Řídícím obvodem pro tuto část zdroje je integrovaný obvod LM5575, opět od TI. LM5575 podobně jako LM2674 z předchozí kapitoly má integrovaný spínací tranzistor, tedy má nějaká omezení, ale v ostatních částech již máme větší volnost. Velikost výstupního napětí je u tohoto obvodu nastavitelná, také lze opět nastavit spínací frekvence, tentokrát v rozmezí 50kHz – 500kHz. Různé ochranné funkce jako soft-start a ochrany jsou samozřejmostí. Maximální povolené vstupní napětí je 75V, což našich vstupních 48V splňuje s přehledem. Také v případě více takovýchto obvodů lze pomocí pinu SYNC synchronizovat a snížit tak elektromagnetické rušení. Jedná se o novější integrovaný obvod na rozdíl od ostatních kontrolérů, a je tedy již od návrhu plně podporován sadou Webench, která byla použita pro návrh tohoto zdroje.

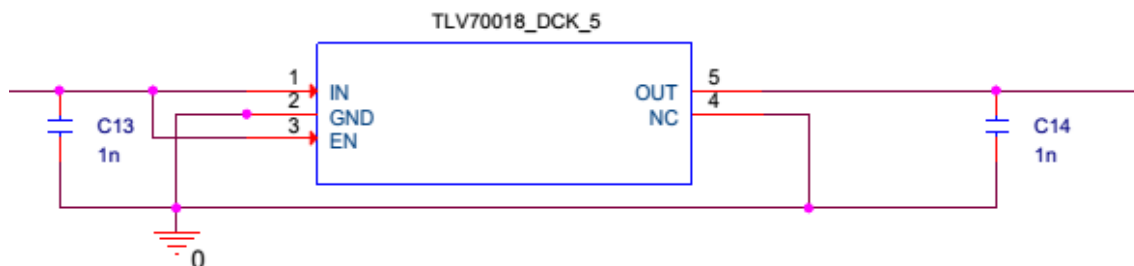
Kompletní schéma této části zdroje viz obr 4.12. Zdroj je navrhnut tak, aby mohl dodávat 600mA do zátěže. V případě nedostatku je zde ještě velká rezerva, protože obvod LM5575 může do zátěže bez problémů dodávat až 1.5A. Proto má také na rozdíl od ostatních větší pouzdro s chladičskou ploškou.



Obr. 4.12. Schéma -3.3V LM5575

### Zdroj 1.8V

Poslední a také nejjednodušší část zdroje je tvořena lineárním stabilizátorem TLV70018. Jeho vstup je připojen na zdroj 3.3V a maximální možný dodávaný proud je 200mA. Pro svůj provoz potřebuje pouze dva kondenzátory – vstupní a výstupní. Stabilizátor lze vypnout přizemněním pinu EN. V tomto stavu odebírá proud do 1uA. Schéma viz obr. 4.13.

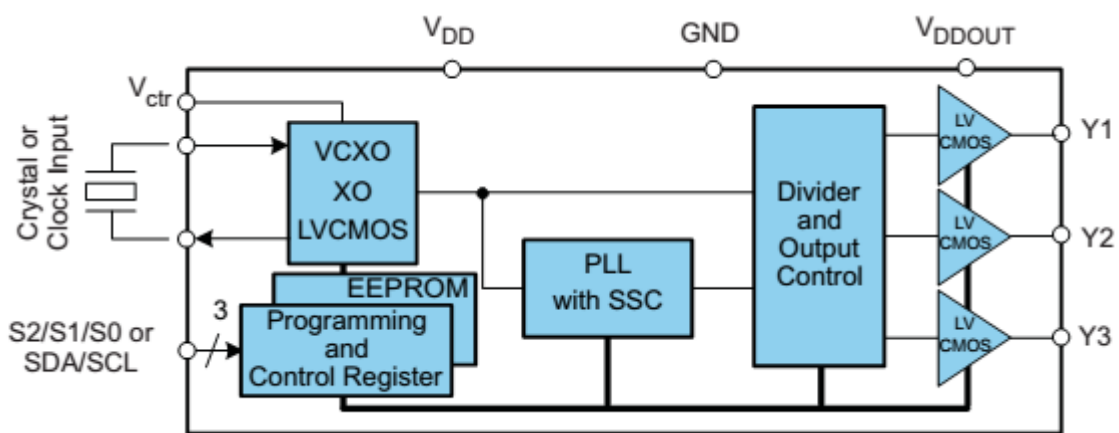


Obr. 4.13. TLV70018 LDO

## b) Generace hodin

Protože jsem pro vytvoření osmi kanálů k řízení piezomotorů vybral D/A převodník který nemá svůj vlastní generátor hodin, musí být přidán do návrhu. Převodníky vyžadují takt maximálně 180 MHz. Pro distribuci hodin dostačuje generátor s jedním výstupem. D/A převodníky mají hodinový vstup připraven pro příjem LVDS signálu. Což je v překladu „nízko-napěťový rozdílový signál-ing“. Vysílač vysílá tedy rozdílový signál. V datovém listě převodníků se ale můžeme dočíst, že to není nutné a lze použít i tzv. 'single ended' zapojení. Tedy jsem vybral odvod od TI cdce913.

Jedná se o plně programovatelný generátor hodin se třemi výstupy. Výstupní napětí jsou podporována 1.8, 2.5 a 3.3V. Maximální výstupní frekvence je 230 MHz. Zjednodušené blokové schéma je znázorněno na obrázku 4.14.



Obr. 4.14. Cdce 913 blokové schéma [10]

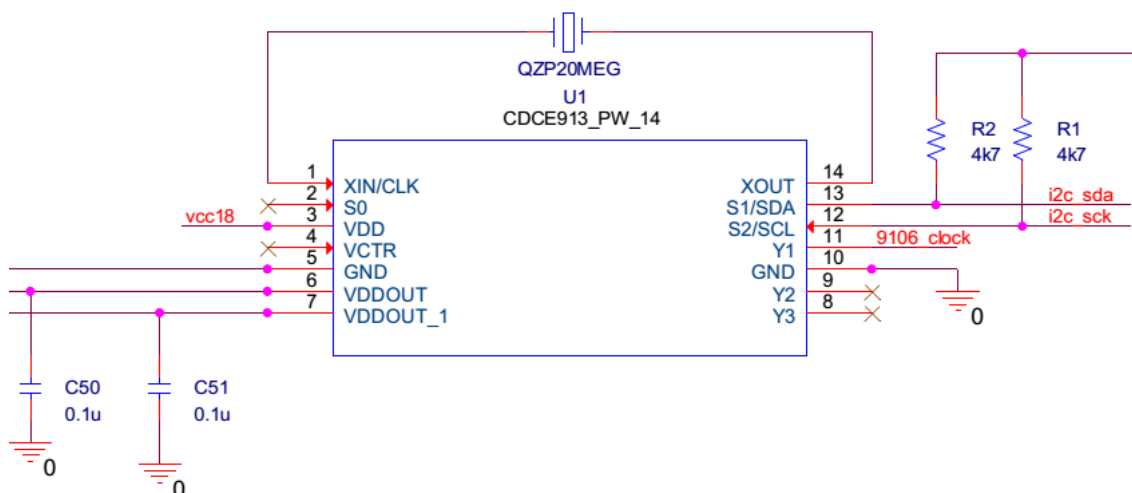
Na vstup může být připojen krystal v rozmezí 8-32 MHz nebo přímo hodinový signál. Ke krystalu nemusíme připojovat kondenzátory, ty jsou integrovány a jejich kapacita lze programově řídit. Tato frekvence je poté násobena v PLL (fázový závěs). PLL obvod se zde nachází pouze jednou. Opět násobička frekvence v PLL je programovatelná a to podílem dvou registrů M a N. Za PLL obvodem se nachází pro každý výstupní zesilovač programovatelná dělička. Díky tomu můžeme mít na každém výstupu jinou frekvenci generovanou pouze jedním PLL nebo PLL a děličky úplně obejít, a mít na výstupu stejnou frekvenci jako má krystal nebo vstupní signál.

Obvod potřebuje dvě napětí pro napájení.  $V_{DD}$  a  $V_{DDOUT}$ .  $V_{DD}$  je vždy 1.8V a je potřeba pro všechny bloky.  $V_{DDOUT}$  je tedy pouze zdroj pro výstupní zesilovače, a můžeme v případě cdce913 použít buď 2.5 nebo 3.3V. My potřebujeme 3.3V.

Protože je cdce913 programovatelný musíme mít možnost s ním nějak komunikovat. Pro komunikaci s okolím používá generátor sériovou sběrnici  $I^2C$ . Přes toto rozhraní lze naprogramovat všechny registry. Naprogramované hodnoty budou uloženy v paměti EEPROM, a po prvním naprogramování se již bude obvod spouštět podle toho, jak jsme si nadefinovali. Po naprogramování sběrnici  $I^2C$  nebudeme již potřebovat, a její piny můžeme použít pro jiné účely.

#### 4. Návrh a realizace ovládacího obvodu

Programové nastavení veškerých násobiček, děliček a vstupů velice zjednodušuje zapojení. Vystačíme si tedy pouze s krystalem 20 MHz, kondenzátory pro blokování napájení a 'pull-up' rezistory bez kterých by byla I<sup>2</sup>C sběrnice nepoužitelná. Uživatelské vstupy nebyly použity, a pro taktování převodníků byl použit pouze jeden výstup – ostatní jsou vypnuté. Zapojení generátoru hodin naleznete na obrázku 4.15.



Obr. 4.15. Zapojení generátoru hodin

Výstupní frekvence PLL lze vypočítat pomocí jednoduchého vzorce:

$$f_{OUT} = f_{IN} \times \frac{N}{M} \quad (4.4)$$

kde  $f_{IN}$  je frekvence krystalu,  $N$  je číslo 1-4095,  $M$  je číslo 1-511.  $N > M$ . Potřebnou frekvenci poté ještě můžeme vydělit číslem  $P_{div}$  v rozmezí 1-127. Proto upravíme vzorec na:

$$f_{OUT} = \frac{f_{IN}}{P_{div}} \times \frac{N}{M} \quad (4.5)$$

Příklad výpočtu frekvence 180 MHz, kde vstupní krystal má hodnotu 20 MHz:

$$f_{OUT} = \frac{20}{1} \times \frac{4095}{455} = 180 \text{ MHz} \quad (4.6)$$

Nyní jsme získali hodnoty registrů  $M$ ,  $N$  a  $P_{div}$ . PLL ale ještě pro svoji funkci potřebuje nastavení svých vnitřních násobiček a děliček. Jedná se o hodnoty  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  a  $N'$ . Tyto hodnoty vypočítáme podle jednoduchých vzorců:

$$P = 4 - \text{int}(\log_2 \frac{N}{M}) \quad 0 \leq P \leq 7 \quad (4.7)$$

$$N' = N \times 2^P \quad (4.8)$$

$$Q = \text{int}(\frac{N'}{M}) \quad 16 \leq Q \leq 63 \quad (4.9)$$

$$R = N' - M \times Q \quad 0 \leq R \leq 51 \quad (4.10)$$

Vypočítané hodnoty jsou tedy  $P = 1$ ,  $Q = 18$ ,  $R = 0$ ,  $N' = 8190$ . Pokud se hodnoty nenacházejí v definovaných intervalech musí se pozměnit  $N$ ,  $M$ ,  $P_{div}$ . Pro

kontrolu řešení, výpočet nebo export hodnot registrů k naprogramování můžeme použít program TI Pro-Clock<sup>TM</sup>, dodávaný výrobcem [10]

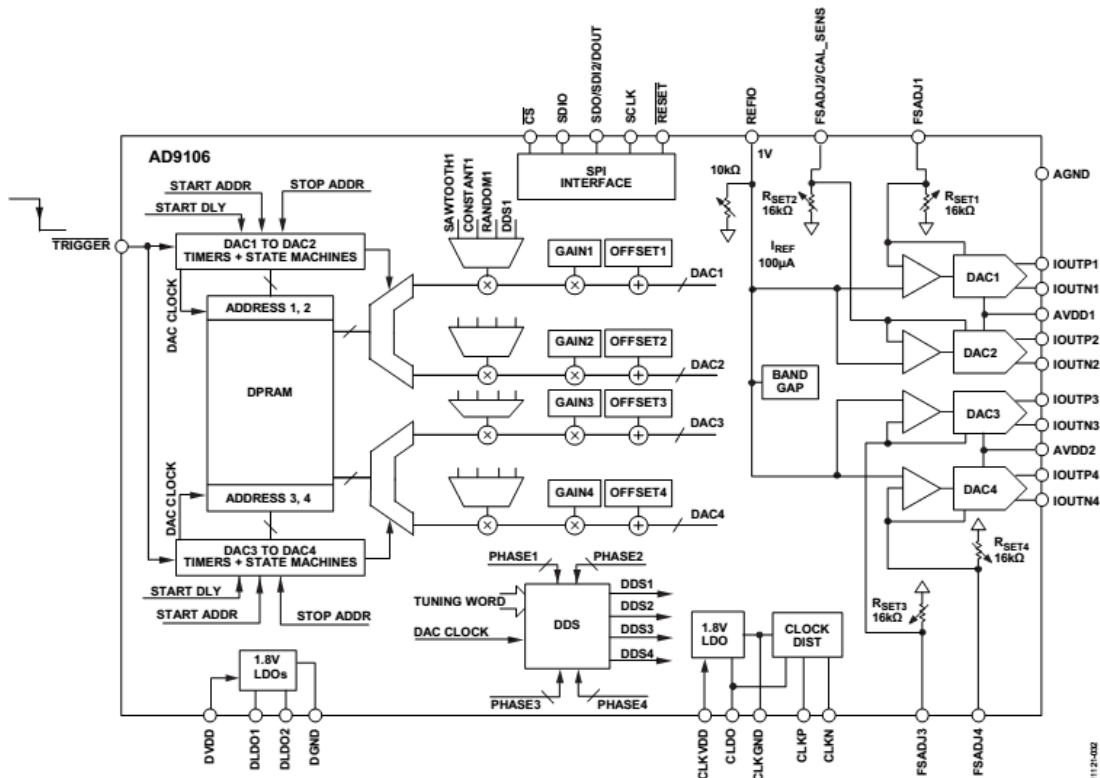
### c) Digitálně-analogový převodník

Na výběru vhodného DA převodníku závisí kvalita a spolehlivost celého ovládacího obvodu. Byl to jeden z nejsložitějších úkolů. Požadavky na DA převodník, ale nejsou nikterak vysoké. Pro správnou funkci a možnost řízení dvou piezomotorů potřebujeme osm víceméně nezávislých kanálů a zvládnutí výstupu maximálně 3 kHz. Čím více vzorků na periodu tím lépe, protože tím získáme možnost řízení piezomotorů v módu mikro krokování, který je potřeba k dosažení nanometrového rozlišení.

Protože jeden piezomotor má čtyři fáze, začal jsem hledat vhodný čtyř-kanálový DA převodník, který bych použil dvakrát, pro každý motor zvlášť. Narazil jsem na některé nevhodné, pomalé. Na trhu se ale nachází obrovské množství převodníků a tak jsem našel vhodné, levné a dostatečně rychlé převodníky komunikující přes I<sup>2</sup>C. Tyto převodníky nabízely plnou kontrolu nad každým kanálem zvlášť a nedisponovaly žádnou vnitřní pamětí, kam by bylo možné vzorky předem nahrát. To mi nevyhovovalo. Zaprvé protože se mi sběrnice I<sup>2</sup>C nezdála dostatečně rychlá pro obsluhu osmi kanálů najednou. Zadruhé nebyla potřeba mít všechny kanály úplně na sobě nezávislé. Fáze piezomotoru mají všechny stejný průběh a to pouze posunutý nebo invertovaný a posunutý zároveň. Proto jsem hledal dále.

Nakonec jsem našel výborný čtyř-kanálový DA převodník s na sobě závislými kanály, komunikující přes sběrnici SPI. Tímto DA převodníkem je obvod AD9106 od společnosti Analog Devices.

Obvod AD9106 je čtyř-kanálový DA převodník s 12ti-bitovým rozlišením. Maximální rychlost vzorkování je 180 MSPS tedy 180 miliónů vzorků za sekundu. Obsahuje paměť na 4096 vzorků, programovatelnou pomocí SPI. Pro generaci průběhů jako je třeba funkce sinus, je součástí převodníku i blok DDS, což je zkratka pro 'Direct Digital Synthesis' (přímá digitální syntéza) vhodná například pro generování sinu plně digitálně, bez analogových oscilátorů. DDS se ladí pomocí 24-bitového slova. Výstupy zesilovačů jsou diferenciální proudové. Jejich maximální výstupní proud je 8 mA při napájení 3.3V.



Obr. 4.16. AD9106 Blokové schéma [11]

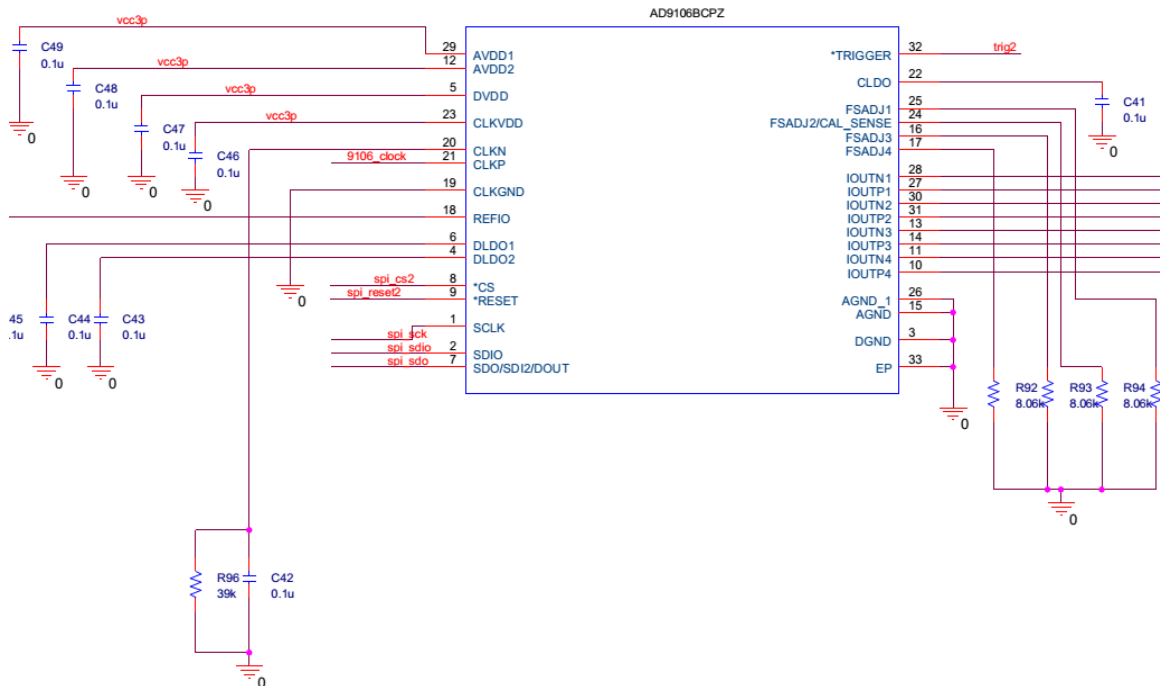
Blokové schéma obvodu AD9106 se nachází na obrázku 4.16. Pokud budeme "číst" schéma zleva doprava, jako první uvidíme vstup TRIGGER (spoušť). Jak název a obrázek napovídá, tak při sestupné hraně signálu spouštíme generaci signálu. Pouze 'triggerem' samotný m ale generaci nespustíme. Pro úspěšnou generaci signálu, předpokládejme, že vše ostatní je správně nastavené, musíme nastavit i RUN bit, který se nachází ve stavovém registru PAT\_STATUS. Pro úspěšnou generaci musí být nastaven na logickou jedničku.

Dalšími částmi jsou bloky, které mohou generovat vzorky. Na schématu jsou řazeny před každý DA převodník. Tyto bloky jsou paměť SRAM, DDS, šumový generátor a také zdroje konstantního napětí. Tyto zdroje lze používat zvlášť nebo je můžeme kombinovat. Například lze pomocí DDS generovat sinus na určité frekvenci a tu modulovat pomocí vzorků uložených v SRAM.

Použití DDS je jasné, pouze naladíme frekvenci ladícím 24-bitovým slovem, v případě paměti SRAM máme více možností. Každý kanál má samostatný přístup k paměti SRAM, a lze naprogramovat na jaké adrese paměti máme uloženy vzorky. Adresa je stavovým automatem inkrementována až do stop adresy, kterou si také naprogramujeme. Lze také naprogramovat zpoždění se kterým začne generace po sestupné hraně 'TRIGGERu'.

Další bloky v cestě vzorků jsou bloky zisku a fázového posunutí, kde můžeme tyto hodnoty nastavit. Poté se již vzorky dostávají k DA převodníkům a jsou převedeny na rozdílový proudový analogový signál. Každý převodník může mít svůj externí rezistor, pomocí kterého se nastavuje výstupní proud. Tato funkce nemusí být využita, protože tyto rezistory jsou i integrovány a jejich hodnota lze programově nastavit. Na schématu je také vidět, že převodníky jsou napájeny ve dvojicích piny AVDD1 a AVDD2.

Dále se ve schématu nacházejí pouze stabilizátory napětí, obvod pro distribuci hodin a sériové datové rozhraní.



Obr. 4.17. Konečné zapojení AD9106

Kompletní zapojení převodníku se nachází na obrázku 4.17. Zapojení je opět jednoduché. Většina potřebných součástek jsou kondenzátory pro blokování napájecího napětí a pro potřebu interních stabilizátorů napětí. To jsou DLDO1, CLDO apod. Dále jsou ve schématu čtyři referenční rezistory 8.06 k $\Omega$  pro nastavení výstupních proudů. Vstupy a výstupy SPI, TRIGGER, RESET a ChipSelect jsou vyvedeny na výstupní 24 pinový konektor, kterým se celý navržený ovládací obvod řídí. Zbylé výstupy jsou již pouze diferenční proudové výstupy, za kterými následuje analogová výstupní část ovládacího obvodu.

### Vzorky pro AD9106

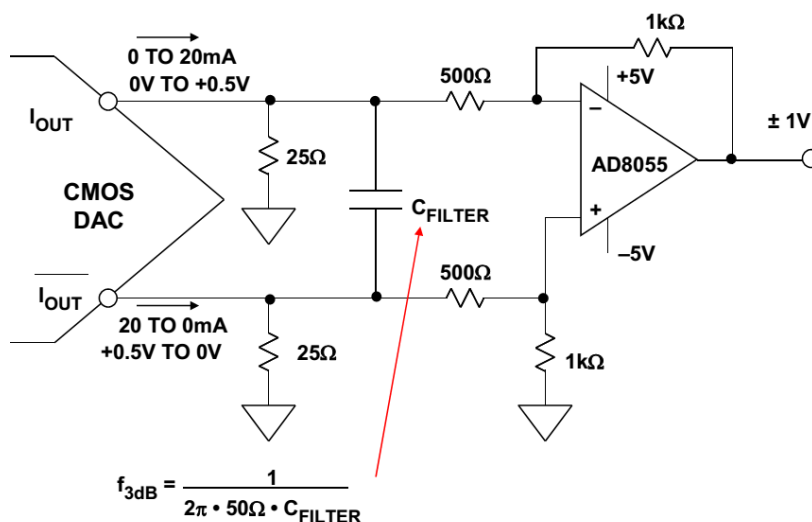
Aby nemusely být vzorky pro převodníky vytvářeny ručně, naprogramoval jsem v Matlabu jednoduchý grafický program, který po zadání rozlišení převodníku, počtu vzorků a nastavení náběžných hran signálu vygeneruje vzorky, a vyexportuje je do textového souboru. Vzorky z tohoto souboru lze poté jednoduše vložit do paměti řídicího procesoru.

### d) Analogová výstupní část ovládacího obvodu

Tato část se pro každý kanál sestává ze dvou operačních zesilovačů. První OZ v signálové cestě, převádí diferenční proudový výstup převodníku na napětí, druhý operační zesilovač je již výstupní výkonový, schopen řízení velké kapacitní zátěže, kterou je jedna fáze piezomotoru.

### Převod diferenčních proudových výstupů na napět'ové SE

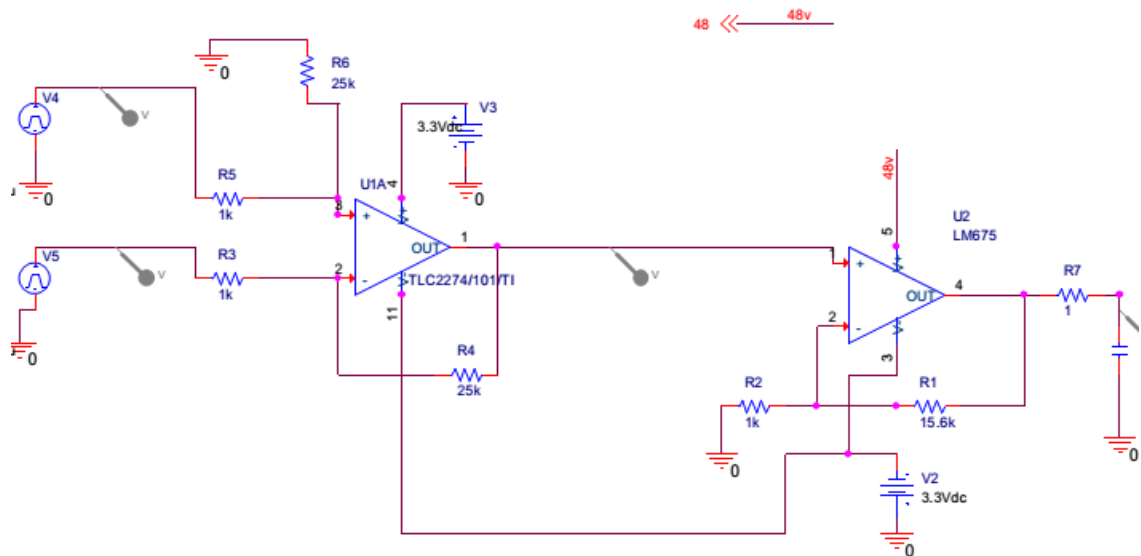
Zde máme na výběr minimálně ze dvou řešení. Na výstupu převodníků se nachází rozdílový proudový signál. Ten lze převést na napětí pomocí transformátoru nebo rozdílovým zesilovačem. Transformátor se připojuje mezi pozitivní a negativní výstup převodníku a jeho střed je uzemněn. Sekundární vinutí se na jedné straně uzemní a získáme 'single-ended' (proti zemi) zapojení. Protože ale pro buzení piezomotoru potřebujeme na výstupech i stejnosměrné napětí viz obr. 2.3, transformátor není vhodný. Proto použijeme operační zesilovač v podobném zapojení jako na obrázku 4.18.



Obr. 4.18. Převod diferenčního výstupu na „single-ended“ [12]

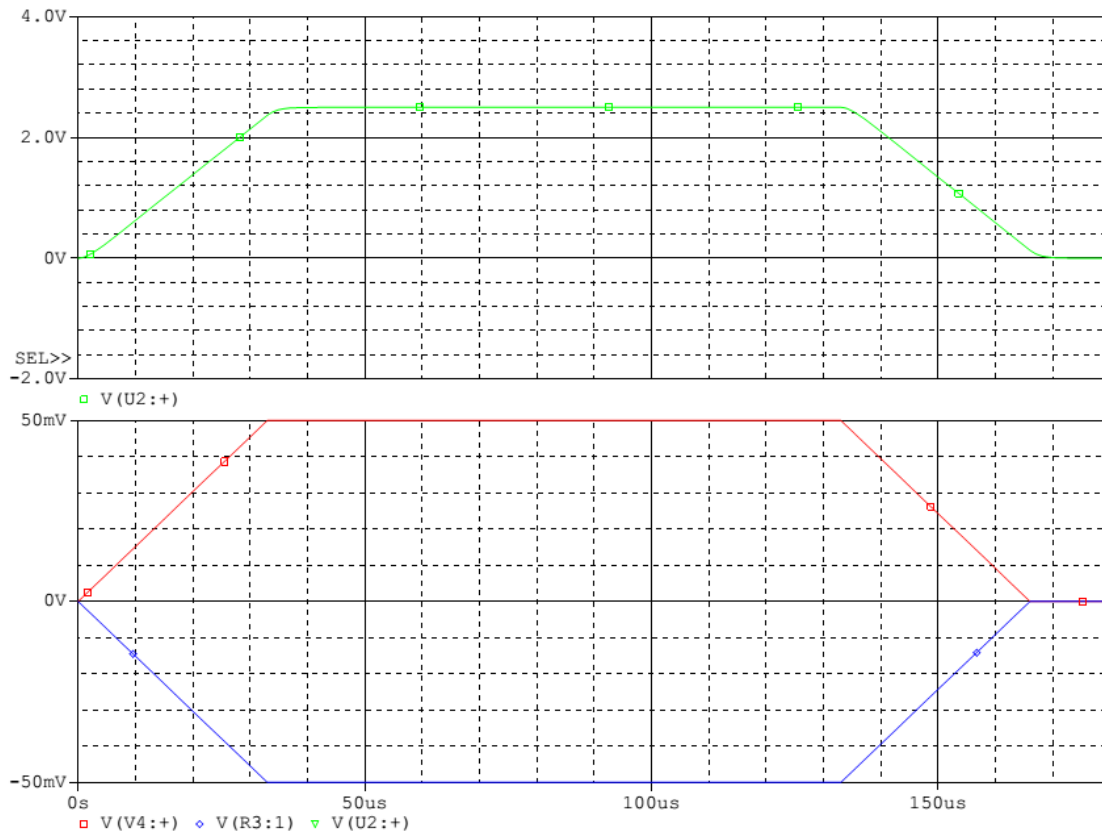
Operační zesilovač potřebuje symetrické napájení, které je zajištěno zdroji  $\pm 3.3V$  popsány dříve. Pro tento účel jsem vybral nízkonapět'ové 'rail-to-rail' operační zesilovače. Čtyři v jednom pouzdře, jedno pouzdro pro každý kanál zvlášť. Obvod s OZ má označení TLC2274. Minimální doporučené napájecí napětí je  $\pm 2.2V$ , což je splněno. OZ jsou tedy zapojeny jako rozdílové zesilovače se ziskem 25. S tímto ziskem při předpokládaném maximálním proudovém výstupu 2 mA z DA převodníku pracujícím do  $50\Omega$  zátěže získáme na výstupu napětí maximálně  $\pm 2.5V$ . Pro toto napětí je navržen další stupeň zesilovače. V případě že by byl celkový zisk obou zesilovačů příliš velký, můžeme snížit zisk softwarově pomocí bloku GAIN v DA převodníku (viz kapitola 4.7) nebo upravit zesílení OZ výměnou rezistorů přímo na desce plošného spoje. Tato část obvodu byla odsimulována v programu Orcad Spice A/D. Na simulačním schématu (Obr. 4.19) je celý analogový výstupní obvod. Napětí vytvořená na výstupních rezistorech převodníku ( $25\Omega$ ) jsou zapojena jako pulsní zdroje. Řešeno pro maximální frekvenci 3 kHz s dobami náběhu a poklesu podobnými průběhu pro kosočtvercový pohyb elementu piezomotoru.





Obr. 4.19. Spice simulace analogového stupně

Ukázka odsimulovaných průběhů na prvních třech sondách zleva:



Obr. 4.20. Vstupy a výstupy diferenčního zesilovače

Na vstupu vidíme rozdílový signál – červený a modrý průběh, na výstupu (zelený průběh) očekávaných  $2.5 V_{\max}$ .

### Koncový zesilovač

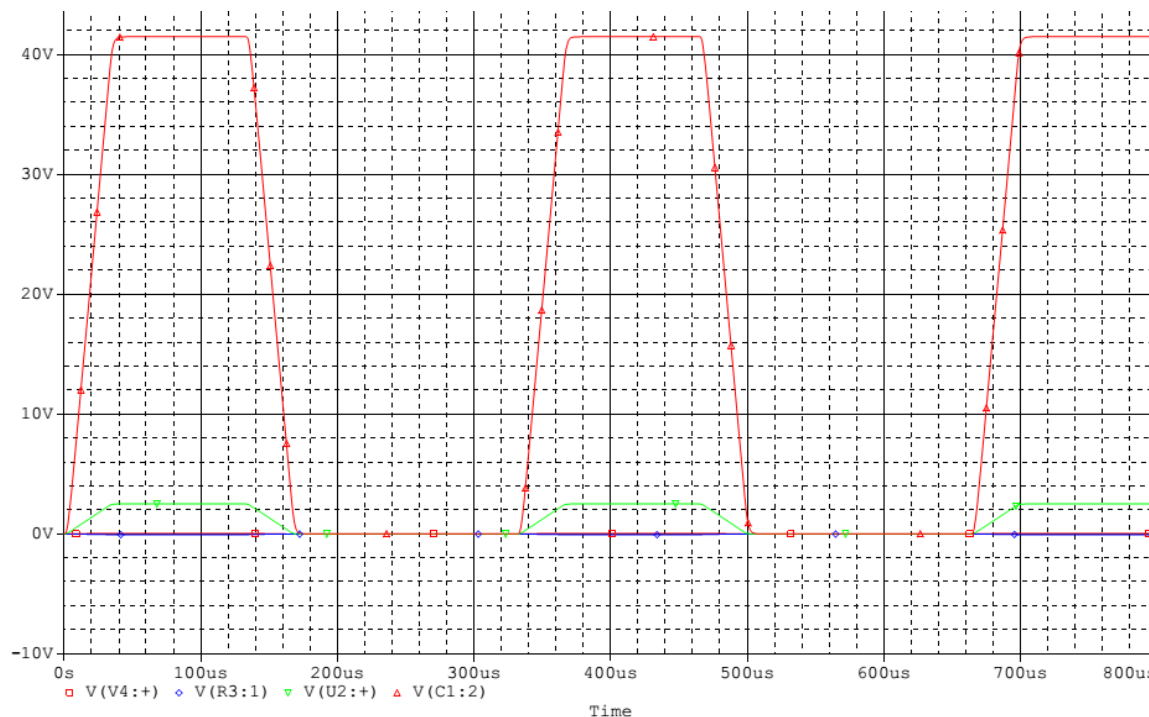
Posledním obvodem před piezomotorem je výkonový operační zesilovač LM675. Byl vybrán takový zesilovač, který je schopen řídit kapacitní zátěž 430 nF, což

je z hlediska operačních zesilovačů ohromná kapacita. LM675 je schopen zvládnout až kapacitu 2  $\mu\text{F}$ , ale výrobcem toto není doporučeno. V případě takto velkých kapacitních zátěží se doporučuje zařadit do série se zátěží rezistor o odporu alespoň 1 $\Omega$ . Tím se zabrání oscilacím. Protože ale maximální přípustná frekvence pro náš piezomotor pracující v nerezonančním režimu jsou 3 kHz, tak se domnívám, že volba tohoto OZ nebude činit žádné potíže. Dále má jeden celý piezomotor (tedy čtyři fáze = čtyři OZ) podle datového listu spotřebu 15 W, což je rozhodně v limitech těchto OZ. Dalším důležitým parametrem je maximální napětí zdrojů. Maximální doporučená hodnota pro LM675 činí 60V. Pokud sečteme napětí použitého kladného zdroje – 48V a napětí záporného – 3.3V zůstává nám stále rezerva téměř 9V.

Proudový limit OZ je udáván 3A, ale to neplatí pro všechna napájecí napětí. V případě našeho celkového napětí zdrojů 50V již OZ dokáže dodat proud pouze pod jeden ampér, což je stále plně dostačující hodnota. Operační zesilovač je vnitřně kompenzován, a měl by být stabilní při zisku větším či rovném deseti. Ochrana proti proudovému, tepelnému přetížení a zkratu je samozřejmostí. Jedním z posledních požadavků je rychlost přeběhu (SR – slew rate), a to minimálně 1.3V/ $\mu\text{s}$ . OZ sice zvládá rychlost přeběhu 8V/ $\mu\text{s}$ , ale pravděpodobně ne s takto velkou kapacitní zátěží. Pro kontrolu je dobré si spočítat proud potřebný pro nabití kapacitní zátěže, při nejstrmější možné hraně signálu. Taková hrana je již zmiňovaných 1.3V/ $\mu\text{s}$ . Proud pro dosažení do vzorce:

$$I = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (4.11)$$

vychází 550 mA. Tato náběžná hrana se ale vyskytuje pouze asi v 1/10 periody. I průběhy na tomto OZ zatíženým kapacitou byly simulovány ve Spice souběžně s převodem rozdílových proudů na napětí. Průběh napětí na zátěži lze vidět na obr 4.21.



Obr 4.21. Průběh napětí na zátěži

### e) USB Převodník

Posledním integrovaným obvodem který se nachází na desce ovládacího obvodu je převodník USB na RS-232. Převodník je zde z několika důvodů. Hlavním důvodem je jednoduchost komunikace po této sériové lince, a také výrazné zjednodušení nastavení zařízení pro komunikaci přes USB sběrnici. Dalším důvodem je to, že ne každý řídicí procesor je vybaven USB řadičem, zatímco USART modul má dnes většina mikrořadičů. Jako převodník je použit obvod of FTDI FT232R v úplně základním zapojení. Převodník je podobně jako senzory polohy USB sběrnici i napájen. K řídicímu procesoru jsou vyvedeny pouze vodiče RxD a TxD. Uživatelské výstupy převodníku, například signalizační led diody nejsou použity. Převodník podporuje napětí signálů 3.3V, tedy nejsou potřeba další dodatečné obvody.

### f) Konektor pro připojení mikrořadiče

V úvodu čtvrté kapitoly bylo zmíněno, že na desce ovládacího obvodu není připojen žádný řídicí procesor. Proto byly veškeré potřebné sběrnice, resetovací piny obvodů, výstupy senzorů a napájení vyvedeny na 24-pinový konektor ke kterému uživatel může připojit téměř libovolný řídicí procesor. Konektor je v této podkapitole řádně popsán pro případ že by někdo chtěl vyměnit mnou zvolený mikrořadič a kompletně přepsat, dopsat či vyladit program k dokonalosti. Popisy pinů viz obrázek níže.



24-pinový konektor

1 - USB 5V	13 - enkodér kanál A - B
2 - GND	14 - enkodér kanál A - A
3 - I2C sck	15 - enkodér kanál B - B
4 - I2C sda	16 - enkodér kanál B - A
5 - SPI cs2	17 - GND
6 - SPI cs1	18 - GND
7 - SPI sdio	19 - TxD pro RS232
8 - SPI sck	20 - RxD pro RS232
9 - GND	21 - n.c.
10 - SPI sdo	22 - n.c.
11 - TRIG 2 - DAC2 trigger	23 - SPI DAC2 reset
12 - TRIG 1 - DAC1 trigger	24 - SPI DAC1 reset

Obr. 4.22. 24-pinový konektor

První dva piny slouží k napájení řídicího procesoru. Z těchto pinů není vhodné odebírat vysoké proudy, protože se jedná o napětí poskytované sběrnici USB, které je použito i pro napájení senzorů polohy. V případě vysokého odběru by mohlo dojít k selhání sledování polohy motoru. Piny 3 a 4 jsou piny sběrnice I<sup>2</sup>C, která se v tomto případě používá k nastavení generátoru hodin. K ničemu jinému není přivedena, 'pull-up' rezistory jsou již připojeny na 3.3V. Adresa zařízení je v základu 1100101.

Piny 5, 6, 7, 8 a 10 jsou piny SPI sběrnice a 'Chip Select' piny dvou datových převodníků. Pro spouštění převodníků jsou na pinech 11 a 12 jejich příslušně 'TRIGGERy'. Převodníky musí mít logickou jedničku přivedenou na svoje reset piny. Ty jsou také vyvedené a to na piny 23 a 24. Toto vyvedení umožňuje vymazat všechny

registry datových převodníků najednou. Piny 13 a 14 jsou dva výstupy ze senzoru polohy prvního motoru. Obdobně slouží i piny 15 a 16. Poslední piny 19 a 20 slouží pro sériovou komunikaci s připojeným PC. Senzory polohy mají jako jediné 5V výstupní napětí. Všechny ostatní sběrnice jsou pro 3.3V. Při překročení tohoto napětí dojde k poškození obvodů.

### g) Řídící procesor STM32

Ovládací obvod je řízen vývojovou deskou STM32F4 Discovery. Na desce je mikrořadič STM32F407VG. Jedná se o 32-bitový mikrořadič založený na jádře ARM Cortex M4, vyráběný firmou ST Microelectronics. Frekvence řadiče je 168 MHz. STM32 je celá řada mikrořadičů počínaje příponou F0 a příponou F4 končící. F4 je nejvýše konkrétnější a obsahuje i DSP instrukce. Mikrořadič má spoustu periférií pro komunikaci po různých sběrnících, pro výpočty, časovače, A/D i D/A převodníky, spoustu portů a promyšlený systém přerušení. Mikrořadič je kompletně programovatelný v jazyce C, což umožňuje velice rychlé a jednoduché programování. Součástí vývojové desky Discovery je i programátor/debugger ST-link v2.

Pro řízení ovládacího obvodu potřebujeme pouze několik periférií mikrořadičem nabízených. Pro nastavení generátoru hodin potřebujeme modul pro I<sup>2</sup>C, pro digitální převodníky modul SPI, modul USART pro sériovou komunikaci s počítačem, jednoduché operace s GPIO, a čtyři univerzální časovače pro zpracování signálů ze senzorů polohy. Všechny bloky jsou samozřejmě přítomny.

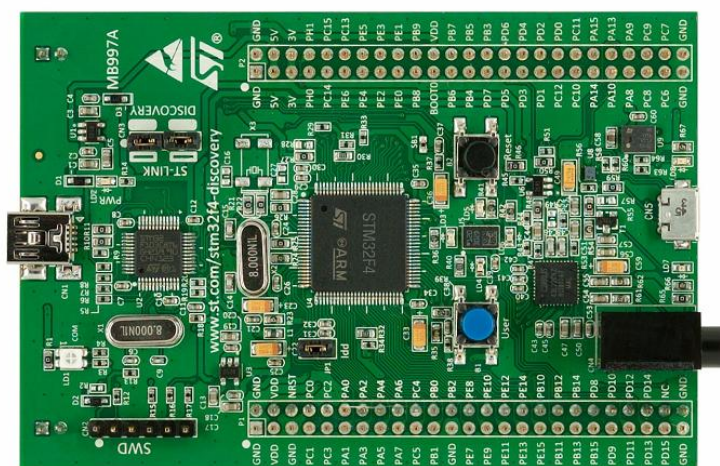
Dalším zjednodušením jsou různé režimy časovačů, které kromě klasických operací jako časování, pwm výstupy či počítadla impulzů mají i režim pro zpracování dat z kvadraturních enkodérů. Tedy zpracování dat z nich nečiní mikrořadiči žádný problém.

Jako složitá by mohla některým připadat možnost nastavení periférií. Každý modul má velký počet registrů pro nastavení a to by se například v dvanácti set stránkové dokumentaci nemuselo hledat jednoduše. Proto společnost ST nabízí ke svým mikrořadičům velmi obsáhlou knihovnu již předpřipravených funkcí a definic pro maximální zjednodušení nastavení periférií a jejich řízení. Níže je ukázka kódu pro nastavení dvou pinů jako sběrnice I<sup>2</sup>C.

```
GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct2);
GPIO_PinAFConfig(GPIOB, GPIO_PinSource6, GPIO_AF_I2C1);
GPIO_PinAFConfig(GPIOB, GPIO_PinSource9, GPIO_AF_I2C1);

I2C_Cmd(I2C2, ENABLE);

I2C_InitStruct.I2C_ClockSpeed = 100000;
I2C_InitStruct.I2C_Mode = I2C_Mode_I2C;
I2C_InitStruct.I2C_DutyCycle = I2C_DutyCycle_2;
I2C_InitStruct.I2C_Ack = I2C_Ack_Enable;
I2C_InitStruct.I2C_OwnAddress1 = 0x00;
I2C_InitStruct.I2C_AcknowledgedAddress = I2C_AcknowledgedAddress_7bit;
```



Obr. 4.23. STM32F4 Discovery [13]

Pro programování řadiče v jazyce C máme na výběr mezi dvěma hlavními skupinami softwaru. ‚Open source‘ a komerční. Open source vývojová prostředí používají většinou GCC kompilátor pro embedded zařízení, komerční mají svoje vlastní kompilátory. Kompilátor si samozřejmě programátor může vybrat svůj vlastní – buď open source nebo třeba nějaký komerční. Z komerčních vývojových prostředí mohou jmenovat například Keil  $\mu$ Vision, Atollic TrueStudio. Také lze použít Microsoft Visual studio, které je pro studenty poskytováno zdarma. V případě open source prostředí moc nezáleží na názvu. Většina těchto prostředí je jenom přejmenované Eclipse.

Pro psaní jsem zkusil Keil  $\mu$ Vision, ale zkušební verze měla některá omezení, tak jsem od Keil upustil. Zvolil jsem si ‚open source‘ vývojové prostředí CoCoX, založené na Eclipse, přehledné a celkem vyladěné prostředí pro moje požadavky plně vyhovující a zdarma.

## h) CoCoX CoIDE

Jako vývojové prostředí pro STM32 mikrořadiče používám CoIDE. CoIDE je pro účely mikrokontrolérů speciálně upravené Eclipse. Již při zakládání projektu je jasné, pro jaké účely bylo toto prostředí stvořeno. Na výběr je ze spousty mikrořadičů od různých firem včetně procesoru, který je umístěn na STM32F4 Discovery. V prostředí jsou dostupné všechny potřebné knihovny periferií. Díky tomu nemusíme knihovny hledat a po založení projektu si jako v dnes snad každém vývojovém prostředí ‚zaškrtneme‘ knihovny, které budeme ve svém projektu využívat. CoIDE nabízí programátorům také ukázky kódu od výrobců nebo různé již napsané programy od přispívajících uživatelů.

Již od začátku jsou v projektu důležité nastavovací soubory, jako například startup.c mikrořadiče, ve kterém jsou základní nastavení řadiče, jmenovitě například nastavení časování. Programátor se tedy může soustředit pouze na jednu věc, a tou je psaní programu, které je v případě STM opravdu rychlé a přehledné. Za to vdčíme hlavně jazyku C, pro který jsou procesory plně optimalizovány. Program lze samozřejmě psát i v assembleru, ale množství instrukcí pro ARM Cortex procesory je docela vysoké. Navíc si dovoluji tvrdit, že výstupem kompilátoru je program lépe

optimalizovaný a rychlejší než od programátora, který není plně seznámen s architekturou řadiče či algoritmy různých výpočtů.

Vývojové prostředí samozřejmě dokáže spolupracovat s programátory mikrořadičů a debuggery, což přináší další možnosti ladění programů, testování a hlavně programování mikrořadičů přímo z vývojového prostředí. Pokud by tato možnost někomu nevyhovovala je samozřejmostí export zkompilovaného programu do .hex či .bin.

### 4.3 Realizace ovládacího obvodu

Po vybrání vhodných obvodů, odsimulování odsimulovatelných bloků ovládacího obvodu a vytvoření funkčního schéma je logickým krokem výroba plošného spoje a jeho osazení. Veškerý počítačový návrh byl vytvořen v programech Orcad Capture a Orcad PCB Editor. Pro návrh plošných spojů lze použít také Orcad Layout, ale ten byl společností Orcad zrušen, a plně nahrazen Allegrem (plnohodnotný PCB Editor). Celý proces probíhá takto: nejprve se musí vytvořit elektrické schéma v Orcad Capture. Schéma se musí vyladit a odstranit z něho veškeré chyby. Po úspěšném provedení těchto kroků lze vygenerovat tzv. Netlist (znáte jistě ze SPICE), pomocí kterého lze schéma exportovat do programu pro návrh plošných spojů – zde Orcad PCB Editor. V PCB Editoru rozložit součástky, což je v případě tohoto ovládacího obvodu něco přes 200. Poté následuje 'routování' vodivých cest, což se dá nazvat bez jakékoliv nadsázky uměním – tedy samozřejmě pokud nepoužijete 'autorouter', což není v tomto případě dobrá volba. Ačkoliv je PCB Editor profesionální produkt, nenaleznete v něm definice tzv. 'footprintů' pro všechny vaše součástky. 'Footprint' je rozložení plošek na které se budou pájet součástky. Tedy nenaleznete žádné použitelné a všechny si musíte vytvořit sami. Po úspěšném návrhu, který projde krokem 'DRC (design rules check)', což je kontrola návrhových pravidel, jako například minimální vzdálenosti vodičů od sebe a podobně, následuje již generování souborů pro výrobce plošných spojů. V případě dvouvrstvé desky výrobce požaduje asi pět souborů pro fotoplotr ve formátu extended gerber, dále jsou vyžadována data pro souřadnicovou vrtačku ve formátu excelon, a zvláště data pro frézované prokovené plošky. Jenom kompletní návrh plošného spoje zabere obrovské množství času.

#### Orcad Capture – návrh schéma

Orcad Capture je profesionální program pro návrh obvodů, kreslení schémat, a v případě propojení se SPICE lze provádět i simulace obvodů. Všechny obrázky konkrétních zapojení v předešlých kapitolách pocházejí z tohoto programu, a také v něm byl odsimulován výstupní zesilovač z kapitoly 4.2. Návrh schématu je prvním krokem k úspěšné realizaci plošného spoje. Úplným základem jsou knihovny se symboly součástek. Také existují simulační knihovny pasivních a aktivních součástek. Tyto knihovny pro návrh plošného vůbec nejsou potřeba, navíc ovládací obvod je jako celek zcela neodsimulovatelný. Knihovny pro spínané zdroje, převodníky a generátory hodin ani neexistují. Jediné co tedy potřebujeme, jsou symboly součástek. Symboly a 'footprinty' složitějších obvodů nabízejí jejich výrobci ke stažení na svých webových stránkách ve formátu .bxl, což je soubor obsahující definice jak symbolů, tak

'footprintů'. Tento soubor lze zpracovat například pomocí programu Ultra Librarian. Ultra Librarian dokáže z .bxl vytvořit definice pro téměř jakýkoliv návrhový program, včetně Capture a PCB Editoru. Tyto soubory lze jednoduše importovat do cílových programů. Pokud nelze sehnat symbol používané součástky, musíme symbol nadefinovat sami.

V Capture lze vygenerovat také seznam 'BOM' – 'Bill of Materials' - v překladu seznam součástek na nákup. Tento seznam se dá použít i při osazování, protože obsahuje čísla součástek a jejich hodnoty současně.

### Orcad PCB Editor / Allegro

Allegro je program potřebný pro návrh plošného spoje. Po importu netlistu součástek a jejich zapojení, jsou součástky uspořádány a elektricky pospojovány. Součástka je v Allegru tvořena pouze svým 'footprintem', bez kterého ji není možné zapojit. Existuje mnoho způsobů jak tyto 'footprinty' získat. Nejlepším způsobem se ukázalo použití programu PCB Library Expert, který je nabízen zdarma a lze v něm vytvořit vlastní 'footprint' jenom dosazením rozměrů z datového listu součástky. Toto je výborné řešení, které ušetří mnoho času. Nabízí ale pouze základní pouzdra, a jiná do programu ani nelze vložit. Program nabízí i export do Allegra, což je výborné.

Také jsou nutné definice minimálních mezer mezi vodivými plochami a minimální šířky vodičů. Tyto hodnoty se definují ze dvou důvodů. Prvním důvodem jsou technologická omezení výrobce. Ten může mít nastaveny požadavky a při jejich překročení se výroba plošného spoje prodraží. Druhým důvodem je proudové zatížení vodiče a minimální vzdálenosti vodičů s určitým napěťovým rozdílem. Čím větší proud, tím širší vodivá cesta. Nejrychleji se dá určit minimální tloušťka vodivé cesty pomocí programu Proudová zatížitelnost. Minimální rozestupy vodičů můžeme zjistit například z tabulky na obrázku 4.24.

<b>Table 6-8 Minimum Conductor Spacing (Mils)</b>				
<b>Voltage between conductors (<math>V_{DC}</math> or <math>V_{P-P}</math>)</b>	<b>Internal traces</b>	<b>External traces</b>		
		<b>Bare</b>	<b>Soldermask only</b>	<b>Conformal coating</b>
0–15	2	4	2	5
16–30	2	4	2	5
31–50	4	24	5	5
51–100	4	24	5	5

Obr. 4.24. Minimální rozestupy vodivých cest[14]

Po celou dobu návrhu nás 'hlídá' 'design rules check' server. Pokud narazí kontrola pravidel na nějaký problém musí (!) být vyřešen. Pokud projde náš návrh bez chyb a jsme s ním spokojeni, můžeme začít generovat data pro výrobce plošných spojů.



### Data pro výrobu

Výrobce plošných spojů požaduje různé soubory. Setkal jsem se s Gerber soubory pro fotoplotr, masku a síťotisk, Excellon daty pro souřadnicovou vrtačku. Desku ovládacího obvodu jsem nechal vyrobit v pražské společnosti PragoBoard s.r.o. V PCB Editoru se data generují v nabídce Artwork. Horní a spodní vrstva je vygenerována automaticky, ale jenom tyto dvě vrstvy nám pro zadání výroby nestačí. Dále je potřeba vytvořit vrstvy nepájivé masky, a to také spodní a vrchní. Další potřebnou vrstvou je vrstva nazývaná 'silkscreen', to je vrstva s popisky součástek. Výrobce také požaduje vrstvu „photoplot outline“, což je vrstva podle které bude plošný spoj oříznut. Všechna tato data byla ve formátu extended gerber. Dalšími požadovanými daty jsou soubory pro souřadnicovou vrtačku. Ty umí editor plošných spojů vytvořit automaticky. V případě vrtaných otvorů je dobré si zjistit jaké vrtáky má souřadnicová vrtačka ve svém zásobníku, a ty v těchto souborech použít. Průměry vrtáků jsou vždy k nalezení na stránkách výrobce plošných spojů. Poslední soubor je požadován pouze pokud se na desce nachází frézované otvory. Opět si zjistíme velikosti fréz. Velikost vybrané frézky napíšeme do textového souboru ve složce Allegra a použijeme volbu NC Route. PCB Editor automaticky vygeneruje data pro frézu. Obrázky jednotlivých vrstev naleznete v příloze B na konci práce.

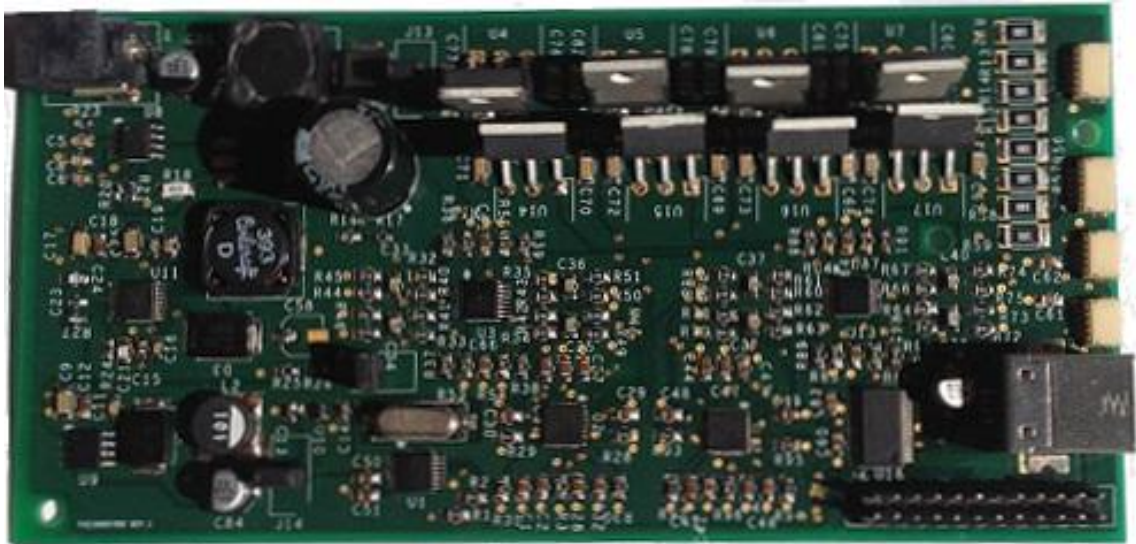
### Osazení plošného spoje

Osazení plošného spoje proběhlo bez větších problémů. Většina 'smd' (součástky pro povrchovou montáž) součástek byla bez problémů zapájena ručně mikropájkou, pouze DA převodníky ve svém pouzdře LFCSP-32, kde jsou vývody umístěny ze spodní strany pouzdra, musely být připájeny horkým vzduchem. Hlavním nedostatkem návrhu byly malé mezery mezi ploškami a zemí u velkých 'smd' součástek, jako jsou cívky a diody. Nastavená mezera šesti milů (jeden mil je tisícina palce), byla docela malá a při ručním pájení docházelo k nechtěnému spojení plošek se zemí. Tato spojení jsou ale snadno odstranitelná.

### Osazený ovládací obvod

Všechny komponenty, které jsou osazené na plošném spoji ovládacího obvodu již byly prodiskutovány v kapitole 4.2. Plošný spoj ovládacího obvodu byl navrhnut v PCB Designeru, součástky zakoupeny, a vše bylo úspěšně osazeno ve školní laboratoři, tedy návrh byl realizován. Zde je foto osazeného ovládacího obvodu (obr. 4.25.). Ovládací obvod je vhodný pouze k řízení lineárních nebo rotačních piezomotorů pracujících na principu 'piezolegs'.



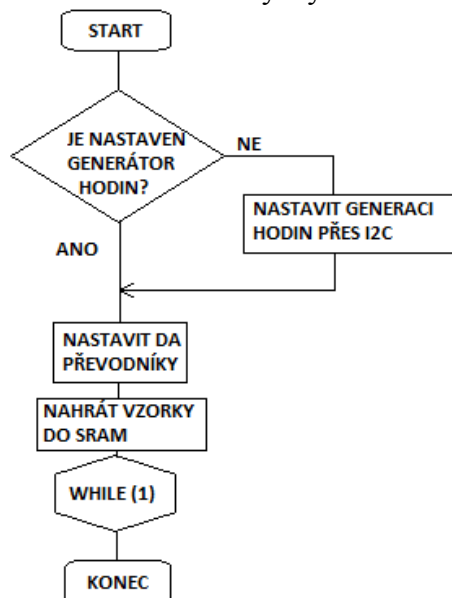


Obr. 4.25. Ovládací obvod 'Piezodriver rev.1'

#### 4.4 Firmware ovládacího obvodu

Firmware tj. program, který bude nahrán do stm32 discovery mikrořadiče, má za úkol pouze několik věcí. Komunikovat s programem běžícím na pc, vypínat a zapínat převodníky, a ukládat hodnoty ze senzorů polohy.

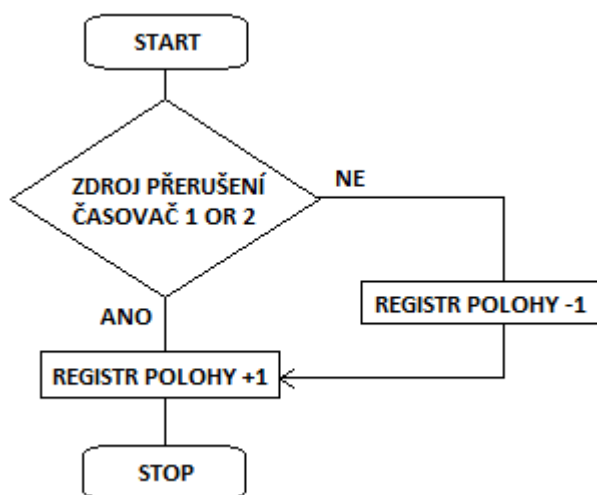
První věcí, která musí být obstarána je nastavení programově nastavitelných obvodů na desce ovládacího obvodu, jako je nastavení generátoru hodin a nastavení obou DA převodníků. Nastavení generátoru hodin se nemusí provádět vždy, protože jeho nastavení je uloženo v EEPROM. V případě DA převodníků se musí nastavit registry zajišťující správné časování, čtení z paměti RAM, počet vygenerovaných cyklů apod. Pro pouhé testování mohou být motory buzeny i sinusovým průběhem, jehož zdrojem není RAM, ale DDS. Poté se musí nahrát do paměti DA převodníků předem připravené vzorky uložené v paměti mikrořadiče. Po obstarání nastavovací rutiny může program přejít do hlavní nekonečné čekací smyčky viz obr. 4.26.



4.26. Hlavní programová smyčka

Z této smyčky může být program vyveden přerušením. Protože ARM Cortex dovoluje nastavení priorit přerušení, nejvyšší prioritu má komunikace s PC, prioritu o bod níže mají časovače, které běží v režimu kvadraturních enkodérů, a ukládají polohu do příslušných registrů. Přerušení lze použít například i pro jeden ze způsobů řízení modulů pro komunikaci po sběrnici SPI a I<sup>2</sup>C. Jedná se o tzv. 'interrupt driven' SPI / I<sup>2</sup>C, což tato aplikace nepožaduje. Další způsob je tzv. 'bit-banging', neboli softwarová komunikace po sběrnici, které se využívá hlavně při absenci komunikačních modulů, což také není náš případ. Zde vystačíme s kontrolováním stavových registrů - tím je zaručeno, že data byla vskutku odeslána, a nemůžeme například posílat data když je zařízení zaneprázdněno ('busy').

Po nastavení periférií ovládacího obvodu se hlavní program nachází v nekonečném cyklu a čeká na přerušení. Zdroje přerušení máme teoreticky pouze dva. Prvním je změna na periférii časovače a druhým zdrojem je komunikace s počítačem přes sériovou linku. Obsluha prvního zdroje – časovačů pracujících v režimu kvadraturních enkodérů je jednoduchá. Pouze zjistíme, ze kterého časovače přerušení pochází, a podle toho buď inkrementujeme příslušné počítadlo polohy nebo naopak snižujeme jeho hodnotu o 1. Je více způsobů ošetření tohoto problému. Diagram na obrázku 4.27. předpokládá, že přerušení pochází z dvojice časovačů pracujících v příslušném režimu.

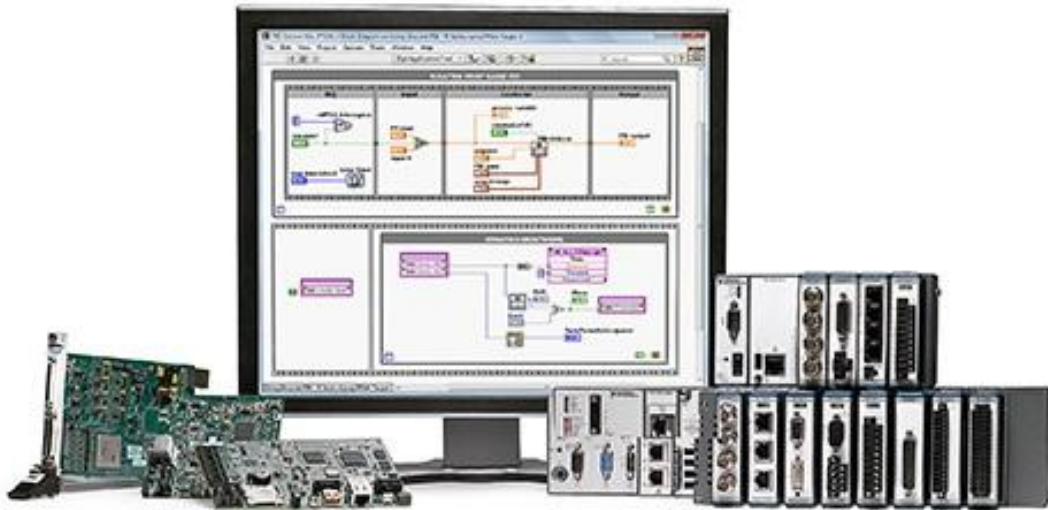


Obr. 4.27. Obsluha senzorů polohy

Obsluha druhého přerušení pocházejícího z USART modulu je již složitější. Z dočasné paměti ('bufferu') se vyčte přijatá instrukce a zpracuje. Kam bude program dále směřovat je rozhodnuto ve větvičce struktuře 'switch / case'. Každá instrukce má svůj vlastní podprogram, který instrukci obsluhuje. Jedná se například o instrukce nastavení frekvence, vyčtení počítadel polohy, příkaz pro posunutí motoru o určitý počet kroků (viz tabulka 4.1). Instrukce, které nějakou hodnotu po sériové lince zasílají zpět, jsou většinou jednoduché, a pouze pošlou stav nějakého registru. Ale například instrukce pro změnu frekvence motoru již musí vypočítat konstanty pro DA převodníky, a převodníkům pozměnit spoustu registrů, případně je i podtaktovat pro dosažení velmi malých frekvencí.

## 4.5 LabView

K ovládání piezomotorů slouží virtuální přístroj vytvořený v programu LabView. Program LabView od společnosti National Instruments slouží k rychlému a jednoduchému naprogramování tzv. virtuálního přístroje. Virtuální přístroj může komunikovat s externími převodníky, měřicími přístroji, nastavovat je, číst data a zpracovávat je. National Instruments nabízí spoustu měřících karet a rozhraní pro komunikaci po průmyslových sběrnících jako je Ethernet, Profibus, CAN. Pro nastavování zařízení lze zakoupit karty pro GPIB, sériovou linku a podobně.



Obr. 4.28. LabView a měřící karty [20]

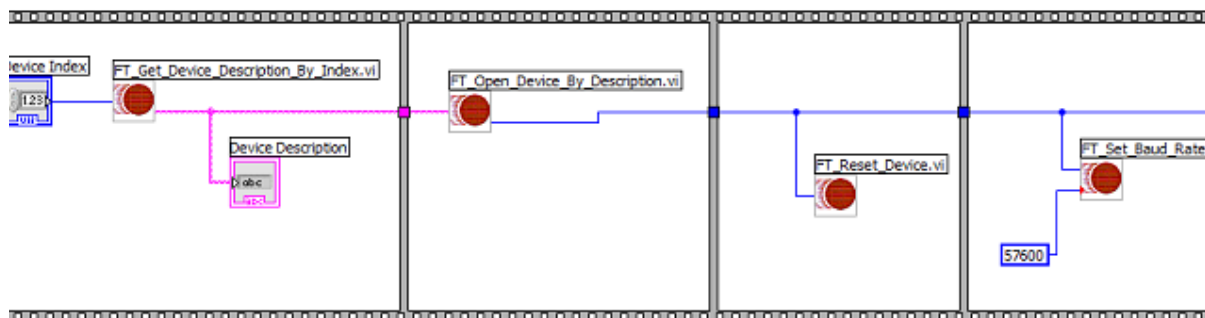
Programování virtuálního přístroje probíhá kompletně za pomoci grafického programování, jazyk se nazývá „G“. Programátor má k dispozici různé struktury, do kterých se umísťují bloky provádějící jednoduché funkce jako součty, převody jednotek. Struktury mohou provádět opakování dalších vnořených struktur (cykly). Struktura vypadá jako filmový pás viz obr. 4.28. Program probíhá zleva doprava. LabView se dá asi přirovnat k Simulinku, který je součástí Matlabu. Psaní programu v „G“ je jednoduché a virtuální přístroj zvládne napsat úplně každý.

### Program pro řízení ovládacího obvodu

Program, který jsem napsal v LabView počítá s připojením ovládacího obvodu přes USB na RS-232 převodník. Pro komunikaci s převodníkem jsou výrobcem převodníku (FTDI) přímo poskytovány knihovny. Tento způsob komunikace se při testování osvědčil a ukázalo se, že je mnohem spolehlivější než komunikace přímo s emulovaným sériovým portem. Pro komunikaci s emulovaným COM portem navíc musí být nainstalován balík VISA, jehož instalace při použití knihoven od FTDI odpadá.

Pomocí komunikační knihovny je napsán komunikační blok, který po spuštění programu nastaví parametry sériového přenosu. Jedná se hlavně o 'baud rate', stop bity a kontrolu parity. Dále je tento blok používán pouze k zasílání a přijímání příkazů pro ovládací obvod. Tabulka původních příkazů viz tab. 4.1.

Na obrázku 4.29. se nachází ukázka komunikačního bloku. Tento blok je postaven tak, aby si uživatel mohl vybrat, se kterým ovládacím obvodem bude pracovat. Po výběru obvodu je zařízení restartováno, nastavena rychlost, parita a další vlastnosti sériového protokolu. Dalším prvkem, který již není na obrázku, je prvek zprostředkovávající odeslání instrukcí. Za každou instrukci komunikační blok automaticky přidá znak odřádkování '<cr>'. Poté čeká na odpověď, kterou pokud nějaká přišla, nabídne na svém výstupu.

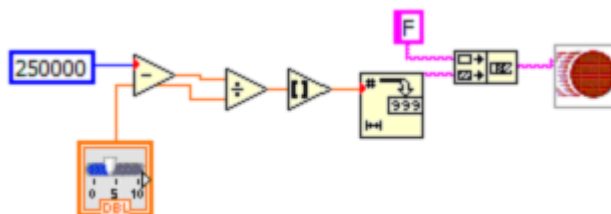


Obr. 4.29. Ukázka komunikačního bloku

Tab. 4.1 Instrukce ovládacího obvodu

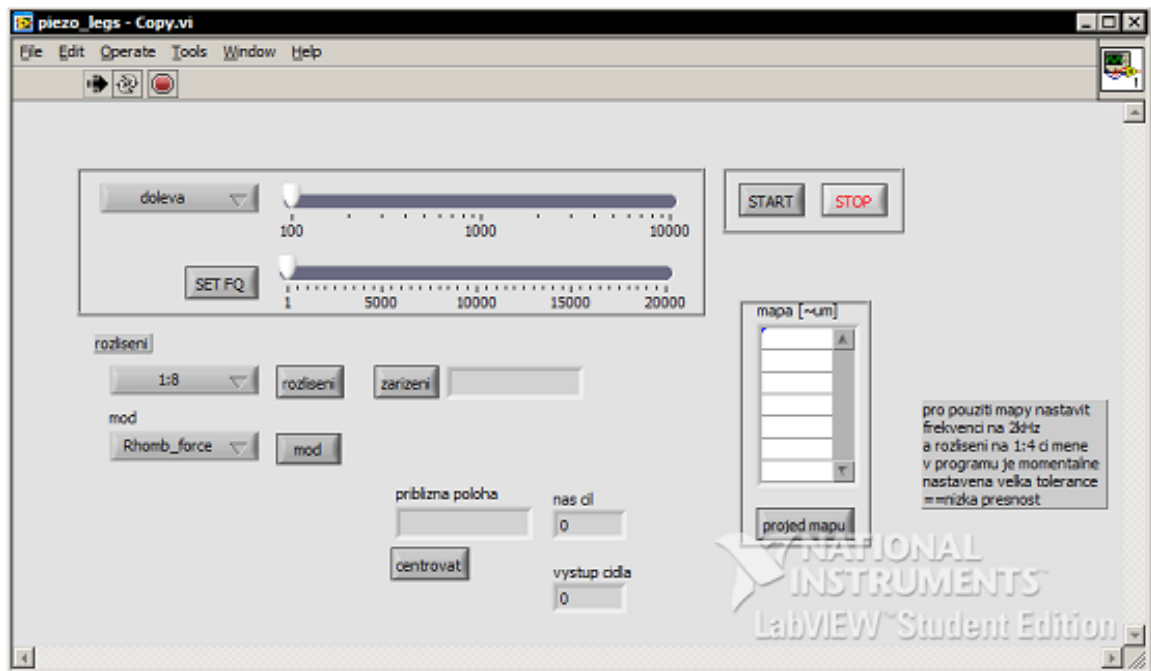
instrukce	popis
?	vrátí informace o driveru
O<číslo>	nastaví hodnotu pozice polohového senzoru
E	vrátí hodnotu polohy, hodnota je integer 32bit
M< číslo >	nastaví typ signálu fáze motoru – rychlost, síla,..
m	vrátí nastavení typu signálu
R< číslo >	nastavuje rozlišení krokování 1:8 až 1:1
r	vrátí hodnotu nastavení rozlišení
F< číslo >	nastavení frekvence $f=250 \text{ kHz} \cdot (1+\text{číslo})$
+< číslo >	posun o zadaný počet kroků v kladném směru
-< číslo >	posun o zadaný počet kroků v záporném směru
S	stop
Z	hodnota počítadla kroků
z< číslo >	nastavení počítadla kroků
W	zapamatování nastavení
*	status motoru

Díky tomuto komunikačnímu bloku je tedy zasílání příkazů ovládacímu obvodu velice jednoduché. Jediným úkolem pro programátora je tedy například vyčtení čísla z textového pole, zkontrolování podmínek a následné spojení řetězce vstupních dat s instrukcí ovládacího obvodu. O odeslání celého příkazu se již postará komunikační blok. Například na obrázku 4.30 je znázorněno nastavení frekvence piezomotoru.



Obr. 4.30. LabView nastavení frekvence

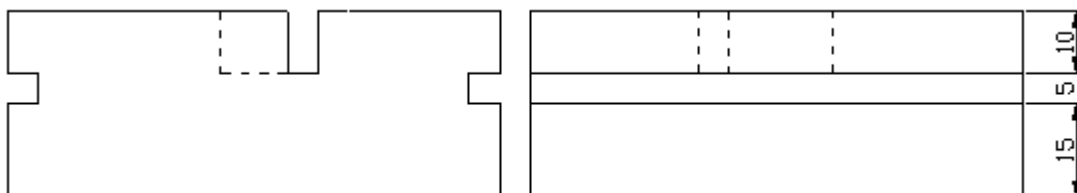
Frekvence se v programu nastavuje pomocí slideru. Blok vypočítá číslo, které má být zasláno driveru, přidá před číslo písmeno F a odešle. Stejně jednoduše probíhá veškeré nastavování driveru. Vý sledné okno programu vypadá takto:



Obr. 4.31. Virtuální přístroj pro ovládání piezomotoru

## 4.6 Návrh mechanické konstrukce

Návrh je velice jednoduchý, a vytvořen s ohledem na jednoduchou výrobu pomocí CNC frézy. Konstrukce je tvořena ze třech hlavních dílů. Podstavce a dvou pohyblivých částí. Pohyblivé části tvoří osy x a y pro posuvný stolek. V podstavci a horní pohyblivé části je vyfrézováno místo pro uložení samotných piezomotorů. V každé pohyblivé části je vyfrézován žlábek, do kterého je vsazena tyčka piezomotoru, která pohybuje celou částí. Žlábek je také dostatečně široký, aby umožňoval volný pohyb ložiskového domku piezomotoru. Ve vrchní části jsou závity pro uchycení obráběného či popisovaného materiálu. Systém je navrhnut bez ložisek, a lyžiny zajišťující pohyb v příslušných osách, jsou pouze namazány olejem. Ukázka spodní části stolku se nachází na obrázku 4.32. Jednotlivé rozkreslené části se nacházejí níže v příloze C, ve které jsou díly prozatím zakresleny bez jakékoliv vůle. Ta se odvíjí od použitého mazacího oleje a před případnou realizací bude doplněna.



Obr. 4.32 Část návrhu mechanické konstrukce polohovacího stolku

## 5. Závěr

V úvodu práce byl popsán piezoelektrický jev, na kterém je založen princip všech piezomotorů. Na obrázcích bylo znázorněno, jakým způsobem je dosahováno jeho lineárního pohybu a také jak získat co nejvyšší nanometrové rozlišení motoru.

Další kapitola se zaměřila na výběr vhodného senzoru pro měření velmi malých lineárních posunutí. Byly popsány některé kapacitní, indukční a magnetické senzory. Jako nejvhodnější se ukázaly enkodéry pracující na magnetickém a optickém principu. Rozlišení těchto senzorů plně dostačuje pro požadavky polohování souřadnicového stolku.

Následuje popis všech bloků navrhovaného ovládacího obvodu. Popsány jsou bloky spínaných zdrojů, generace hodinového taktu, datové převodníky, výstupní výkonové zesilovače a také použitá deska s řídicím mikrořadičem ARM. U všech integrovaných obvodů je uvedeno schéma výsledného zapojení v ovládacím obvodu. Celé schéma je k nahlédnutí v příloze A. Analogové části ovládacího obvodu byly simulovány v programu Orcad Capture, kde byla ověřena správnost návrhu a jejich celkového napěťového zesílení. Výsledky simulací jsou umístěny jako obrázky v příslušných kapitolách.

Schéma celého ovládacího obvodu bylo zkontrolováno a zapojení bylo exportováno do editoru plošných spojů, ve kterém byl navrhnut dvouvrstvý plošný spoj. Editorem byl program PCB Editor, a na to, že to bylo moje první setkání s tímto softwarem, myslím že jsem v něm odvedl velmi dobrou práci. Součástky na plošném spoji jsou uspořádány do bloků a srovnány do opticky úhledného celku. Po návrhu plošného spoje byla vygenerována data pro výrobce plošných spojů a plošný spoj profesionálně vyroben. Ovládací obvod jsem po vyrobení plošného spoje a zakoupení součástek sám osadil. Přestože je téměř celý obvod složen ze součástek pro povrchovou montáž (SMT), nečinilo mi pájení žádný problém.

Výsledný ovládací obvod umožňuje řízení dvou samostatných piezomotorů (druhý motor a senzor jsem neměl k dispozici) a snímání jejich polohy pomocí magnetických senzorů polohy s maximálním rozlišením 61 nm. Veškeré parametry datových převodníků a generátoru hodinového taktu lze programově měnit a tím maximálně vyladit schopnosti tohoto ovládacího obvodu. Hlavní program ovládacího obvodu lze kdykoliv přeprogramovat, řídicí mikrořadič lze dokonce vyměnit za jiný. Díky dokumentaci komunikačního konektoru a všech použitých obvodů, může program ladit kdokoliv. Celkový řídicí program je teprve vytvářen, a jeho hlavní části jsou postupně doplňovány a testovány. Hlavní smyčky tohoto programu jsou znázorněny a popsány v kapitole 4. Ovládací obvod komunikuje s počítačem přes sběrnici USB 2.0, a na straně počítače pracuje virtuální přístroj napsaný v programu LabView, který celý obvod řídí jednoduchými příkazy.

Pro dva piezomotory byla také navržena jednoduchá bezložisková konstrukce souřadnicového polohovacího stolku, do kterého lze vložit dva piezomotory Piezo Legs Linear 6N a jejich senzory polohy.



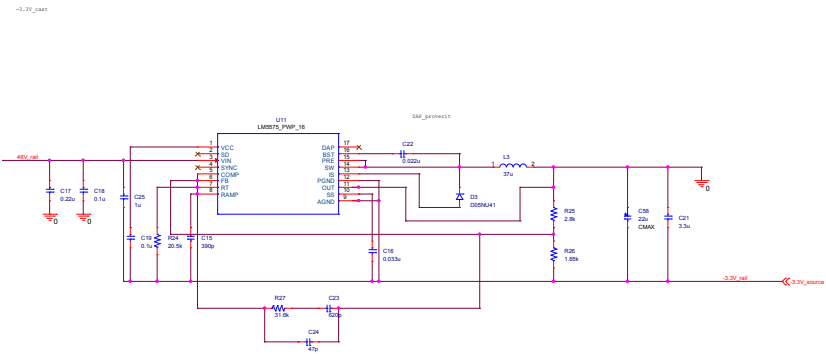
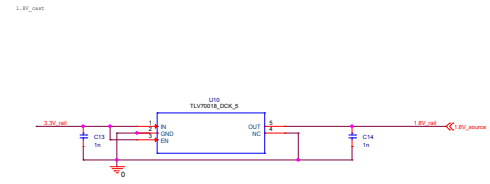
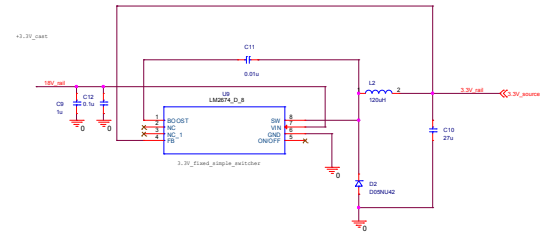
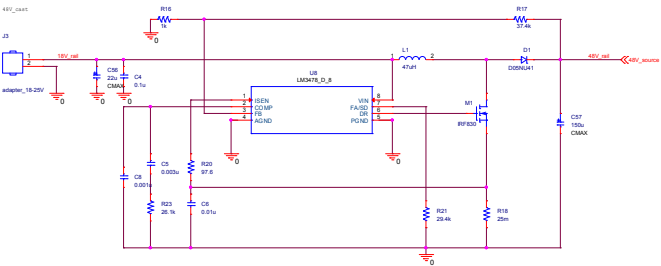
## 6. Použité zdroje

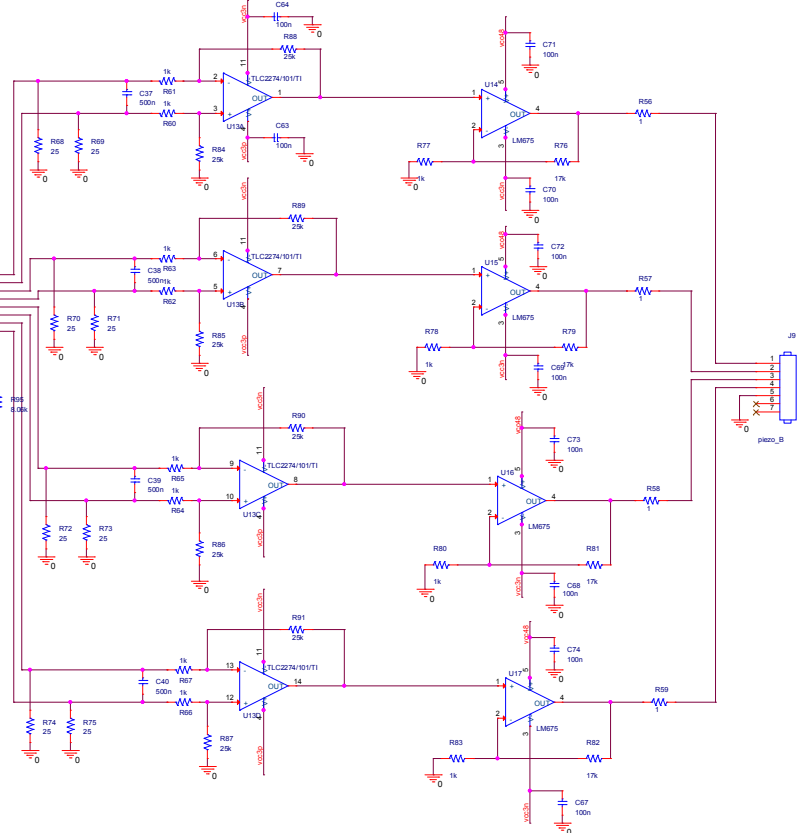
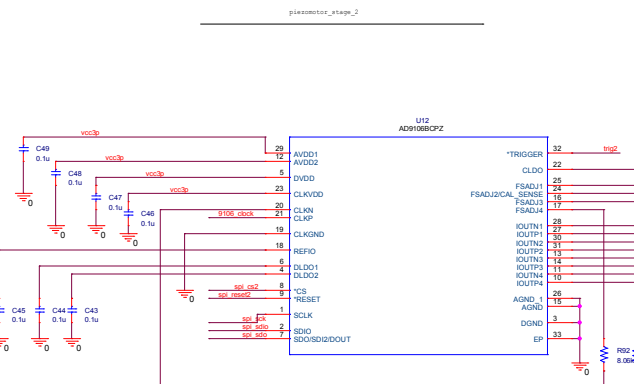
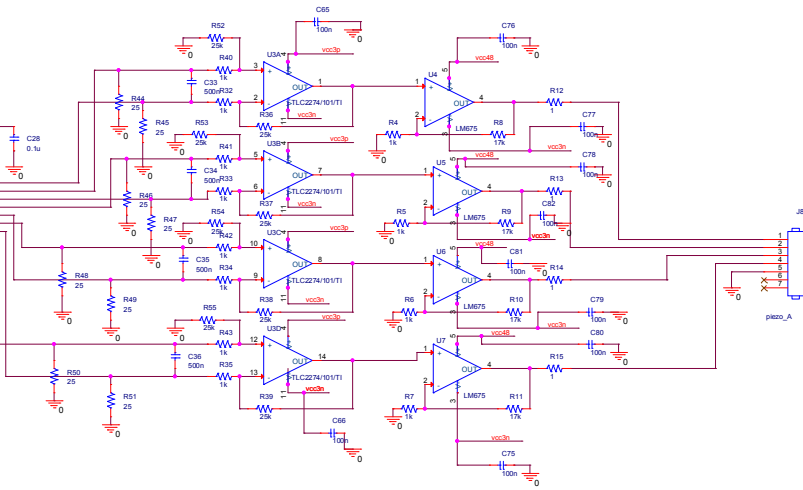
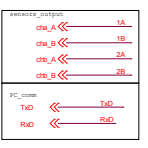
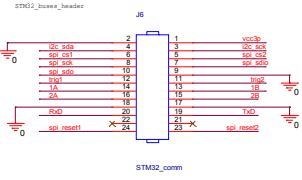
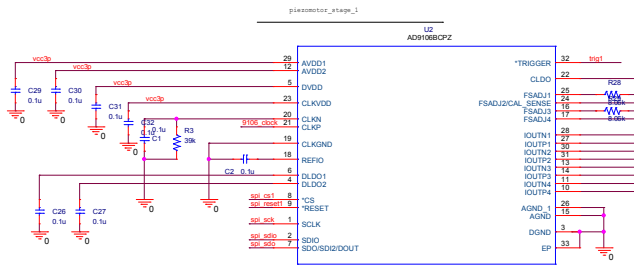
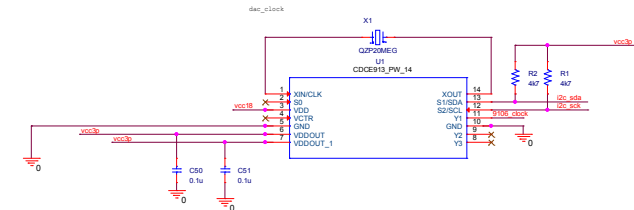
- [1] FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, 2010, xv, 663 s. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [2] Positional sensors [online]. [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: [http://www.electronicstutorials.ws/io/io\\_2.html](http://www.electronicstutorials.ws/io/io_2.html)
- [3] Piezomotor Uppsala AB, Piezolegs Linear datasheet [online] Dostupné z: [http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150010\\_LL10.pdf](http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150010_LL10.pdf)
- [4] Piezomotor technology. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.piezomotor.com/technology/>
- [5] PMD101:datasheet.[online].[cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150080\\_PMD101.pdf](http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150080_PMD101.pdf)
- [6] TMCM-090: Datasheet. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.trinamic.com/products/modules/driver-piezo/tmcm-090>
- [7] JOHANSSON, Stefan, Mats BEXELL a Oskar LITHELL. PIEZOMOTOR UPPSALA AB, Uppsala (SE). FINE WALKING ACTUATOR [patent]. United States Patent, US 6 337 532 B1. Uděleno 8.1.2002. Dostupné z: <http://google.com/patents/>
- [8] Lm3478: datasheet. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3478.pdf>
- [9] Switching regulators, Texas Instruments, [online] <http://www.ti.com/lit/an/snva559/snva559.pdf>
- [10] Cdce913: datasheet. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cdce913.pdf>
- [11] AD9106: Datasheet. In: [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9106.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9106.pdf)
- [12] KESTER, Walt. DAC Interface Fundamentals. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-019.pdf>
- [13] UM1472 User manual: Discovery kit for STM32f407/417 lines. In: [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/DM00039084.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf)
- [14] MITZNER, Kraig. Complete PCB design using OrCAD capture and PCB editor: physics, designs, and applications. 4th ed. Amsterdam: Newnes, 2009, xv, 471 s. electrical engineering/circuit design. ISBN 978-0-7506-8971-7
- [16] BAXTER, Larry K. *Capacitive sensors: design and applications*. New York: IEEE Press, c1997, xiv, 302 p. ISBN 07-803-1130-2.
- [17] Selection Guide: Capacitive Nanometrology Position Sensors. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://www.physikinstrumente.com/en/products/capacitive\\_sensor/nanometrology\\_sensor\\_selection.php](http://www.physikinstrumente.com/en/products/capacitive_sensor/nanometrology_sensor_selection.php)
- [18] HONEYWELL. Hall effect sensing and application. [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://sensing.honeywell.com/index.php?ci\\_id=47847](http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847)
- [19] A designer's guide to encoders. [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en-US/articles/techzone/2012/apr/a-designers-guide-to-encoders>
- [20] National Instruments. [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://czech.ni.com/>
- [21] MACRO SENSORS. *LVDT Position Sensors* [online]. [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.macrosensors.com/>
- [22] Nanos Instruments GmbH: kleinster linearer Encoder. [online]. [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: [http://www.nanos-instruments.de/nanosweb/render.php?sess\\_pid=130](http://www.nanos-instruments.de/nanosweb/render.php?sess_pid=130)

## **7. Přílohy**

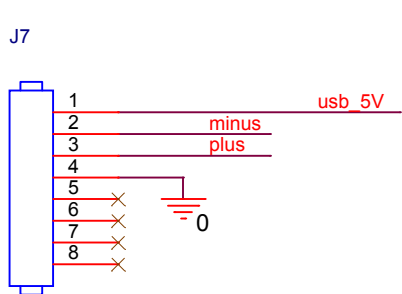
### **Příloha A – Kompletní schéma**



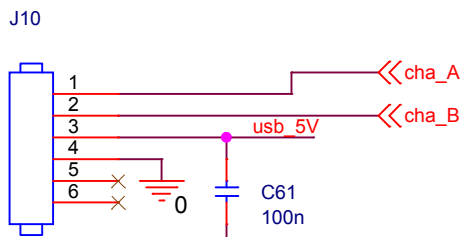
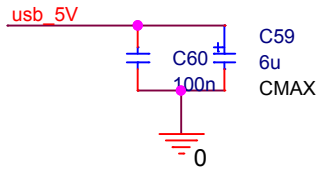




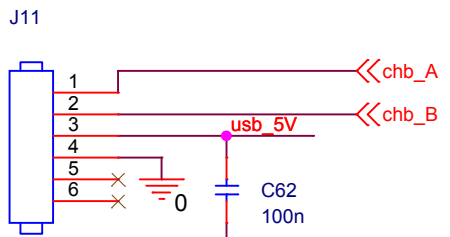
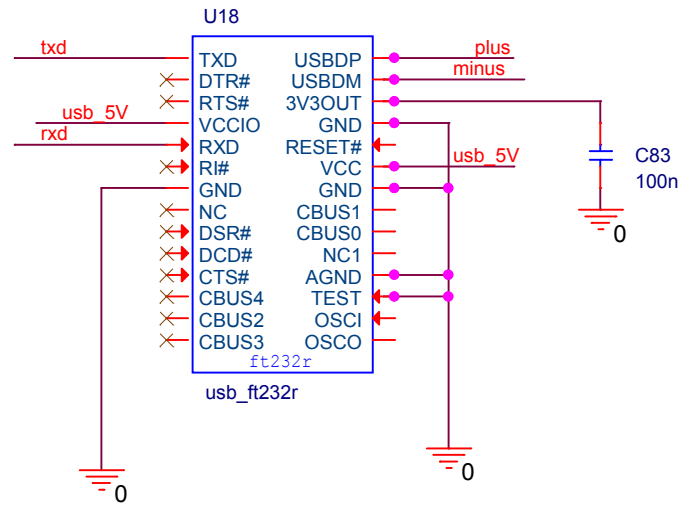




usb\_b



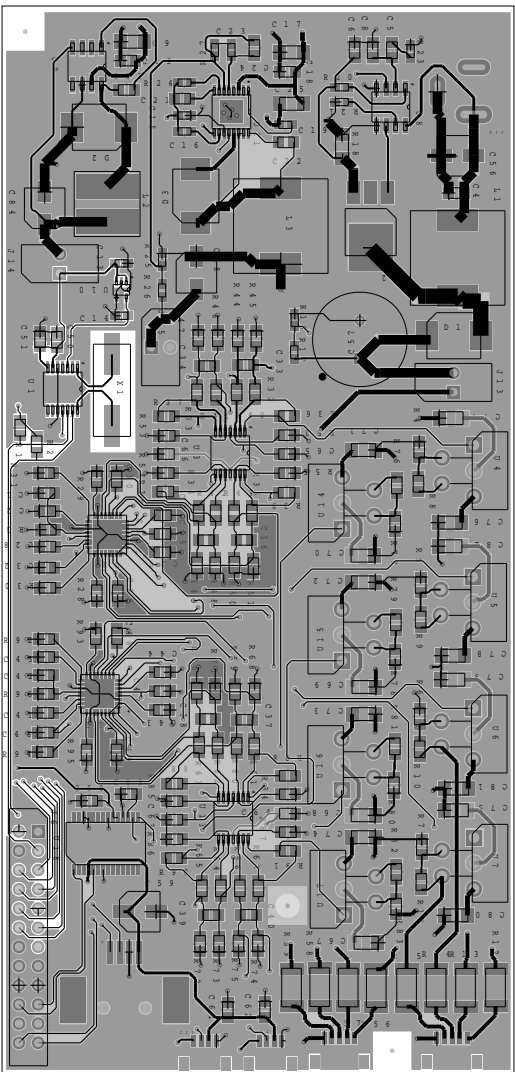
encoder\_A

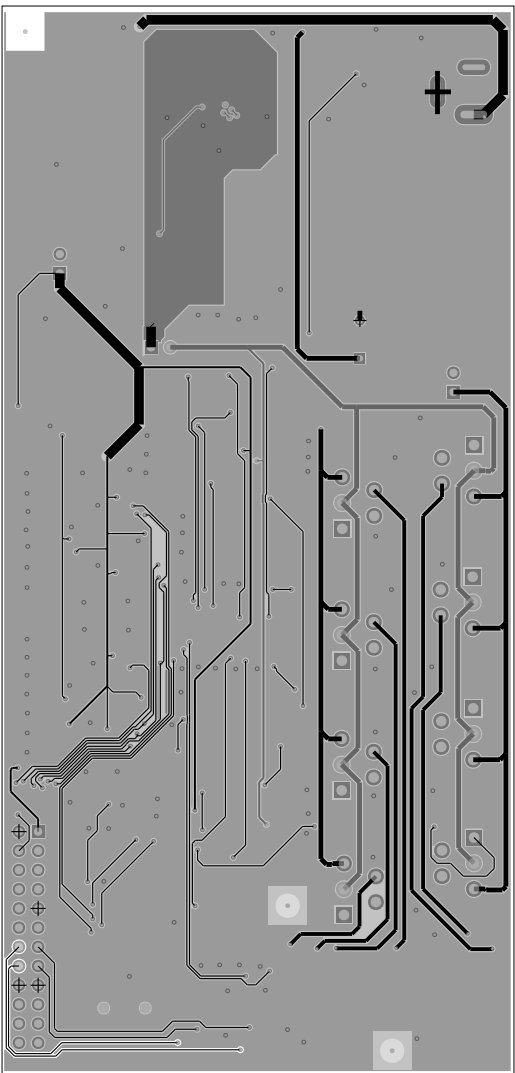


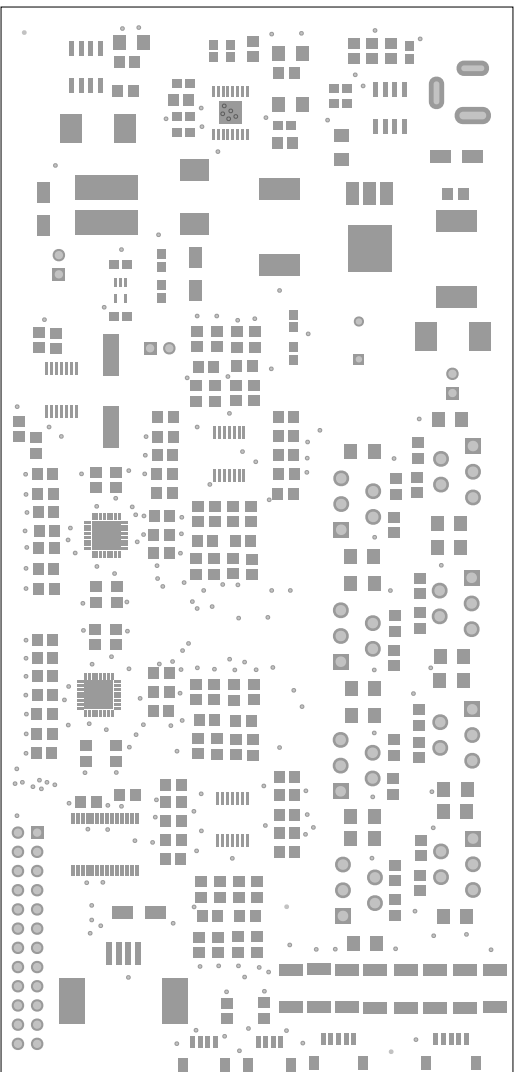
encoder\_B

Title		
sensors_and_rs232		
Size	Document Number	Rev
A	3	1
Date:	Tuesday, February 11, 2014	Sheet 1 of 1

## **Příloha B – Plošný spoj**

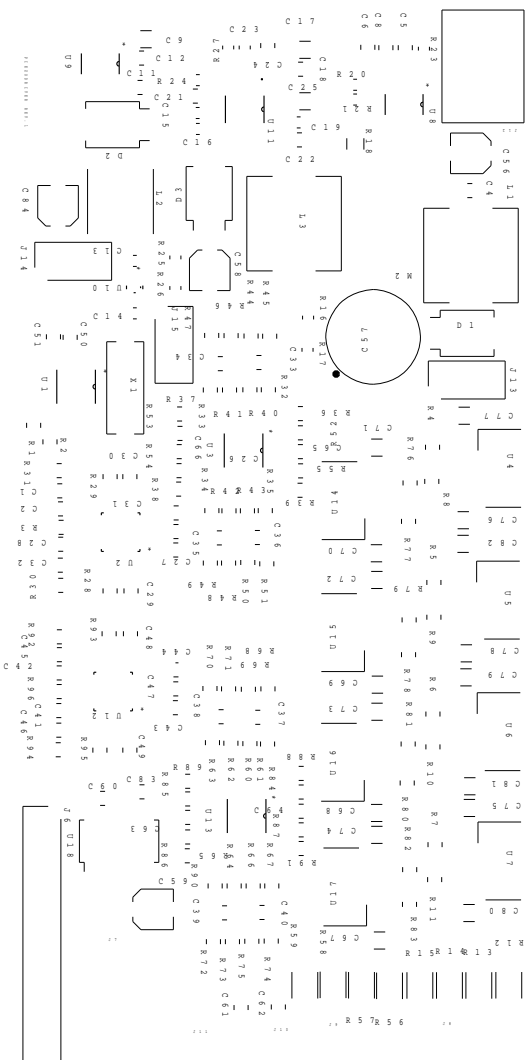












## Příloha C – Nárvh konstrukce polohovacího stolku

