



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OVLADAČ TŘÍOSÉHO NANOMETRICKÉHO MANIPULÁTORU

CONTROLLER OF THREE-AXIS NANO-METRIC MANIPULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Pernica

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Lukáš Pernica

ID: 162734

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Ovladač tříosého nanometrického manipulátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy a použitím krokových motorů, piezoelektrických pohonů a tenzometrických snímačů. Prostudujte technickou dokumentaci zadaného manipulátoru. Na základě zjištěných parametrů proveďte návrh řešení ovladače, který bude umožňovat tříosé řízení manipulátoru s možností nastavení hrubého posuvu krokovými motory, jemného posuvu piezoelektrickými pohony s využitím tenzometrických snímačů a připojení k řídicímu obvodu nebo počítači. Vyberte vhodné komponenty pro realizaci a proveďte obvodový návrh celého ovladače.

Realizujte ovladač manipulátoru dle návrhu provedeného v semestrálním projektu. Navrhněte a implementujte softwarové rozhraní pro řízení ovladače z řídicího obvodu nebo počítače. Ověřte funkčnost ovladače ve spojení s manipulátorem. Stanovte přesnost a opakovatelnost nastavení polohy manipulátorem ve všech osách a výsledky porovnejte s údaji výrobce. Výsledky porovnání diskutujte a případně navrhněte možnosti vylepšení řešení ovladače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MAX300 Series, NanoMax 3-Axis Flexure Stage - User Guide. [online]. 2017 [cit.2017-09-06]. Dostupné z: www.thorlabs.de/_sd.cfm?fileName=10997-D02.pdf&partNumber=MAX341

[2] SEGEL, J. E. Piezoelectric Actuators. New York: Nova Science Pub Inc, 2011, 144 s. ISBN 978-1-613-24-81-3.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá popisem piezoelektrického jevu a jeho využití pro polohování s nanometrovou přesností v laboratorním využití. V práci je vysvětlen přímý a nepřímý piezoelektrický jev, různé druhy piezoelektrických aktuátorů a způsoby jejich ovládání se zaměřením na eliminaci jejich hystereze. Cílem je návrh ovladače pro piezoaktuátory v tříosém nanometrickém manipulátoru Thorlabs MAX341/M.

Klíčová slova

Piezoelektrický jev, piezoaktuátor, vysokonapěťový zesilovač, synchronní detekce, PID regulátor, Arduino

Abstract

This master's thesis describes the piezoelectric phenomenon and its use for positioning with nanometric precision in laboratory use. In the thesis is description of direct and indirect piezoelectric phenomenon, various types of piezoelectric actuators and ways of their control with the aim of eliminating their hysteresis. The goal is to design a controller for piezo actuator built in the three-axis nanometric manipulator Thorlabs MAX341/M.

Keywords

Piezoelectricity, piezoactuator, high voltage amplifier, synchronous detection, PID controller, Arduino

Bibliografická citace:

PERNICA, Lukáš. *Ovladač tříosého nanometrického manipulátoru*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118454>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Petr Drexler.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Ovladač tříosého nanometrického manipulátoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **16. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Drexlerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **16. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	16
1. Manipulátor MAX341/M	17
2. Krokový motor	19
2.1 Krokový motor s variabilní reluktancí (VR).....	19
2.2 Krokový motor s permanentními magnety (PM).....	19
2.3 Hybridní krokový motor	20
3. Piezoelektrický jev	21
3.1 Dělení piezoelektrického jevu.....	22
3.2 Piezoelektrické aktuátory	24
3.2.1 Ohybový aktuátor	24
3.2.2 Příčný aktuátor	24
3.2.3 Podélný aktuátor	25
3.2.4 Stříhový aktuátor.....	26
3.3 Piezoelektrické motory	26
4. Tenzometrický snímač.....	27
5. Řízení piezoelektrických aktuátorů	28
5.1 Stolní přístrojové ovladače	28
5.2 Moduly.....	28
5.3 Integrované obvody	29
6. Měření charakteristik piezoaktuátorů	30
7. Struktura ovladače	33
7.1 Zdroj řídicího signálu.....	34
7.2 Napájení aktuátoru	34
7.3 Zpracování zpětnovazebního signálu.....	34
7.4 PID regulátor.....	36
7.5 PSD regulátor.....	37
7.6 Nastavení konstant PSD regulátoru	38
8. Obvodový návrh	39
8.1 Větev napájení aktuátoru	39
8.2 Zpětnovazební větev	40
8.3 Napájení	42

9.	Konstrukční návrh	44
10.	Softwarová část	48
10.1	Software pro řízení ovladače z počítače	48
10.2	Software pro mikroprocesorovou platformu.....	49
11.	Postup zprovoznění ovladače	52
12.	Ověření funkce ovladače.....	54
	Závěr.....	61
	Literatura	62
	Přílohy	65

Seznam symbolů

A	...	Ampér
A	...	Zesílení
C	...	Kapacita
D	...	Vektor elektrické indukce
d_{jk}^c	...	Piezoelektrický koeficient
d_{im}^d	...	Piezoelektrický koeficient
E	...	Vektor elektrického pole
e	...	Vstupní signál do regulátoru
ϵ_{ij}^σ	...	Dielektrická permitivita
F	...	Farad
F	...	Síla
h	...	Tloušťka vrstvy
Hz	...	Hertz
k_{krit}	...	Kritické zesílení regulátoru
k_p	...	Zesílení regulátoru
l	...	Délka
L	...	Indukčnost
m	...	Metr
N	...	Počet
n	...	Počet vrstev
R	...	Odpor
r_D	...	Váha derivační složky
r_I	...	Váha integrační složky
r_P	...	Váha proporcionální složky
S_{km}^E	...	Poddajnost
t	...	Čas
T_D	...	Derivační časová konstanta regulátoru
T_I	...	Integrační časová konstanta regulátoru
T_{krit}	...	Perioda kritického kmitání
U	...	Napětí

u	...	Výsledný výstupní signál z regulátoru
u_D	...	Výstupní signál z derivační části regulátoru
u_I	...	Výstupní signál z integrační části regulátoru
u_P	...	Výstupní signál z proporcionální části regulátoru
V	...	Volt
ΔL_{bend}	...	Zdvih při ohybu
ΔL_{long}	...	Změna délky aktuátoru v příčném směru
ΔL_{shear}	...	Střih aktuátoru
ΔL_{trans}	...	Změna délky aktuátoru v podélném směru
Δx	...	Vzdálenost interferenčních maxim/minim
λ	...	Vlnová délka
σ_m	...	Mechanické napětí
Ω	...	Ohm

Seznam zkratek

A/D	...	Analogově-digitální
BNC	...	Bayonet Neill Concelman konektor
D/A	...	Digitálně-analogový
DNA	...	Deoxyribonukleová kyselina
DPS	...	Deska plošných spojů
D-Sub	...	D-Subminiature konektor
GND	...	Uzemnění
I ² C	...	I-squared-C, dvou vodičová sběrnice
LEMO	...	Léon Mouttet konektor
OEM	...	Original Equipment Manufacturer
PID	...	Proporcionální, integrační a derivační regulátor
Pk-Pk	...	Peak-to-peak, špička-špička
PM	...	Permanentní magnety
PSD	...	Proporcionální, sumační a derivační regulátor
PZT	...	Olovo-zirkonát-titanát
SMC	...	SubMiniature version C konektor
SMD	...	Surface Mounted Device
USB	...	Universal Serial Bus
VR	...	Variabilní reluktance

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Šroub, mikrometr a krokový motor [1]	17
Obr. 1.2: Manipulátor MAX341/M [1].....	17
Obr. 1.3: Platforma PY003 pro náklon a rotaci [17]	18
Obr. 2.1: Krokový motor VR [5]	19
Obr. 2.2: Krokový motor PM [5].....	19
Obr. 2.3: Hybridní krokový motor [5]	20
Obr. 3.1: Hystereze piezoelektrického aktuátoru.....	21
Obr. 3.2: Náhradní schéma piezoelektrického materiálu [7]	22
Obr. 3.3: Příčný, stříhový a podélný piezoelektrický jev [6].....	22
Obr. 3.4: Přímý piezoelektrický jev [6]	23
Obr. 3.5: Nepřímý piezoelektrický jev [6].....	23
Obr. 3.6: Ohybový piezoaktuátor [10].....	24
Obr. 3.7: Příčný piezoaktuátor d_{33} [10].....	25
Obr. 3.8: Podélný piezoaktuátor d_{31} [10]	25
Obr. 3.9: Stříhový piezoaktuátor d_{15} [10]	26
Obr. 4.1: Zapojení tenzometrického můstku manipulátoru MAX341/M [11].....	27
Obr. 4.2: Piezoaktuátor Thorlabs s vývody tenzometrického můstku [12]	27
Obr. 5.1: Ovladač BPC-303 [13]	28
Obr. 5.2: Ovladač PD32 [14]	28
Obr. 5.3: Modul TI DRV2700EVM [15].....	29
Obr. 5.4: Modul Piezomaster [16]	29
Obr. 6.1: Piny na LEMO konektoru pro zpětnou vazbu [1]	30
Obr. 6.2: Piny na D-Sub konektoru pro zpětnou vazbu [11]	30
Obr. 6.3: Laboratorní pracoviště pro měření charakteristik aktuátorů.....	31
Obr. 7.1: Blokové schéma navrhovaného ovladače.....	33
Obr. 7.2: Princip synchronní detekce a usměrnění [21]	35
Obr. 7.3: PID regulátor	36
Obr. 8.1: Zapojení vysokonapětového zesilovače OPA454.....	40
Obr. 8.2: Užití obvodu AD630 pro detekci signálu AC můstku.....	41
Obr. 8.3: Schéma napájecího obvodu	43

Obr. 9.1: Konstrukční návrh vrchní a spodní strany DPS ovladače, 1:1	45
Obr. 9.2: Osazená vrchní a spodní strana DPS ovladače.....	45
Obr. 9.3: Konstrukční návrh vrchní a spodní strany napájecí DPS, 1:1	46
Obr. 9.4: Osazovací plán napájecí DPS	46
Obr. 10.1: Grafické rozhraní ovladače piezoaktuátoru.....	49
Obr. 11.1: Zkušební zapojení s potenciometrem a odporovým děličem	53
Obr. 12.1: Program pro měření	54
Obr. 12.2: Pracoviště pro nepřímé měření	54
Obr. 12.3: Schéma Michelsonova interferometru.....	57
Obr. 12.4: Měřicí pracoviště s Michelsonovým interferometrem	58
Obr. 12.5: Detail Michelsonova interferometru	58

Seznam tabulek

Tab. 7.1 Parametry manipulátoru MAX341/M.....	34
Tab. P1.1 Měření napětí zpětnovazebního signálu bez použití PSD regulátoru zvýšování napětí na aktuátoru.....	66
Tab. P1.2 Měření napětí zpětnovazebního signálu bez použití PSD regulátoru snižování napětí na aktuátoru	66
Tab. P2.1 Měření skutečného napětí na aktuátoru s použitím PSD regulátoru zvýšování požadované hodnoty regulátoru.....	67
Tab. P2.2 Měření skutečného napětí na aktuátoru s použitím PSD regulátoru snižování požadované hodnoty regulátoru.....	67
Tab. P3.1 Měření napětí zpětnovazebního signálu s použitím PSD regulátoru zvýšování požadované hodnoty regulátoru.....	68
Tab. P3.2 Měření napětí zpětnovazebního signálu s použitím PSD regulátoru snižování požadované hodnoty regulátoru.....	68
Tab. P4.1 Měření délky posuvu interferometrem – krok 10 nm.....	69
Tab. P4.2 Měření délky posuvu interferometrem – krok 100 nm.....	69

Seznam Grafů

Graf 6.1 Závislost výstupního napětí tenzometrického můstku na napětí na piezoaktuátoru – osa X	32
Graf 6.2 Závislost výstupního napětí tenzometrického můstku na napětí na piezoaktuátoru – osa Y	32
Graf 6.3 Závislost výstupního napětí tenzometrického můstku na napětí na piezoaktuátoru – osa Z	32
Graf 7.1 Posuv fáze signálu při průchodu vestavěným zesilovačem.....	35
Graf 10.1 Průběhy změny napětí na piezoaktuátoru	51
Graf 12.1 Závislost skutečného napětí na piezoaktuátoru na nastavení požadované hodnoty – osa X	55
Graf 12.2 Závislost skutečného napětí na piezoaktuátoru na nastavení požadované hodnoty – osa Y	55
Graf 12.3 Závislost skutečného napětí na piezoaktuátoru na nastavení požadované hodnoty – osa Z.....	55
Graf 12.4 Závislost demodulovaného napětí tenzometrického můstku na nastavení požadované hodnoty – osa X	56
Graf 12.5 Závislost demodulovaného napětí tenzometrického můstku na nastavení požadované hodnoty – osa Y	56
Graf 12.6 Závislost demodulovaného napětí tenzometrického můstku na nastavení požadované hodnoty – osa Z.....	56
Graf 12.7 Závislost napětí fotodiody na hodnotě posuvu – krok 10 nm.....	60
Graf 12.8 Závislost napětí fotodiody na hodnotě posuvu – krok 100 nm.....	60

Úvod

V současné vědecké, technické i průmyslové praxi existuje potřeba přesného prostorového polohování a přemísťování předmětů s mikrometrovým a submikrometrovým rozlišením. Jedná se o manipulaci se vzorky určenými pro charakterizaci, měření, obrábění nebo pro jejich zobrazování. Pro manipulování s objekty s vysokým rozlišením je možno využít několik způsobů. Ty se navzájem liší svým základním principem, parametry či složitostí jejich realizace v závislosti na druhu použití. Vlastní provádění manipulace lze rozdělit na pohyb rotační a translační. Nejčastěji se užívá manipulace translačním pohybem, obvykle ve dvou až třech osách. Jako nadstavbu je možné přidat i pohyb rotační, kdy dochází k natáčení podle osy. Takto mohou vzniknout až šestiosé systémy, ve kterých je prováděn současně translační posun i rotace podle tří os.

Zařízení provádějící polohování se obecně nazývají manipulátory. Technická zařízení, která jsou využívána pro pohon manipulátorů, jsou často označována jako aktuátory. V případě rotačního pohybu je možno je označit jako rotátory. Aktuátorem mohou být například hydraulické a pneumatické systémy, elektromechanické posuvy s lineárními nebo rotačními elektromotory či čistě mechanické posuvy pomocí klasických či mikrometrických šroubů. Pro přesné polohování s přesností v řádu mikrometrů se hodí krokové motory, pro nanometrickou přesnost se v dnešní době hojně využívá piezoelektrických aktuátorů.

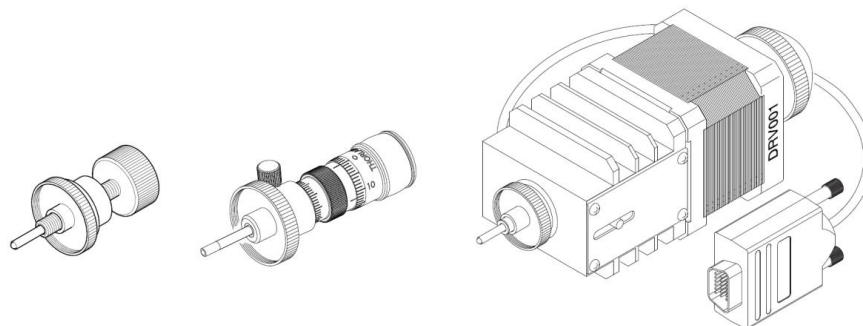
Jejich princip stojí na inverzním piezoelektrickém jevu, tedy procesu, kdy se po přiložení napětí na piezoelektrický materiál tento deformuje. Tím je převedena elektrická energie na energii mechanickou, což umožňuje provedení velice přesného posunu. Tyto aktuátory jsou využívány v širokém spektru aplikací ve výzkumných laboratořích, medicíně i strojním průmyslu.

Cílem této diplomové práce je návrh ovladače pro vestavěné piezoaktuátory tříosého nanometrického manipulátoru MAX341/M z produkce firmy Thorlabs. Tento manipulátor umožňuje hrubý posuv ve třech osách pomocí krokových motorů v rozsahu 4 mm a pro jemný posuv do 20 μm je ve všech osách osazen piezoaktuátory. Ovládání piezoaktuátorů je poslední chybějící částí k plnému využití všech schopností manipulátoru, neboť ovládání krokových motorů již bylo vytvořeno dříve.

Úkolem ovladače piezoaktuátorů je přesné nastavení polohy pomocí přiloženého vysokého napětí a kompenzace hystereze piezoelektrického materiálu. Bez toho by totiž nebylo možné dosáhnout požadované přesnosti. Pro kompenzaci je důležité znát aktuální stav aktuátoru. Proto je na aktuátoru umístěn tenzometr, který při změně roztažení aktuátoru mění svůj odpor. Ten je měřen a vzniká tak signál, který informuje o aktuální poloze aktuátoru.

1. MANIPULÁTOR MAX341/M

Série manipulátorů MAX300 firmy Thorlabs umožňuje posuv ve třech osách až s nanometrovou přesností. Tyto manipulátory jsou vhodné pro zarovnání optických vláken, vlnovodů a pro další laboratorní aplikace s nutností přesného polohování. Hrubý posuv je umožněn v závislosti na verzi manipulátoru manuálně klasickým šroubem či mikrometrem, případně elektricky pomocí krokového motoru (Obr. 1.1). Pro každou osu je třeba vlastního pohonu.



Obr. 1.1 Šroub, mikrometr a krokový motor [1]

Dále jsou k dispozici verze manipulátoru bez nebo s piezoaktuátory. Verze s aktuátory jsou dostupné se zpětnou vazbou, nebo bez. Verze manipulátoru MAX341/M (Obr. 1.2) má pro hrubý posuv použity krokové motory a obsahuje piezoaktuátory s možností zavedení zpětné vazby. Dle dokumentace výrobce je možné pomocí krokových motorů dosáhnout posuvu o délce 4 mm s přesností jednoho kroku 0,06 μm . Aktuátory jsou schopny zajistit posuv 20 μm s teoretickým rozlišením 5 nm.

Aktuátory jsou k ovladači připojeny pomocí koaxiálních SMC konektorů. Pro zavedení jsou osazeny tenzometrickými snímači, díky nimž je možné sledovat rozpínání aktuátoru a korigovat jej pomocí zpětné vazby. Zpětnovazební obvod je připojen přes sedmipinový LEMO konektor. V manipulátoru je již vestavěn zesilovač pro zpracování signálu z tenzometrického můstku.



Obr. 1.2 Manipulátor MAX341/M [1]

Pro manipulátor je dostupná celá řada příslušenství, které je možné upevnit k vrchní desce manipulátoru. Tato vrchní deska se v případě potřeby dá rozšířit pomocí adaptérů a různých nástavců, což umožňuje rozšířené možnosti pro doplnění příslušenství. Pro přesné zaměřování optického paprsku je možné použít celou řadu specializovaných držáků pro laserové diody a optická vlákna, které se připevňují na vrchní desku manipulátoru.

Pro rozšíření možností polohování jsou k dispozici platformy umožňující rotaci a náklon podél dvou os (Obr. 1.3), čímž je možné rozšířit základní tříosou manipulaci až na šestiosou. Tedy vedle základního posuvného pohybu v osách X, Y a Z pomocí krokových motorů a aktuátorů manipulátoru lze provádět také náklon podle os X a Y a rotaci podle osy Z pomocí mikrometrických šroubů. Další možností je také připevnění držáku pro podložní sklíčka s preparáty pro přesný pohyb pod mikroskopem.



Obr. 1.3 Platforma PY003 pro náklon a rotaci [17]

Základna manipulátoru je opatřena otvory pro šrouby, což umožňuje pevné přichycení ke stolní desce, případně ke zvýšeným základnám. Její tvar bez přesahů (na stranách, kde nejsou umístěny ovládací prvky) umožňuje blízké umístění dvou manipulátorů nebo jiného vybavení. Tím je umožněno sestavení kompletního laboratorního pracoviště i s dalšími komponenty. Obvykle se pro umístění užívá specializovaných pracovních desek opatřených otvory se závity.

2. KROKOVÝ MOTOR

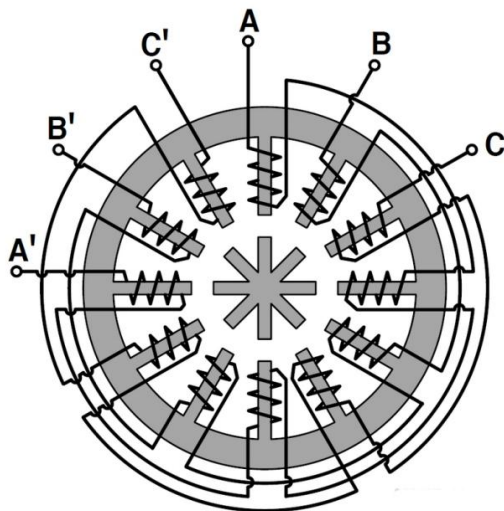
Krokový motor je točivý stroj, který umožňuje přesné nastavení polohy a současně je schopný tuto polohu udržet. Skládá se ze statoru a rotoru. Stator tvoří cívky, kterými prochází proud. Přepínáním cívek pomocí impulsů se vytvoří rotující magnetické pole, které otáčí rotorem. Ten je tvořen feromagnetickými materiály, permanentními magnety, případně jejich kombinací. Krokový motor by se tedy dal nazvat digitálním motorem. Výhodou krokových motorů je, že z principu jejich funkce není třeba zpětná vazba pro zjištění polohy, stačí počítat impulzy pro krokování. Existuje několik typů provedení krokového motoru.

2.1 Krokový motor s variabilní reluktancí (VR)

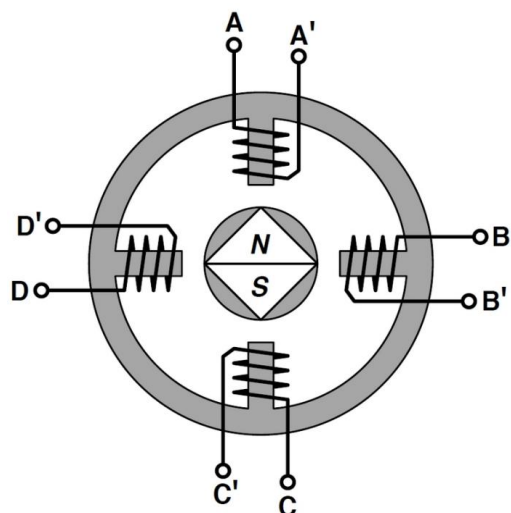
Stator motoru má několik dvojic pólů tvořených svazkem ocelových plechů. Rotor je tvořen vystouplými zuby z magneticky měkkého materiálu (např. měkké železo) buď ve formě jednoho kusu materiálu, či také svazkem plechů, podobně jako stator. Zuby rotoru a póly statoru jsou stejně široké a odděluje je vzduchová mezera. Proud je připojen vždy na jednu dvojici pólů, čímž se vytvoří magnetické pole. Tím se rotor natočí tak, aby kladl nejmenší magnetický odpor. Odtud také vychází název tohoto typu motoru krokového, reluktance – magnetický odpor. Motor je znázorněn na obrázku 2.1.

2.2 Krokový motor s permanentními magnety (PM)

Na rozdíl od předchozího typu motoru, jehož rotor byl vytvořen pouze z magneticky měkkého materiálu, u tohoto je rotor tvořen, jak již název napovídá, permanentními magnety. Ty jsou použity místo zubů statoru VR motoru a vzájemně se střídá severní a jižní pól. Díky použití magnetů má tento motor lepší momentovou charakteristiku. Obvyklé úhly kroku jsou mezi $7,5^\circ$ a 15° [5]. Motor je znázorněn na obrázku 2.2.



Obr. 2.1 Krokový motor VR [5]

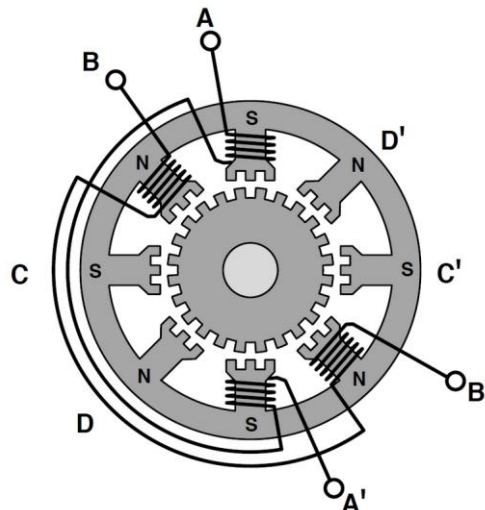


Obr. 2.2 Krokový motor PM [5]

2.3 Hybridní krokový motor

Jedná se o kombinaci předchozích dvou typů. Stator je tvořen pólovými nástavci, jako v případě VR motoru. Na pólech je navinutá cívka a za cívkou je každý pól rozdělen na několik zubů. Rotor je tvořen zuby z magneticky měkkého materiálu, pod kterými jsou uloženy permanentní magnety. Ty jsou umístěny tak, že každý zub má jinou magnetickou polaritu. Motor je znázorněn na obrázku 2.3.

Pokud žádným vinutím neprochází proud, rotor je aretován magnetickým tokem permanentního magnetu v určité poloze. Při tzv. dvoufázovém buzení jsou do jedné fáze zapojeny cívky A, C A' a C' (fáze AC) a do druhé fáze cívky B, D, B' a D' (fáze BD). V případě aktuálního napájení fáze AB se provede krok přepnutím napájení na fázi BD. Směr kroku závisí na polaritě přepnutého napájení. Pro postupné otáčení krokového motoru se střídá fáze AC a BD vždy s každým krokem, a po dvou krocích polarita (AC+, BD-, AC-, BD+, AC+, BD-,...) [2]. Nastávají tedy čtyři různé stavy napájení cívek, odtud název čtyřtaktní buzení.



Obr. 2.3 Hybridní krokový motor [5]

Hybridní krokový motor je v současné době nejpoužívanějším typem z výše uvedených. Tento typ totiž kombinuje výhody VR motoru (malá velikost kroku v řádu desetin až jednotek stupňů) a PM motoru (lepší aretace vlivem permanentních magnetů). Velikost jednoho kroku bývá obvykle $1,8^\circ$, to znamená 200 kroků na jednu otáčku. Pomocí tzv. mikrokrokování je možné každý krok ještě rozdělit. To je provedeno tak, že se nejprve vybudí jedna fáze. Tím se zub rotoru nastaví k pólu vybuděného první fázi, jak bylo popsáno výše. Následně na to se vybudí i druhá fáze, čímž se zub rotoru nastaví mezi vybuděné póly. Poté se přestane budit první fáze, čímž se zub rotoru nastaví k pólu vybuděného druhou fázi. Pokud bude výměna buzení fází provedena plynule, je možné vytvořit více mikrokroků.

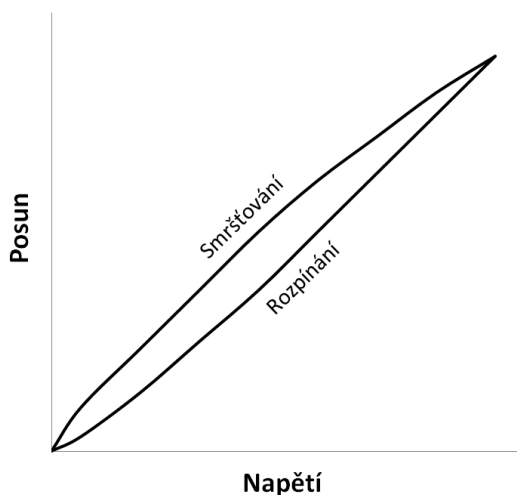
Právě motory tohoto typu provádí hrubý posuv manipulátoru MAX341/M. Jedná se o dvoufázově buzené hybridní krokové motory s 50 póly a úhlem jednoho kroku $1,8^\circ$. Dle dokumentace je možné jednu otáčku rozdělit do 409600 mikrokroků, tedy 2048 mikrokroků na jeden krok. Při jednom mikrokroku se motor natočí přibližně o $0,00089^\circ$.

3. PIEZOELEKTRICKÝ JEV

Princip posuvu pomocí piezoaktuátorů má základ v piezoelektrickém jevu. Ten je známý už z dávných dob starověké Indie, kdy se v medicíně používaly tlakem ohřívané krystaly turmalínu, jež byly přikládány na bolestivá místa na těle. V 19. Století se touto problematikou zabývali bratři Pierre a Jacques Curieovi a roce 1880 jej podrobně popsali.

Mezi piezoelektrické materiály patří biologické látky (kosti, DNA, některé proteiny), středově nesymetrické krystaly (např. Křišťál, Turmalín, Seignettova sůl), nebo speciální feroelektrická keramika (např. olovo-zirkonát-titanát - PZT). Právě na této speciální keramice dnes stojí většina produkce piezoelektrických systémů [7].

Piezoelektrická keramika zpočátku nemá piezoelektrické vlastnosti. Při výrobě je nutné materiál polarizovat stejnosměrným napětím v řádu kV za teploty kolem 100 °C. Dochází k prvotní piezoelektrické polarizaci a následně materiálu zůstává remanentní polarizace. Tu si piezoelektrický materiál zachovává i nadále. Díky této skutečnosti má hysterezi a při zvyšování přiloženého napětí se chová jinak, než při snižování, což je znázorněno na obrázku 3.1. Tato piezoelektrická polarizace se dá přirovnat k magnetizaci, ke které dochází u feromagnetických materiálů.

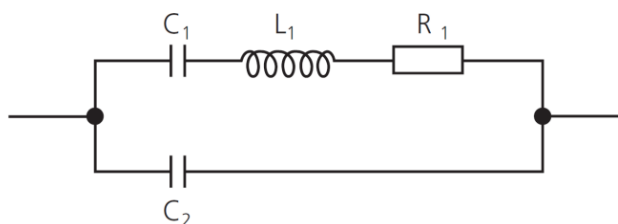


Obr. 3.1 Hystereze piezoelektrického aktuátoru

Tuto polarizaci může materiál ztratit, a to vysokou teplotou, velkou intenzitou elektrického pole působícího proti směru původní polarizace nebo mechanickým přetížením. Piezoelektrický materiál by se neměl v provozu zahrát na více než polovinu tzv. Curieho teploty. To je teplota, kdy daný materiál ztrácí své piezoelektrické vlastnosti z důvodu narušení vnitřního uspořádání elementárních nábojů. Aby nedošlo ke ztrátě polarizace elektrickým polem, nesmí být materiál vystaven většímu napětí, než jaké udává výrobce. Stejně tak se nesmí mechanicky namáhat více, než je uvedeno. Pro různé druhy použití existuje více druhů keramiky, které se od sebe liší například hodnotou

Curieho teploty, odolností vůči silnému elektrickému poli, hodnotou maximálního mechanického zatížení či dielektrickými vlastnostmi. V praxi není možné se této hystereze zbavit, neboť se ztrátou hystereze se ztrácí i piezoelektrické vlastnosti. Proto je nutné ji v případě požadavku na linearitu systému kompenzovat.

Piezoelektrický materiál je dielektrikum a v určitých vlastnostech je podobný klasickým keramickým kondenzátorům. Na obrázku 3.2 je znázorněno náhradní schéma piezoelektrického materiálu.

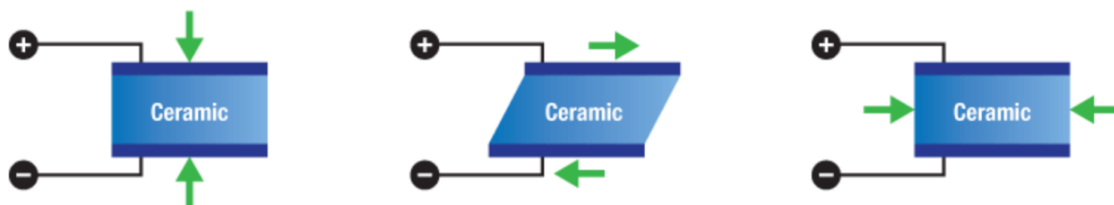


Obr 3.2 Náhradní schéma piezoelektrického materiálu [7]

Kapacitor C_1 představuje poddajnost materiálu a C_2 dielektrickou kapacitu. Pod indukčností L_1 se skrývá inertní hmota materiálu a rezistorem R_1 jsou udány vnitřní ztráty. Piezomateriál se tedy chová jako rezonanční obvod. S tímto je nutné počítat v případě, kdy je piezomateriál užit ve vysokofrekvenčních obvodech, například pro generování ultrazvukových vln či aktuátor pro potlačení mechanických vibrací. Při užití piezomateriálu jako aktuátoru pro přesné polohování, a tedy napájení stejnosměrným napětím, se však frekvenční závislost neprojeví.

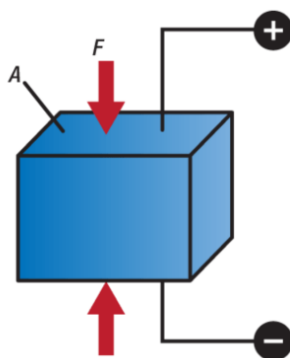
3.1 Dělení piezoelektrického jevu

Existují tři módy piezoelektrického jevu. Podle směru polarizace materiálu vzhledem ke směru deformace rozlišujeme příčný (mód d_{33}), stříhový (mód d_{15}) a podélný (mód d_{31}). Tyto módy jsou znázorněny na obrázku 3.3.



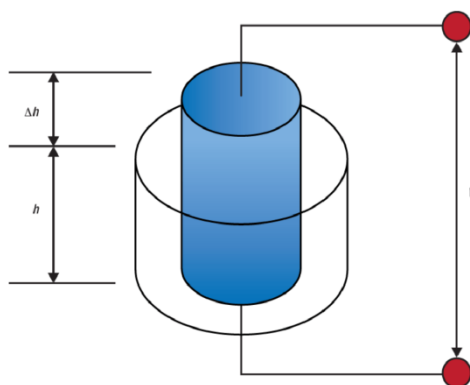
Obr. 3.3 Příčný, stříhový a podélný piezoelektrický jev [6]

Piezoelektrický jev se dělí na přímý a nepřímý. *Přímý piezoelektrický jev* nastává tehdy, když je materiál stlačován vnější silou (Obr. 3.4). V klidovém stavu se nachází těžiště záporných a kladných iontů ve stejném místě a materiál je tedy elektricky neutrální. Deformací se tato těžiště od sebe vzdálí, vzniká tím elektrická polarizace materiálu a na jeho plochách se objeví elektrický náboj. Polarita tohoto náboje je závislá na tom, zda se materiál stlačuje, nebo roztahuje.



Obr. 3.4 Přímý piezoelektrický jev [6]

Nepřímý piezoelektrický děj je recipročným opakem přímého. V tomto případě se na piezoelektrický materiál přiloží napětí, čímž se vzdaluje těžiště kladných a záporných iontů. To má vliv na deformaci materiálu a vzniká tak mechanický pohyb (Obr 3.5). Polarita přiloženého napětí má vliv na to, zda se bude materiál smršťovat, nebo roztahovat.



Obr. 3.5 Nepřímý piezoelektrický jev [6]

Piezoelektrický jev se dá popsat rovnicemi 3.1 a 3.2 dle Hookova zákona popisujícího pružnou deformaci materiálů působením síly dle vztahů [6]:

$$D_i = e_{ij}^{\sigma} E_j + d_{im}^d \sigma_m \quad (3.1)$$

a

$$\varepsilon_k = d_{jk}^c E_j + s_{km}^E \sigma_m \quad (3.2)$$

kde D je vektor elektrické indukce, ε je vektor prodloužení, E je vektor elektrického pole, σ_m je mechanické napětí, e_{ij}^{σ} je dielektrická permitivita d_{im}^d a d_{jk}^c jsou piezoelektrické koeficienty a s_{km}^E je poddajnost [6].

3.2 Piezoelektrické aktuátory

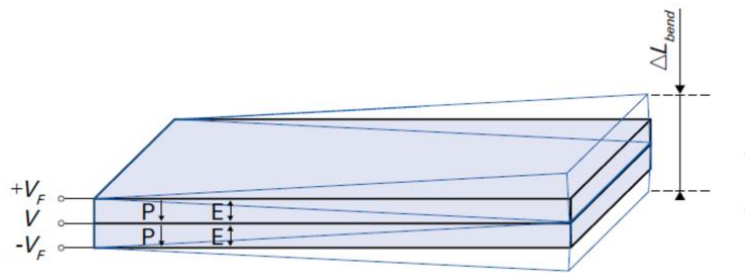
Na principu nepřímého piezoelektrického jevu pracují piezoelektrické aktuátory. Skládají se z jednoho kusu piezoelektrického materiálu, případně mohou být vícevrstvé. Jejich provedení může být různé.

3.2.1 Ohybový aktuátor

Princip ohybového aktuátoru je možné přirovnat k bimetalovému pásku. Jedná se o piezoelektrický materiál podélně spojený s piezoelektricky neaktivním materiálem, případně dvě vrstvy piezoelektrického materiálu napájené opačným napětím. Využívá se podélného módu d_{31} . Důsledkem rozpínání piezomateriálu pak dochází k ohybu celé dvojdílné struktury. Tento typ aktuátoru se využívá ve formě membrány například u lékařských mikropump. Pro ohybový aktuátor platí vztah [10]:

$$\Delta L_{\text{bend}} = \frac{3}{8} n d_{31} \frac{l^2}{h^2} U \quad (3.3)$$

kde ΔL_{bend} je zdvih při ohybu, n je počet vrstev, d_{31} je piezoelektrický koeficient, l je délka aktuátoru, h tloušťka vrstvy a U napětí přiložené na elektrody. Ohybový aktuátor je znázorněn na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Ohybový piezoaktuátor [10]

3.2.2 Příčný aktuátor

Jedná se o jedno či vícevrstvou strukturu sestávající pouze z piezoelektrického materiálu. Tento typ může být ve formě monolitického, nebo mnohvrstvého sloupce. Využívá příčného módu d_{33} . Pro prodloužení aktuátoru platí vztah [10]:

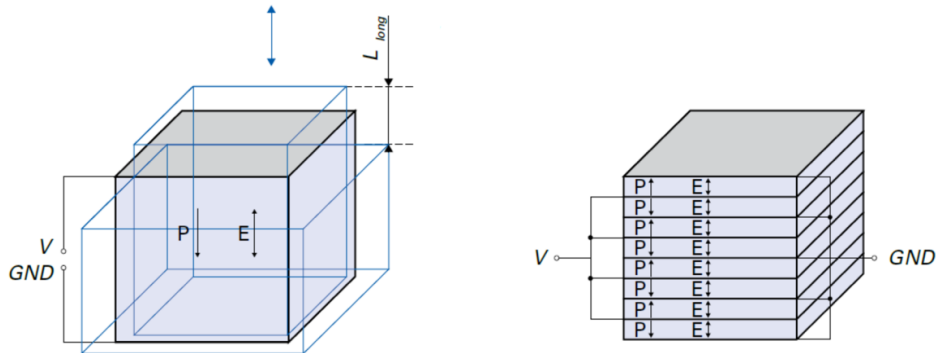
$$\Delta L_{\text{long}} = n d_{33} U \quad (3.4)$$

kde ΔL_{long} je změna délky aktuátoru, n je počet vrstev, d_{33} je piezoelektrický koeficienty a U napětí přiložené na elektrody.

Monolitický aktuátor je jeden kus piezomateriálu obvykle ve tvaru kvádrů, který svůj tvar získává již na začátku výroby při spékání keramických hmot. Je opatřen dvěma elektrodami a provozní napětí nepřekračuje 200 V. Tyto aktuátory jsou levné, dostupné, ovšem nejsou schopny vyvinout velkou sílu.

Mnohvrstevný aktuátor je sestaven z několika elementů piezomateriálu které jsou lepeny na sebe. Každý element je připojen vlastními elektrodami. Tím, že se celý pohon skládá z více částí, je možné dosáhnout mnohem větší síly, než při použití jednoho

elementu piezomateriálu. Tvar je válcový, nebo kvádrový. Rozměry jsou větší než u monolitického aktuátoru, také je potřeba vyššího napětí, typicky do 500 V. Příčný aktuátor je znázorněn na obrázku 3.7.



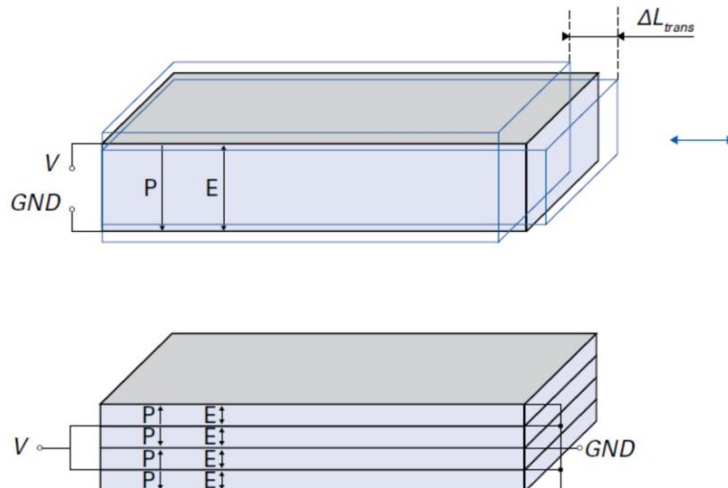
Obr. 3.7 Příčný piezoaktuátor d_{33} [10]

3.2.3 Podélný aktuátor

Podélný aktuátor je svou strukturou podobný jako předchozí příčný, ovšem využívá podélného módu d_{31} . Pro změnu délky aktuátoru platí vztah [10]:

$$\Delta L_{\text{trans}} = d_{31} \frac{1}{h} U \quad (3.5)$$

kde ΔL_{trans} je změna délky aktuátoru, l je délka aktuátoru, h tloušťka vrstvy a U napětí přiložené na elektrody. Podélný aktuátor je znázorněn na obrázku 3.8.



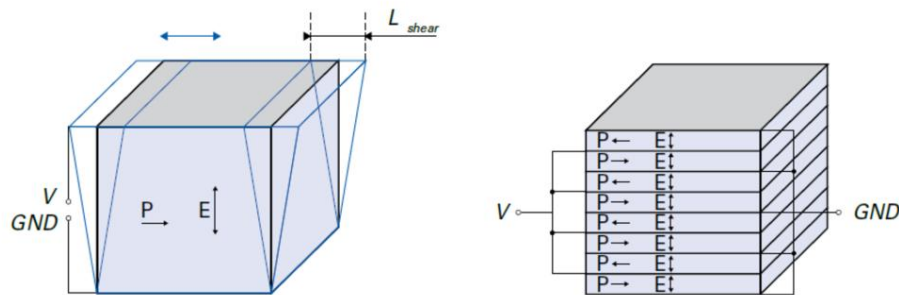
Obr. 3.8 Podélný piezoaktuátor d_{31} [10]

3.2.4 Střihový aktuátor

Střihový aktuátor je také svojí strukturou podobný jako příčný (a podélný) aktuátor, využívá ale střihového módu d_{15} . V samotném materiálu je rozdíl ve směru polarizace jednotlivých vrstev na směr přiloženého elektrického pole. Pro změnu střihu aktuátoru platí vztah [10]:

$$\Delta L_{\text{shear}} = n d_{15} U \quad (3.6)$$

kde ΔL_{shear} je střih aktuátoru, n je počet vrstev, d_{15} je piezoelektrický koeficient a U napětí přiložené na elektrody. Střihový aktuátor je znázorněn na obrázku 3.9.



Obr. 3.9 Střihový piezoaktuátor d_{15} [10]

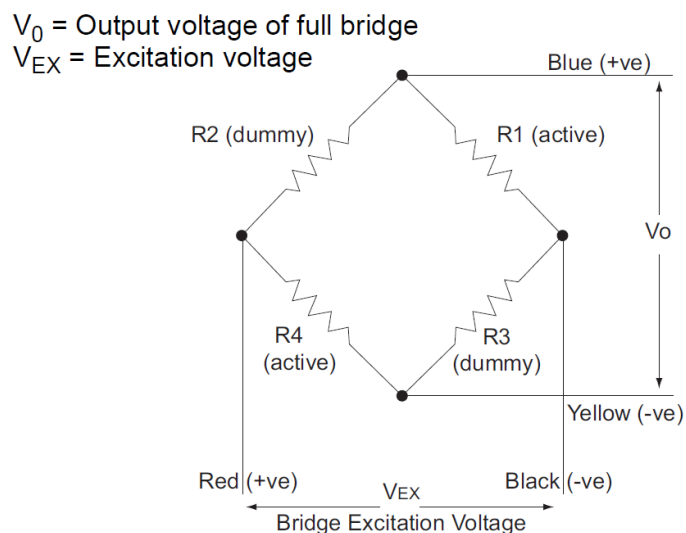
Právě blokové piezoaktuátory jsou využity v manipulátoru Thorlabs MAX341/M. Vzhledem k výrobnímu tajemství je možné se pouze domnívat, který typ aktuátoru je osazen. S největší pravděpodobností to bude monolitický blokový aktuátor d_{33} (příčný) nebo d_{31} (podélný). Toto zařízení je příklad laboratorního využití piezoaktuátorů pro účely přesného polohování. V průmyslu je možné se s nimi setkat v podobě uzávěrů či dávkovačů v hydraulických a pneumatických systémech, ultrazvukových měničů pro čištění, broušení či vrtání, vysílačů a přijímačů ultrazvukových vln pro lékařskou diagnostiku a v dalších aplikacích vyžadujících vysokou míru přesnosti.

3.3 Piezoelektrické motory

Piezoelektrické motory jsou složitou kombinací různých druhů piezoaktuátorů. Skládají se ze dvou částí - statoru a rotoru. Stator se skládá z mnoha piezoelektrických elementů. Ohybové či střihové aktuátory pro posun rotoru a příčné či podélné aktuátory pro jejich „přepínání“. Koordinovaný pohyb obou typů aktuátorů vytváří postupnou vlnu. Proto se také tento druh motoru nazývá ultrazvukový. Vibracemi statoru se uvede do pohybu rotor. Rotační ultrazvukové motory se ve velké míře užívají v zaostřovacích mechanismech fotoaparátů.

4. TENZOMETRICKÝ SNÍMAČ

Tenzometr je součástka, která mění svůj odpor vlivem deformace. Tímto způsobem lze převádět míru deformace na hodnotu odporu. Velice často se používá zapojení tenzometru do Wheatstoneova můstku, jehož princip objevil již v roce 1843 Charles Wheatstone. Toto můstkové zapojení je vhodné pro měření odporů a běžně se využívá právě pro tenzometrická měření. Použitím se zároveň eliminují vlivy teploty a termoelektrických napětí [3]. Zapojení je využito i ve vestavěném tenzometrickém snímači na aktuátorech manipulátoru MAX341/M. Tímto je manipulátor připraven na možnost zpřesnění posuvu zavedením zpětné vazby. Na obrázku 4.1 je zapojení tenzometrického můstku použitého na piezoaktuátorech Thorlabs. Je použito zapojení tzv. polovičního můstku, kdy jsou v můstku dva aktivní tenzometrické snímače. Toto zapojení zvyšuje citlivost měření oproti užití pouze jednoho tenzometru. Na obrázku 4.2 je samostatný piezoaktuátor z produkce Thorlabs s barevně odlišenými přívody tenzometrického můstku tak, jak je znázorněno na schématu.



Obr. 4.1 Zapojení tenzometrického můstku manipulátoru MAX341/2 [11]



Obr. 4.2 Piezoaktuátor Thorlabs s vývody tenzometrického můstku [12]

5. ŘÍZENÍ PIEZOELEKTRICKÝCH AKTUÁTORŮ

Vzhledem k tomu, že pro roztažení piezoelektrického materiálu je potřeba vysokého napětí (typicky 50 až 100 V), užívá se pro řízení piezoaktuátorů speciálních zesilovačů. Dle potřeby je možné pořídit jednoduché ovladače ve formě integrovaného obvodu s nutností doplnění o řídicí obvody, již zkompletované ovladače ve formě modulu (i s možnou přípravou pro připojení k počítači), či složité laboratorní přístroje vyráběné přímo pro různá polohovací zařízení s piezoaktuátory.

5.1 Stolní přístrojové ovladače

Výrobci zařízení s piezoaktuátory dodávají ke svým výrobkům i ovladače vhodné pro danou aplikaci. Tyto ovladače jsou vytvořeny na míru konkrétnímu zařízení (případně univerzálně k více zařízením z produkce daného výrobce). Většinou nabízí možnost ovládání manuálně přímo na přístroji či propojení s počítačem a ovládání přes dodávaný program. Přístroje obsahují veškerou elektroniku nutnou pro řízení piezoaktuátorů dle potřeby (např. zpracování zpětné vazby pro potlačení hystereze a zpřesnění posunu) a jsou dodávány se vším potřebným příslušenstvím. Příkladem může být tříkanálový ovladač Thorlabs BPC-303 (Obr. 5.1) doporučovaný právě pro manipulátory série MAX300 nebo 32kanálový ovladač PD32 firmy PiezoDrive (Obr. 5.2). Skutečnost, že tyto přístroje jsou velice profesionálními zařízeními, odráží i cena. Ta se může vyšplhat na desítky tisíc korun. Nejdražší přístroje běžně stojí kolem 100 000 korun.



Obr. 5.1 Ovladač BPC-303 [13]

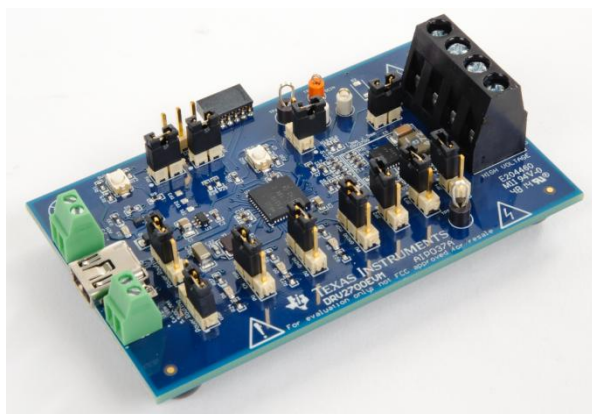


Obr. 5.2 Ovladač PD32 [14]

5.2 Moduly

Moduly jsou vyráběny jako zařízení kompletně vybavená pro řízení piezoaktuátorů. Moduly jsou vyráběny jako jednoduché sady pro výrobu prototypových zařízení (např. DRV2700EVM od Texas Instruments, obr. 5.3), nebo jako řídicí jednotky již produkčních, sériových zařízení v průmyslovém využití (např. Piezomaster VP7206, obr. 5.4). Častokrát jsou užívány jako OEM zařízení užívané jinou společností, která je

začleňuje do svých výrobků. Příkladem může být výše zmíněný modul Piezomaster VP7206 vyráběný společností Viking Industrial Products, která jej dodává pro průmyslové použití v NASA či Boeing LTS, nebo pro účely výzkumu na univerzitách Harvard, Yale či MIT. S podobnými moduly se dá setkat i kdekoli jinde. V automobilovém průmyslu se piezoaktuátory používají například u pump systému ABS, nebo ve vstřikovacích systémech common-rail u moderních spalovacích motorů. Všechny tyto aplikace jsou řízeny pomocí obdobných modulů.



Obr. 5.3 Modul TI DRV2700EVM [15]



Obr. 5.4 Modul Piezomaster [16]

5.3 Integrované obvody

Pro řešení jednodušších zařízení, případně vývoj, testování a prototypovou výrobu jsou vhodné integrované obvody ovladačů pro piezoaktuátory. Jedná se buď o speciální integrované obvody určené pro ovládání piezopohonů, případně piezokustických prvků, nebo o vysokonapěťové operační zesilovače.

Integrované ovladače pochází především z produkce firem Texas Instruments či ON Semiconductor. Dále jsou dostupné i ovladače pro složité piezoelektrické motory (např. Piezo LEGS) od firmy Trinamic. Především produkty od Texas Instruments jsou dostupné v různých provedeních. Dostupné jsou čistě analogové obvody (DRV2700) nebo obvody s možností ovládání pomocí sběrnice I²C (DRV2667). Obvody jsou napájeny nízkým napětím a fungují na principu zvyšujícího měniče. Hodí se pro malá přenosná zařízení, jako například lékařské diagnostické přístroje nebo ultrazvukové frézky. Jejich rozměry tedy musí být velice miniaturní, obvykle v pouzdře QFN.

Pro řešení ovladače pomocí operačního zesilovače jsou vhodné například obvody Texas Instruments OPA454 nebo Linear Technology LTC6090. Jejich výhodou je umístění do klasického pouzdra SO8, ve kterém jsou i klasické nízkonapěťové zesilovače, což zjednodušuje osazení na desku plošných spojů. Nevýhodou je nutnost napájení vysokým napětím.

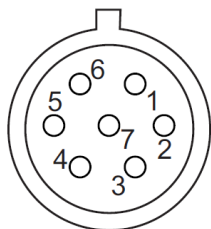
Pro řešení ovladače tímto způsobem je ovšem nutné vytvořit řídicí elektroniku, například na bázi vhodné mikroprocesorové platformy.

6. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK PIEZOAKTUÁTORŮ

Před samotným návrhem ovladače bylo nutné provést průzkum manipulátoru MAX341/M a jeho konektivity. Vzhledem k tomu, že v manuálu je uvedeno doporučení používat pouze ovladače z vlastní produkce Thorlabs (např. BPC-303), není k dispozici příliš mnoho informací. Z návodu k manipulátoru bylo zjištěno, že maximální jmenovité napětí na piezoaktuátoru je 75 V, absolutně maximální 100 V.

Dále je v tomto návodu k dispozici nákres rozložení pinů na LEMO-konektoru pro připojení zpětné vazby (viz obr. 6.1). Podrobný popis tohoto konektoru byl poskytnut firmou Thorlabs po dotazu na zapojení. Z tohoto popisu byla získána informace, že měření na tenzometrickém můstku se v přístrojích z produkce Thorlabs provádí sinusovým signálem s napětím 2 V_{pp} o frekvenci 18 kHz.

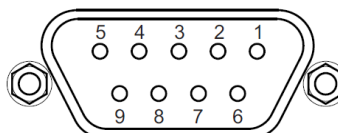
Pro přesné měření je nutné signál z tenzometru zesílit. O to se stará předzesilovač, který je v případě manipulátoru vestavěný a v manuálu o něm není jakékoliv zmínky. Thorlabs však vyrábí piezoaktuátory i jako samostatné kusy a tento zesilovač k nim poskytuje jako příslušenství. Z návodu dostupného k tomuto zesilovači byly zjištěny další užitečné informace, jako například zapojení samotného tenzometrického můstku včetně rozlišení vývodů, či rozdělení pinů na D-Sub konektoru (obr. 6.2), kterým se zesilovač připojuje ke stejným doporučeným ovladačům, jako manipulátory série MAX300.



Pin	Description
1	+15 V
2	Oscillator +
3	0 V
4	Sig Out -
5	Sig Out +
6	-15 V
7	Travel

Obr. 6.1 Piny na LEMO konektoru pro zpětnou vazbu [1]

- Pin1: Oscillator Input
- Pin2: +15v Input Supply
- Pin3: -15v Input Supply
- Pin4: 0v Supply
- Pin5: Amplifier Output
- Pin6: 0v Supply
- Pin7: ID Resistor Connection
- Pin8: N/C
- Pin9: N/C

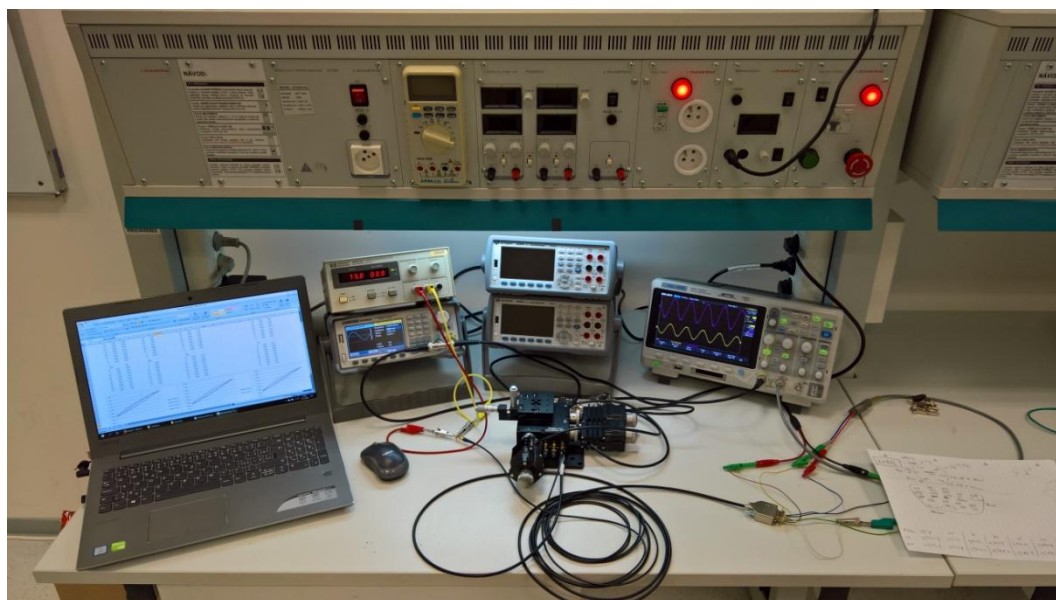


Obr. 6.2 Piny na D-Sub konektoru pro zpětnou vazbu [11]

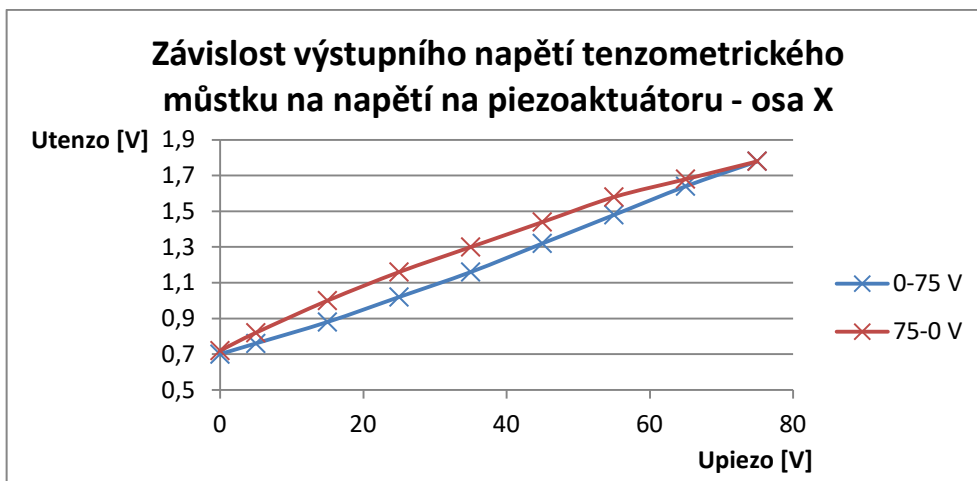
V příslušenství manipulátoru se nachází propojovací kabel, který má na jedné straně LEMO-konektor a na druhé straně přístrojový D-Sub konektor. Pro připojení je vhodné využít právě tento kabel. Pro účely proměření charakteristik piezoaktuátorů byl vytvořen D-Sub konektor s vývody, který umožňuje měření v laboratorních podmínkách.

Nejdříve bylo sestaveno měřicí pracoviště (Obr. 6.3) a provedeno měření přesně dle informací získaných z manuálů k jednotlivým zařízením a z konzultace s Thorlabs. Tedy buzení tenzometrického můstku střídavým sinusovým signálem 2 V_{pp} o frekvenci 18 kHz z funkčního generátoru, napájení piezoaktuátorů od 0 V do 75 V. Výstupní napětí můstku bylo odečítáno osciloskopem také jako mezivrcholová hodnota napětí. Byla provedena tři měření, pro každou osu manipulátoru zvlášť. V grafech 6.1 až 6.3 je patrná hystereze piezoaktuátorů. Tabulky hodnot z tohoto měření se nachází v tabulkách P1.1 a P1.2 v příloze 1.

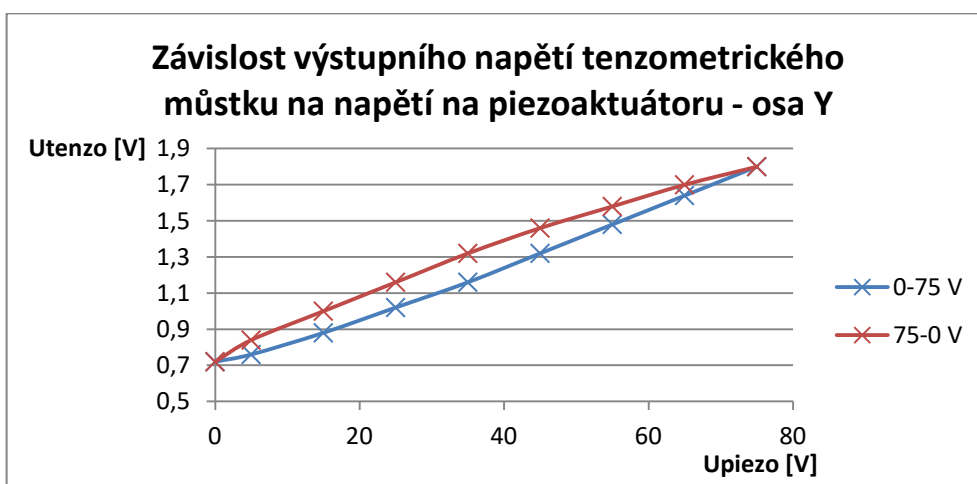
Z grafů je současně patrné, že piezoaktuátory umístěné v osách X a Y (vodorovná poloha) jsou totožné. U osy Z (vertikální poloha) je celá hysterezní křivka posunutá výše, tvarově je však totožná s osami X a Y.



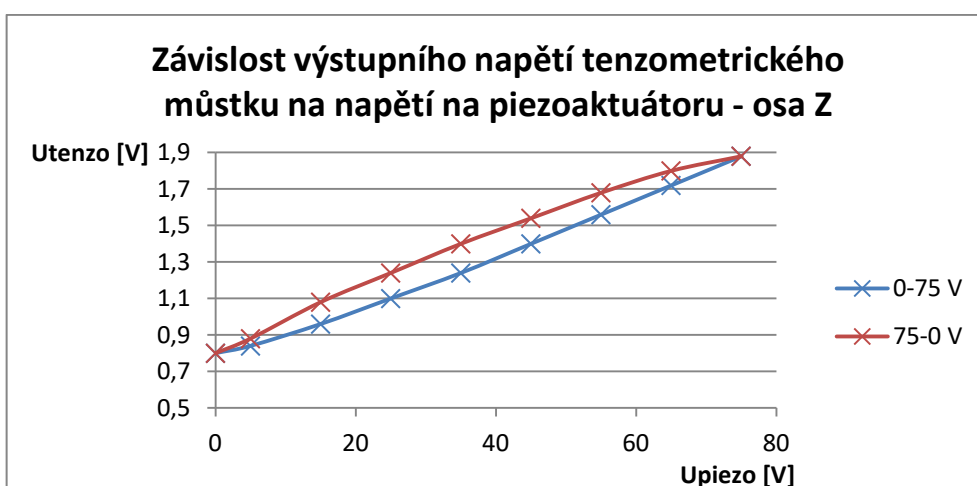
Obr. 6.3 Laboratorní pracoviště pro měření charakteristik aktuátorů



Graf 6.1 Závislost výstupního napětí tenzometrického můstku na napětí na piezoaktuátoru – osa X



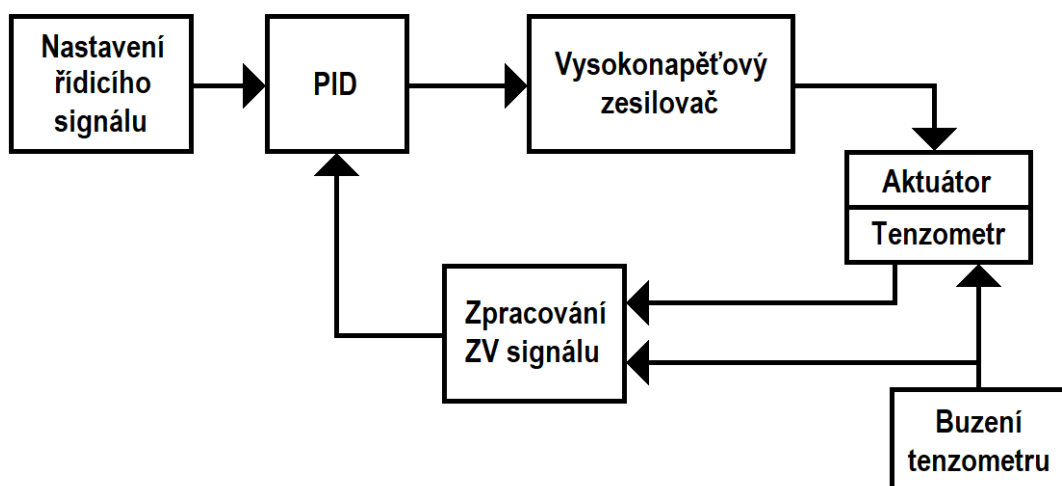
Graf 6.2 Závislost výstupního napětí tenzometrického můstku na napětí na piezoaktuátoru – osa Y



Graf 6.3 Závislost výstupního napětí tenzometrického můstku na napětí na piezoaktuátoru – osa Z

7. STRUKTURA OVLADAČE

Úkolem ovladače je řídit rozpínání aktuátoru a zároveň pomocí zpětné vazby upravovat řídicí signál tak, aby byla potlačena jeho hystereze. Základními částmi celého ovladače jsou generátor řídicího signálu pro aktuátor a PID regulátor. Za těmi následuje v přímé větvi vysokonapěťový zesilovač, který napájí samotný aktuátor. Zpětnovazební větev se skládá z tenzometru napájeného střídavým signálem a bloku zpracování zpětnovazebního signálu, kterým se upravuje řídicí vstup. Tato větev se připojuje do PID regulátoru. Blokové schéma ovladače je zobrazeno na obrázku 7.1.



Obr. 7.1 Blokové schéma navrhovaného ovladače

Návrh celého ovladače závisí na parametrech manipulátoru MAX341/M a dalších zařízení, která jsou buď příslušenstvím manipulátoru, nebo výrobkem s podobným principem funkce. Tyto různé parametry jsou uvedena v technických dokumentacích jednotlivých produktů firmy Thorlabs. To je hlavně dokumentace k manipulátoru NanoMax 341/M ([1]), dokumentace k ovladačům pro piezoaktuátory Thorlabs (např. BPC-303) ([13]), tutoriál a dokumentace k samostatným piezoaktuátorům Thorlabs ([6], [12]) a dokumentace k zesilovači pro tenzometrický můstek samostatných aktuátorů AMP002 ([11]). Další a zpřesňující informace, jako například rozložení pinů jednotlivých konektorů a detaily k napájení tenzometrického můstku byly získány z konzultace s Thorlabs (K). Parametry potřebné pro návrh jsou přehledně uvedeny v tabulce 7.1.

Parametr	Hodnota	Zdroj
Napájení piezoaktuátorů	Jmenovité max. napětí 75 V Absolutní max. napětí 100 V	[1]
Délka posuvu	20 μm	[1]
Teoretické rozlišení	bez zpětné vazby 20 nm se zpětnou vazbou 5 nm	[2]
Napájení tenzometrického můstku	2 V _{pp} , 18 kHz sinus	K
Zapojení tenzometrického můstku	Wheatstone half-bridge	[11], [12]
Napájení zesilovače zv. signálu	$\pm 15\text{ V}$	[11], K

Tab. 7.1 Parametry manipulátoru NanoMax 341/M

7.1 Zdroj řídicího signálu

Jako zdroj řídicího signálu je užitá mikroprocesorová vývojová platforma s možností řízení z počítače. Generování signálu je číslicové, a proto je nutné jej převést na signál analogový. Vzhledem k tomu, že maximální posuv aktuátoru je 20 μm s teoretickým rozlišením 5 nm, vychází dle výpočtu 20 μm / 5 nm počet kroků na 4000. Z tohoto důvodu je nutné použít takový D/A převodník, který zvládne 4000 kroků pojmout, minimálně tedy 12bitový (4096 kroků).

7.2 Napájení aktuátoru

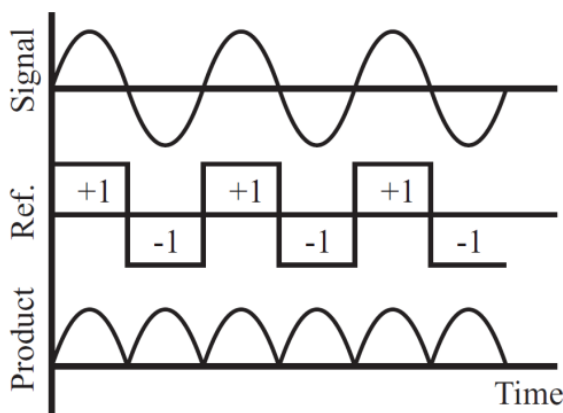
Z D/A převodníku je možné získat pouze nízkonapěťový signál. Pro potřeby napájení aktuátoru, který vyžaduje vysokého napětí, je nutné jej zesílit. Pro konstrukci ovladače byla vybrána možnost použití vysokonapěťového zesilovače v pouzdře 8-Pin SO. To usnadní sestavení celého zařízení, neboť se jedná o pouzdro běžně užívané i u jiných operačních zesilovačů. Jeho rozměry nejsou nikterak velké, ale zároveň umožňují snadné osazení na desku plošných spojů. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost napájení vysokým napětím.

7.3 Zpracování zpětnovazebního signálu

Dalším důležitým parametrem napájení tenzometrického můstku. Užití střídavého signálu v můstkovém zapojení snižuje vliv chyb, které by se mohly vyskytnout při užití stejnosměrného signálu. To je kupříkladu vliv termoelektrického jevu, stejnosměrný drift offsetu použitých zesilovačů a podobně. Vzhledem k tomu, že udávané teoretické rozlišení je 5 nm na celkové délce posuvu 20 μm , změna zpětnovazebního signálu bude v řádu mV. K demodulaci střídavého signálu bude využito synchronního detektoru. Ten je, kromě detekce zašuměných modulovaných signálů například v optoelektronice [21], vhodný pro měření signálů, u kterých nastávají velmi malé změny.

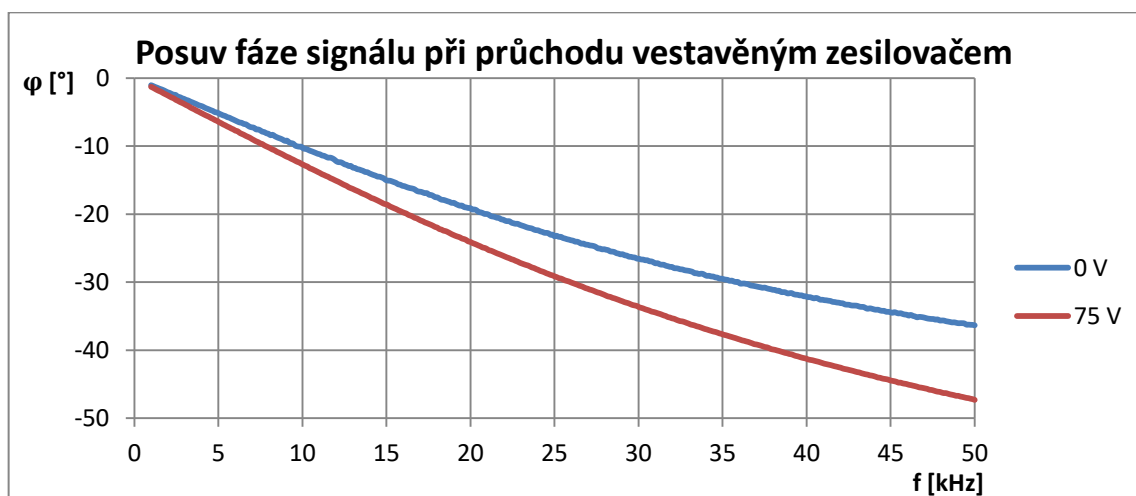
Synchronní detektor funguje tak, že signál detekuje pomocí referenčního signálu, záporné hodnoty invertuje na kladné. Princip je zobrazen na obrázku 7.2. Jako referenční signál je užit stejný obdélníkový signál, jakým se bude budit tenzometrický můstek.

Takto se ze střídavého signálu vytvoří stejnosměrný, který se dále zesílí na úroveň korespondující se signálem řídicím a vytvoří se chybový signál. Tím se koriguje řídicí signál.



Obr. 7.2 Princip synchronní detekce a usměrnění [21]

Z důvodu použití stejného signálu pro buzení tenzometrického můstku a pro referenční signál synchronního detektoru bylo nutné ověřit, zda nedochází k výraznému zpoždění zpětnovazebního signálu vůči referenčnímu. To by totiž zapříčinilo chybné vyhodnocování synchronním detektorem. Bylo tedy provedeno měření fázového posuvu signálu při průchodu tenzometrickým můstkem a vestavěným zesilovačem pomocí vektorového obvodového analyzátoru Bode 100. Frekvenční rozsah měření byl nastaven od 1 kHz do 50 kHz. V grafu 7.1 je patrné zvyšování velikosti fázového posuvu při zvyšující se frekvenci signálu. Samotná velikost fázového posuvu je také závislá na roztažení aktuátoru a tedy změně odporu tenzometru. Při roztahování aktuátoru se posuv zvětšuje. Rozdíl velikosti změny je závislý na frekvenci signálu. Čím je frekvence vyšší, tím je větší rozdíl fázového posuvu při roztahování aktuátoru. Při užití signálu nižší frekvence je fázový posun malý až zanedbatelný a není třeba řešit zpoždování referenčního signálu.

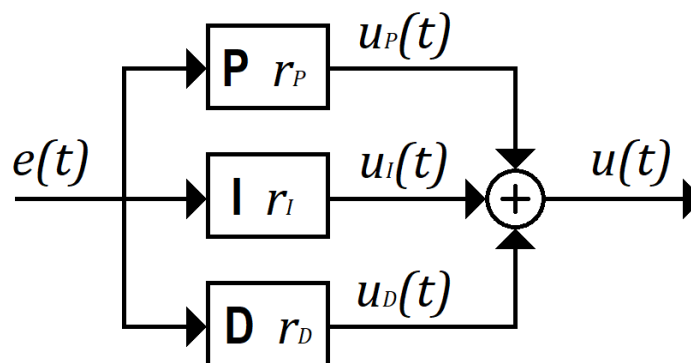


Graf 7.1 Posuv fáze signálu při průchodu vestavěným zesilovačem

7.4 PID regulátor

Pokud by byla zpětná vazba zavedena rozdílem přímo do přímé větve, korigovaná hodnota řídicího signálu by mohla začít oscilovat kolem určité hodnoty. Zpětnovazební smyčka reaguje na změnu řídicího signálu a okamžitě provádí korekci. Tím provádí korekci právě korigovaného signálu, což za jistých podmínek může způsobit rozkmitání.

Proto je před vysokonapěťový zesilovač zařazen zpětnovazební regulátor, jehož úkolem je provést co nejrychlejší korekci řídicího signálu a zároveň potlačit možnost oscilace. Regulátor v plné konfiguraci provádí proporcionálně (P), integračně (I), derivační (D) regulace řízené veličiny s navzájem shodnými poměry vlivu. Označuje se tak jako PID regulátor. Zobrazený je na obrázku 7.3.



Obr. 7.3 PID regulátor

Proporcionální složka regulátoru je přímo úměrná regulační odchylce a platí pro ni vztah [19]:

$$u_p(t) = r_p e(t) \quad (7.1)$$

kde $e(t)$ je vstupní signál, $u_p(t)$ je výstupní signál a r_p je váha proporcionální složky. Velikost proporcionální složky určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky [20]. Při nadměrné velikosti r_p však může dojít k rozkmitání.

Integrační složka je přímo úměrná integrálu regulační odchylky a platí pro ni vztah [19]:

$$u_i(t) = r_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7.2)$$

kde $e(t)$ je vstupní signál $u_i(t)$ je výstupní signál a r_i je váha integrační složky. Velikost integrační složky určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky [20].

Derivační složka je přímo úměrná derivaci regulační odchylky a platí pro ni vztah [19]:

$$u_D(t) = r_D \frac{de(t)}{dt} \quad (7.3)$$

kde $e(t)$ je vstupní signál $u_D(t)$ je výstupní signál a r_D je váha derivační složky. Velikost derivační složky určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky [20].

Příspěvky jednotlivých složek jsou následně sečteny ve výsledný signál $u(t)$, pro který platí vztah [19]:

$$u(t) = r_P e(t) + r_I \int_0^t e(\tau) d\tau + r_D \frac{de(t)}{dt} \quad (7.4)$$

Tento vztah může být upraven do podoby [19]:

$$u(t) = k_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7.5)$$

kde k_P je zesílení regulátoru, T_I je integrační časová konstanta regulátoru a T_D je derivační časová konstanta regulátoru. Pro k_P , T_I a T_D platí vztahy [19]:

$$k_P = r_P, \quad T_I = \frac{k_P}{r_I}, \quad T_D = \frac{r_D}{k_P} \quad (7.6)$$

kterými je možné jednotlivé konstanty převádět.

7.5 PSD regulátor

PSD regulátor je diskretní obdoba PID regulátoru. Integrační složka je nahrazena sumací. Rozdíl je v tom, že PID regulátor pracuje spojitě, kdežto PSD regulátor mění své hodnoty diskretně v okamžicích daných vztahem:

$$t = NT \quad (7.7)$$

Kde $N = (0, 1, 2, \dots)$ a T je vzorkovací perioda.

Vztah (6.5) se následně upraví do podoby [24]:

$$u(t) = k_P e(t) + \frac{k_P}{T_I} I(kT) + k_P T_D D(kT) \quad (7.8)$$

Kde $e(t)$ je regulační odchylka, k_P je zesílení regulátoru, T_I je integrační časová konstanta regulátoru a T_D je derivační časová konstanta regulátoru, $I(kT)$ je integrál regulační odchylky v čase kT a $D(kT)$ je derivace regulační odchylky v čase kT . Spojitý integrál je nahrazen sumací. Pro $I(kT)$ platí [24]:

$$I(kT) = \int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{i=1}^k e(iT) \quad (7.9)$$

Vztah (6.8) se dále upraví do rekurzivní podoby [24]:

$$I(kT) = I[(k-1)T] + e(kT) \quad (7.10)$$

Derivace ve vztahu (6.8) se nahradí zpětnou diferencí [24]:

$$D(kT) = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (7.11)$$

7.6 Nastavení konstant PSD regulátoru

Pro nastavení konstant PSD regulátoru je vhodná Ziegler-Nicholsonova metoda. Nejprve se vyřadí integrační a derivační složka regulátoru. Poté se zvyšuje konstanta proporcionální složky do té doby, než se dosáhne kritického zesílení označeného K_{krit} . To je okamžik, kdy se již regulátor neustálí na konstantní hodnotě, ale přejde do netlumeného kmitání. Perioda tohoto kmitání se značí T_{krit} . Konstanty regulátoru se určí dle vztahů [33]:

$$K_P = 0,6 \cdot K_{\text{krit}} \quad (7.12)$$

$$T_I = 0,5 \cdot T_{\text{krit}} \quad (7.13)$$

$$T_D = 0,12 \cdot T_{\text{krit}} \quad (7.14)$$

8. OBVODOVÝ NÁVRH

Obvodový návrh se nachází v příloze 5. Jednotlivé části odpovídají blokovému schématu. V horní části je větev napájení aktuátoru, jenž se skládá z vysokonapěťového zesilovače, bloku pro jeho napájení a digitálně-analogového převodníku. Ve zpětnovazební větvi se nachází konektor pro připojení tenzometrického můstku s vestavěným zesilovačem a demodulátorem v podobě synchronního detektoru. V celém obvodu je oddělena signálová a napájecí zem. Spojeny jsou v jednom bodě propojkou

8.1 Větev napájení aktuátoru

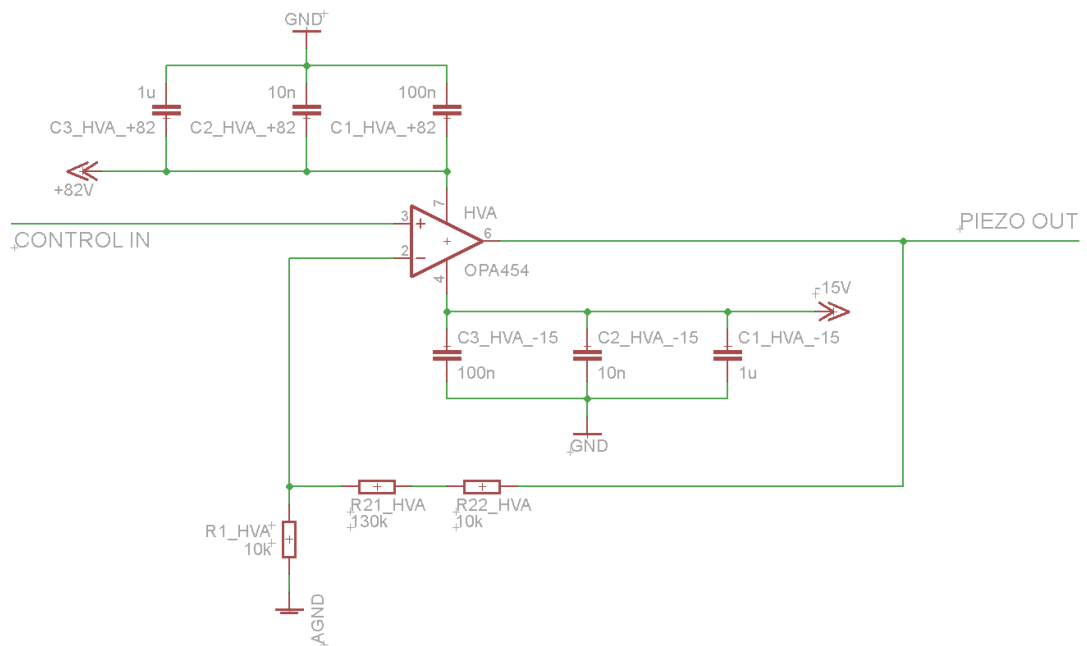
Jako vhodný zdroj řídicího signálu se jeví platforma Arduino využívající procesorů Atmel. Například verze Arduino Uno využívající procesor ATmega328P a Arduino Mega s procesorem ATmega2560 mají vestavěný šesti resp. šestnáctikanálový 10 bitový D/A převodník. 10bitový D/A převodník však pojme maximálně 1024 kroků a teoretické rozlišení po 4000 krocích by nestačil. Řešením je externí D/A převodník Microchip MCP4725 s připojením přes sběrnici I²C. Verze Arduino Due s procesorem AT91SAM3X8E má dvoukanálový 12bitový převodník. Pro D/A převod by postačoval, ovšem pro A/D převod je třeba větší bitová šířka (vysvětlení dále v textu). Signál přiváděn po sběrnici I²C do D/A převodníku, ze kterého je získáván analogový signál s amplitudou 0 V až 5 V. Ten je následně zesílen vysokonapěťovým zesilovačem Texas Instruments OPA454. Dle dokumentace výrobce udává, že je tento zesilovač vhodný pro napájení piezoaktuátorů.

Znázornění zapojení zesilovače je na obrázku 8.1. Zesilovač je zapojen v neinvertujícím zapojení. Je třeba zesílení 15x, tedy maximální úroveň řídicího napětí 5 V je zesílena na 75 V. Nastavení zesílení je provedeno tak, že odpor R₂ ve zpětné vazbě je rozdělen mezi dva pevné rezistory o hodnotách 130 kΩ a 10 kΩ. Hodnota odporu rezistoru R₁ je 10 kΩ. Tím je dosaženo přesné hodnoty požadovaného zesílení dle vztahu pro zesílení operačního zesilovače:

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (8.1)$$

kde A je zesílení a R₁ a R₂ jsou hodnoty zpětnovazebních rezistorů.

Napájení zesilovače je realizováno pomocí -15 V do záporné napájecí větve (ten je užít i pro napájení dalších integrovaných obvodů) a +80V z laboratorního vysokonapěťového zdroje do kladné napájecí větve. Tím je zajištěna maximální linearita převodní charakteristiky zesilovače mezi požadovanými hodnotami napětí 0 V až 75 V. Zároveň je zajištěno, že napájecí napětí nepřesáhne maximum udané výrobcem, které je stanoveno na 100 V. Připojení k manipulátoru je realizováno koaxiálním kabelem pomocí BNC konektoru.



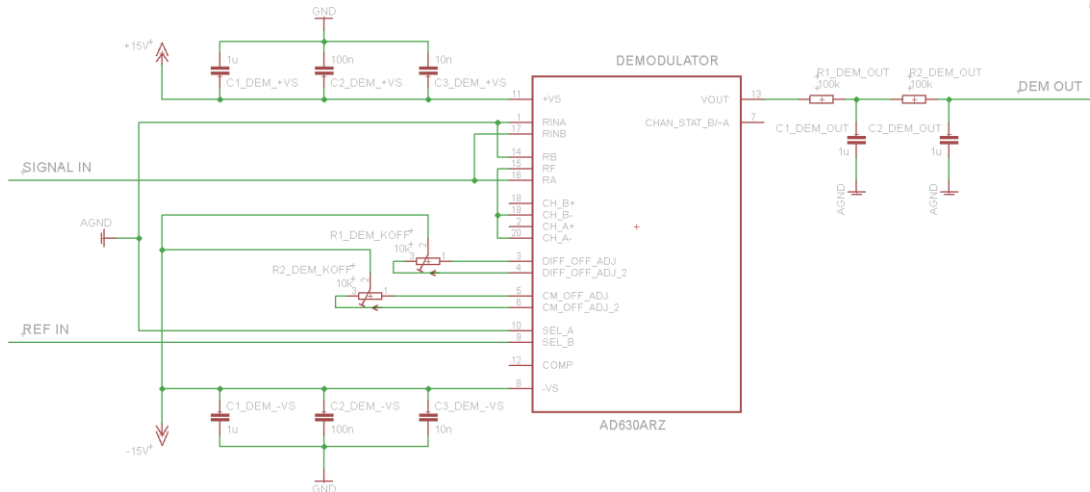
Obr. 8.1 Zapojení vysokonapětového zesilovače OPA454

8.2 Zpětnovazební větev

Dle informací od firmy Thorlabs je vhodné napájet tenzometr střídavým signálem, tovární ovladače používají pro měření sinusového signálu o rozkmitu napětí 2 V_{pp} o frekvenci 18 kHz. Tato frekvence je dosti vysoká. Aktuátory totiž mohou být užity i pro eliminaci mechanických vibrací, v dokumentaci k ovladači BPC-303 je uvedena frekvence oscilace aktuátoru až 10 kHz. Frekvence zpětnovazebního signálu by měla být vyšší, obdobně jako u Shannonova teorému pro vzorkovací frekvenci. V konstruovaném ovladači bude použit střídavý signál s obdélníkovým průběhem a s nižší frekvencí, neboť napájení aktuátoru je stejnosměrné za účelem dosažení přesné polohy. Není tedy zapotřebí vysoké frekvence zpětnovazebního signálu. Užití obdélníkového signálu také zjednoduší následné zpracování signálu při usměrnění synchronním detektorem. Díky nižší frekvenci také odpadne nutnost řešení fázového posuvu zpětnovazebního signálu, který byl popsán v kapitole 7.3. Signál bude zpočátku přiváděn z externího funkčního generátoru pro možnost nastavení amplitudy a frekvence za účelem ověření funkčnosti za použití různých frekvencí signálu.

Jako synchronní detektor je užit obvod AD630, jehož zapojení je znázorněno na obrázku 8.2. Obvod pracuje na principu zesilovače, který pomocí referenčního signálu přepíná mezi invertujícím a neinvertujícím zapojením. Cílem je provést detekci a usměrnění střídavého signálu před A/D převodem, čímž odpadne nutnost řešení digitalizace záporných signálů. Různým zapojením vestavěných rezistorů lze na výstupu dosáhnout zesílení 1x nebo 2x. Maximální úroveň zpětnovazebního signálu za tenzometrickým můstkem je 1 V a maximální úroveň signálu na vstupu A/D převodníku je 2,048 V. Proto bude použito zesílení 2x. Pro kompenzaci offsetu synchronního

detektoru jsou zapojeny trimry o hodnotách 10 k Ω . Na výstupu synchronního detektoru je dle doporučení výrobce umístěn dvojitý RC filtr pro vyhlazení demodulovaného napětí.



Obr. 8.2 Užití obvodu AD630 jako synchronního detektoru

Za synchronním detektorem následuje A/D převodník pro převod analogového zpětnovazebního signálu na digitální, odesílaný přes sběrnici I²C. V zadání diplomové práce je požadováno nastavování hodnot posuvu pomocí softwarového rozhraní počítačem či řídicím obvodem a v realizaci již bude užita mikroprocesorová platforma pro obsluhu z PC a generování řídicího signálu. Nabízí se tedy možnost užít ji i pro částečné zpracování zpětnovazebního signálu a implementaci PSD regulátoru. Výhodou tohoto řešení oproti analogovému, kdy by byla většina obvodu z diskretních součástek (tedy i zbytek obvodu pro úpravu zpětnovazebního signálu, dále součtové zesilovače, integrační a derivační články PID regulátoru) je jednoduchá a přesná změna parametrů, což je obzvlášť u konstant regulátoru značně výhodné.

Stejně jako pro zdroj řídicího signálu musí být splněna podmínka schopnosti zpracování 4000 kroků. Velikost napětí zpětnovazebního signálu se však pohybuje v rozmezí zhruba 0,4 V až 0,94 V. Při použití pouze 12bitového převodníku by bitový prostor pro 4000 kroků splýnul i s přibližně 3000 kroky neužitečného signálu 0 V až 0,4 V, což by zhoršilo přesnost zpětné vazby. Proto je třeba užít externího A/D převodníku s bitovou šířkou alespoň 13 bitů, který má dostatečný prostor pro 8000 kroků. V obvodu je užít 18bitový Microchip MCP3421 s rozhraním I²C.

Možností by bylo provést korekci „offsetu“ zpětnovazebního signálu analogově pomocí odečtu referenční hodnoty napětí například z nastavitelného odporového děliče. Vzhledem k tomu, že každá osa má tento offset jiný, musela by se provádět kalibrace pro každou osu zvlášť ručně pomocí externího měřicího přístroje, což by mohlo mít za následek nepřesné nastavení a tím způsobenou chybu. Ta by ovšem mohla být z důvodu malého rozdílu změn zpětnovazebního signálu zásadní. Provedení této korekce až po A/D převodu umožňuje implementování přesné číslicové kalibrace.

Převodník má dva uzemněné vývody. Uzemnění pro napájení je připojeno na napájecí zem. Vstup převodníku je zapojen jako jednostranný a možnost zapojení diferenčního vstupu není využita. Záporný pin vstupu je tedy připojen na signálovou zem.

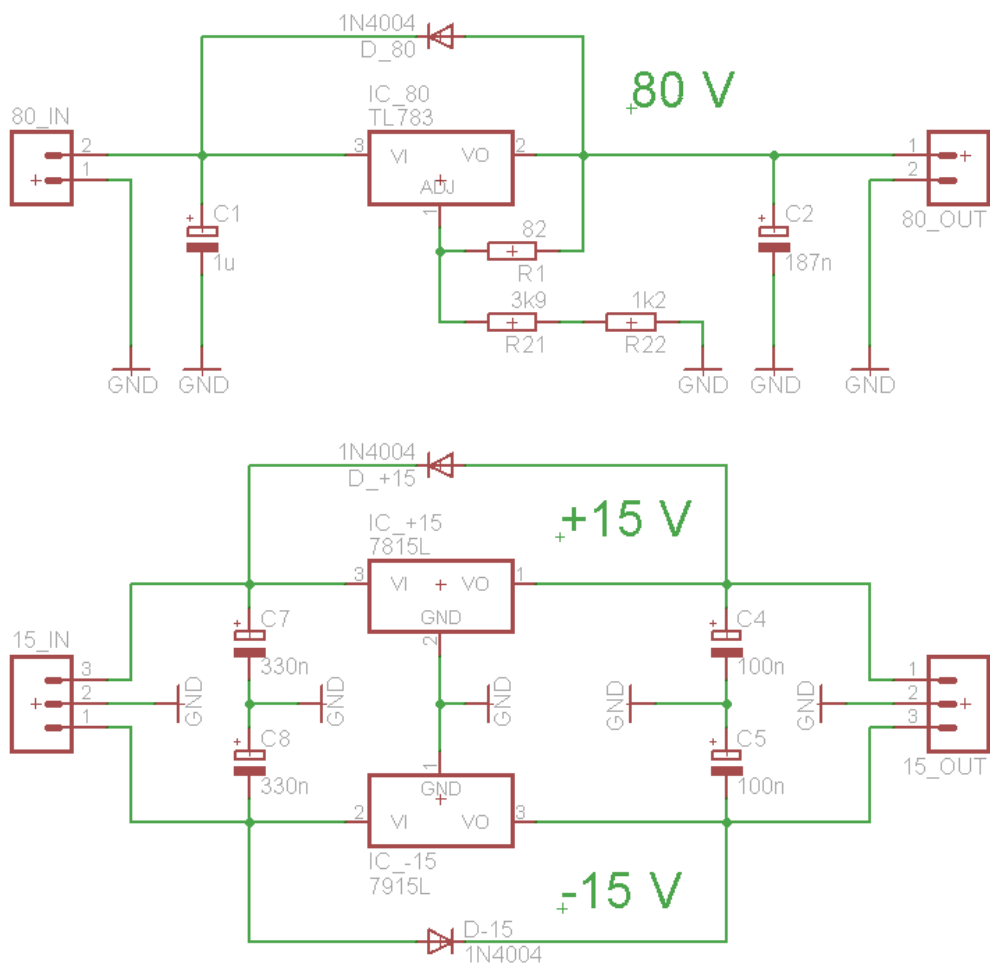
8.3 Napájení

K vytvoření napájecího napětí slouží jednoduchá separátní deska se stabilizátory. Na obrázku 8.3 je zobrazeno schéma napájecího obvodu. Obsahuje dvě větve, a to na $\pm 15\text{ V}$ a $+80\text{ V}$. Jako stabilizátory pro $\pm 15\text{ V}$ byly vybrány 78L15 a 79L15 v pouzdře TO92. Každý z nich je schopný dodávat proud do 100 mA , což plně dostačuje pro napájení ovladače i s připojeným manipulátorem. Ve vestavěném zesilovači se nachází tři operační zesilovače, jejichž celkový odběr je $6,5\text{ mA}$, synchronní detektor spotřebuje 5 mA a v záporné větvi ještě vysokonapěťový zesilovač 4 mA . To je dohromady $15,5\text{ mA}$, stabilizátory tedy mají dostatečnou proudovou rezervu.

Jako stabilizátor pro $+80\text{ V}$ byl zvolen nastavitelný TL783. Jeho výstupní napětí je nastavitelné pomocí dvou rezistorů. Místo jednoho z rezistorů je užitá sériová kombinace dvou rezistorů pro nastavení požadovaného napětí pomocí standardních rezistorů z řady E12. Použity jsou tedy rezistory o hodnotách $82\ \Omega$, $3,9\text{ k}\Omega$ a $1,2\text{ k}\Omega$. Tento stabilizátor je schopná dodávat až 750 mA . Klidový odběr vysokonapěťového zesilovače jsou 4 mA , jak již bylo zmíněno výše. Piezoelektrický materiál aktuátorů je dielektrikum a při přiloženém stejnosměrném napětí skrz něj neprotéká žádný proud (pokud se neuvažují parazitní vlastnosti, jejichž vliv je zanedbatelný). Při změnách napětí není špičkový kapacitní proud tak velký, aby převýšil maximální proudové zatížení stabilizátoru.

Před a za každým stabilizátorem jsou umístěny blokovací kondenzátory o hodnotách doporučených v datasheetech. Před vstupem pevných $\pm 15\text{ V}$ stabilizátorů to jsou keramické 330 nF , na výstupu pak keramické 100 nF . Na vstupu $+80\text{ V}$ stabilizátoru výrobce doporučuje tantalový nebo elektrolytický o hodnotě $1\ \mu\text{F}$. Pro výstupní kondenzátor je uveden vzorec závislý na výstupním napětí, z jehož výpočtu vyšla hodnota 187 nF . V poznámce je však uvedeno, že použití většího kondenzátoru přispívá lepší odezvě na přechodné jevy a zároveň je v příkladech zapojení většinou uveden alespoň $1\ \mu\text{F}$, anebo větší. Proto je užít právě $1\ \mu\text{F}$ elektrolytický kondenzátor.

U vstupů všech napájecích napětí na DPS ovladače se nachází $10\ \mu\text{F}$ tantalové kondenzátory. Před každým integrovaným obvodem je umístěna trojice blokovacích keramických kondenzátorů o hodnotách $1\ \mu\text{F}$, 100 nF a 10 nF blokovacích kondenzátorů připojených na napájecí zem.



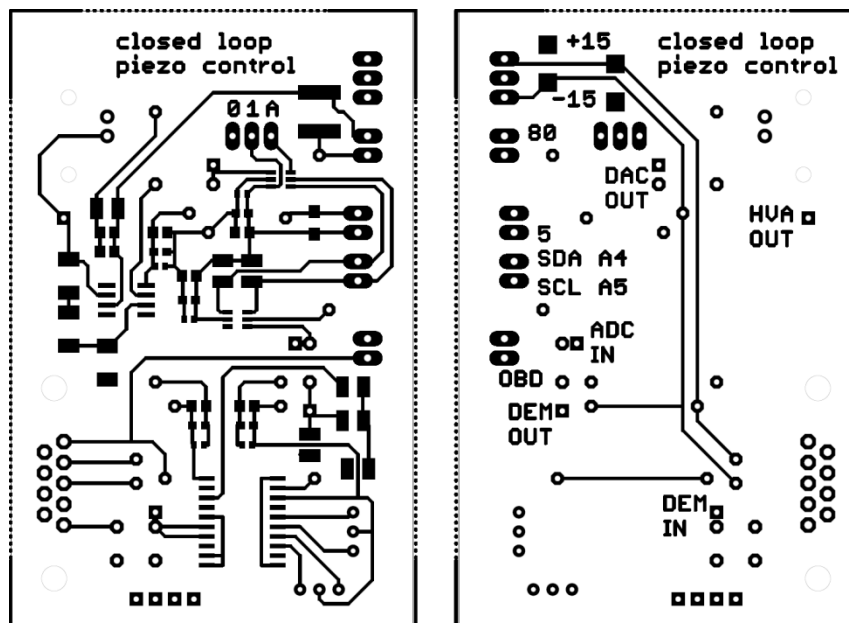
Obr. 8.3 Schéma napájecího obvodu

9. KONSTRUKČNÍ NÁVRH

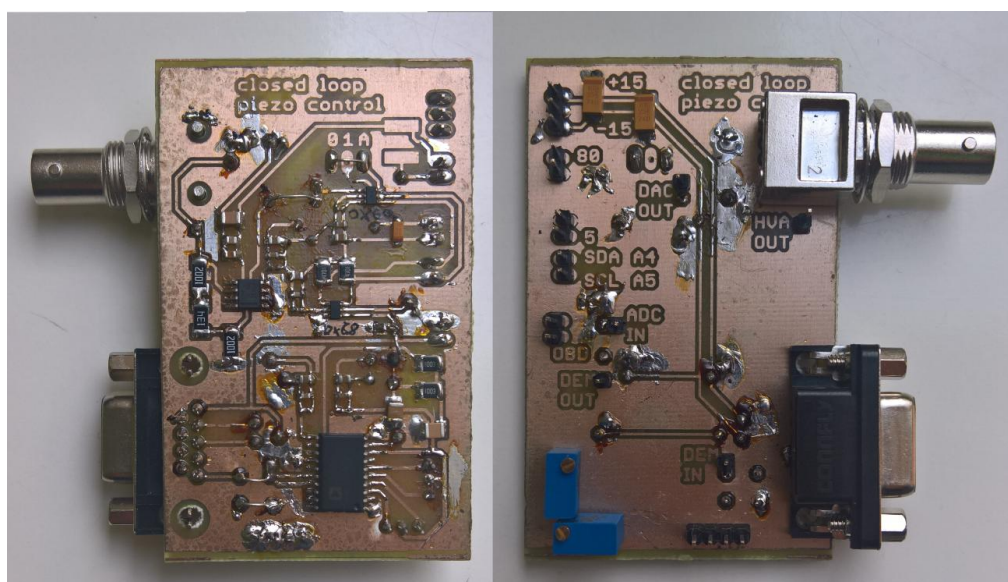
Konstrukční návrh koresponduje s návrhem obvodovým. Snahou je logicky a funkčně rozložit jednotlivé části obvodu, zvláště pak oddálení vysokonapěťové části od zbytku obvodu. Rozvržení desky respektuje způsob užívání a umístění na laboratorním pracovišti. Rozmístění vodivých cest obou stran desky je na obrázku 9.1, reálná a již osazená deska je na obrázku 9.2. Osazovací plány jsou pro lepší přehled zvětšené a umístěné v příloze 6. Konektory pro připojení manipulátoru jsou umístěny tak, aby byly jednoduše dostupné a naopak konektory pro napájení, připojení mikroprocesorové platformy a obdélníkového signálu jsou na opačné straně, aby nic nezasahovalo do pracovní plochy s manipulátorem. Vrchní strana DPS je rozdělena zhruba na dvě poloviny. V horní části se nachází část obvodu pro napájení piezoaktuátoru, tedy D/A převodník, vysokonapěťový zesilovač a BNC konektor. V blízkosti D/A převodníku jsou umístěny pájecí plošky pro propojku. Tou se připojí adresový výstup převodníku buď na napájecí napětí, nebo na zem, čímž se určí jeden bit adresy. Tyto plošky jsou popsány vyleptaným textem ve spodní straně DPS.

Ve spodní části je umístěna analogová část zpracování zpětné vazby sestávající z D-Sub konektoru, synchronního detektoru a A/D převodníku. Jednotlivé části obvodu jsou od sebe odděleny propojkami pro možnost postupného ožívování. Vždy před, nebo za propojkami se nachází kontaktní body pro připojení přístrojů pro monitorování jednotlivých částí obvodu voltmetrem či osciloskopem (výstup D/A převodníku, synchronního detektoru, zesilovače), nebo pro separátní buzení vstupů integrovaných obvodů během ožívování (vstup synchronního detektoru, A/D převodníku). Ve větvi pro přívod 80 V není kondenzátor osazen, neboť cena tantalového kondenzátoru pro 100 V je velice vysoká, navíc v současné době není pro toto napětí dostupný. V případě nutnosti je však možné jej nahradit alespoň keramickým kondenzátorem, pájecí plochy jsou na desce připraveny.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 8, v obvodu je rozděleno uzemnění napájecí a signálové části. Na vrchní straně DPS se nachází signálová zem a na spodní straně zem napájecí. Obě části jsou spojeny jednou propojkou. Napájecí zem je umístěna téměř po celé ploše zadní strany desky. Kromě napájecí země se zde nachází pouze rozvod napájecího napětí ± 15 V a krátkého propojení referenčního signálu synchronního detektoru. Zbytek plochy je využit pro vyleptané popisky jednotlivých konektorů.

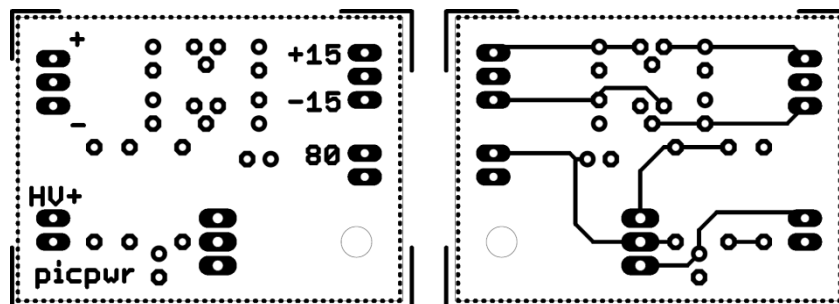


Obr. 9.1 Konstrukční návrh vrchní a spodní strany DPS ovladače, 1:1

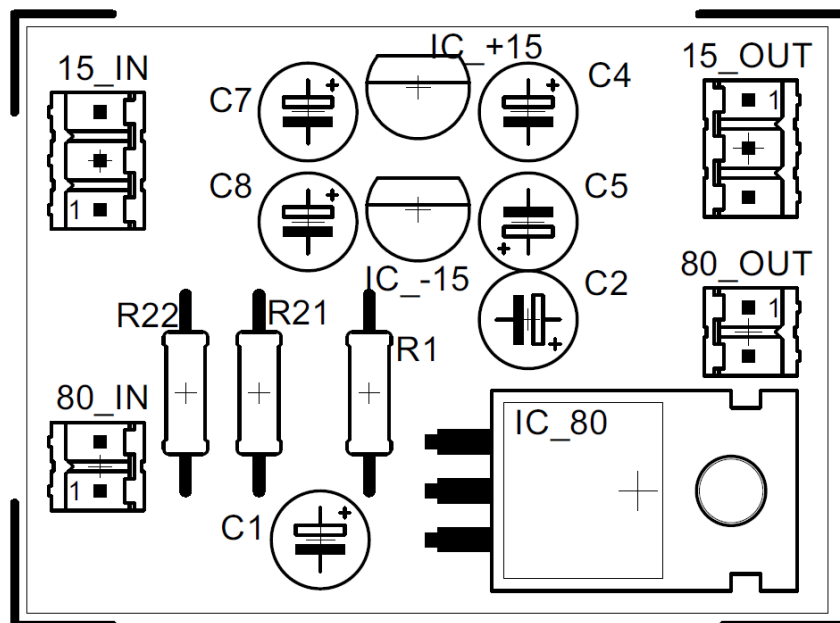


Obr. 9.2 Osazená vrchní a spodní strana DPS ovladače

Obě větve napájecí DPS jsou umístěny tak, aby výstupní konektory stranově korespondovaly s konektory na desce ovladače. Ochranné diody stabilizátorů zapojené z výstupu na vstup jsou pro úsporu místa v SMD provedení a jsou umístěny přímo mezi vývody stabilizátorů.



Obr. 9.3 Konstrukční návrh vrchní a spodní strany napájecí DPS, 1:1



Obr. 9.4 Osazovací plán napájecí DPS

V původním návrhu napájecí desky byly navíc umístěny elektrolytické kondenzátory u vstupních konektorů jednotlivých větví. Pro krátkou vzdálenost mezi konektory a stabilizátory (a tedy nadbytečnost) však byly vypuštěny, na již vyrobené desce nejsou osazeny a z návrhu byly smazány.

Konektory pro připojení manipulátoru (koaxiální BNC konektor pro napájení aktuátoru a D-Sub konektor pro připojení zpětné vazby) jsou umístěny vpravo při pohledu na popsanou stranu DPS. Jsou dostatečně předsazené od kraje, aby bylo možné je prostrčit otvorem v případě umístění DPS do konstrukčního boxu. BNC konektor byl zvolen pro svoji robustnost a odolnost vůči mechanickému poškození během častého připojování a odpojování. Mezi ovladačem a manipulátorem je užitá koaxiální redukce z BNC na SMC konektor.

Na levé straně se nachází konektory pro přívod napájecích napětí, sběrnice I²C a obdélníkového signálu. Napájení vysokonapěťového zesilovače a synchronního detektoru je provedeno externí DPS s příslušnými stabilizátory napětí, napájení D/A a A/D převodníků je přivedeno z mikroprocesorové platformy Arduino. Ke stejnému napájení jsou připojeny i pull-up rezistory sběrnice I²C. Veškeré napájení je na DPS

přivedeno pomocí tzv. pinheader konektorů. Stejné konektory jsou užity i jako měřicí body. Všechny pinheader konektory jsou pro přehlednost a eliminaci chyby zapojení označeny vyleptaným textem na spodní straně desky.

Přívod napětí +80 V je oddáleno od nízkonapěťové části. Rezistory vytvářející kladnou zpětnou vazbu zesilovače jsou připojeny na zem signálovou. Pouzdra rezistorů byla schválně zvolena větší pro případ potřeby výměny z důvodu úpravy nastavení zesílení. Větší pouzdra jsou sice prostorově náročnější, ale je s nimi snazší manipulace.

Zpětnovazební signál vstupuje na DPS D-Sub konektorem, přes který je přivedeno $\pm 15V$ napájení zesilovače vestavěného v manipulátoru a obdélníkový signál na tenzometrický můstek. Před vstupem synchronního detektoru je umístěna propojka a kontaktní bod pro měření. Za synchronním detektorem se opět nachází kontaktní bod a propojka. Ta odděluje výstup synchronního detektoru od A/D převodníku. A/D převodník je napájen 5 V z mikroprocesorové platformy (stejně jako D/A převodník).

10. SOFTWAREVÁ ČÁST

Software je rozdělen na dvě části. První část je vytvořena ve vývojovém prostředí Arduino IDE a slouží pro nastavení posuvu aktuátoru, číslicové zpracování zpětnovazebního signálu, realizaci PSD regulátoru. Druhá část je vytvořena ve vývojovém prostředí Processing 3 a vytváří grafické rozhraní pro ovládání manipulátoru z počítače a pomocí příkazů odesílaných přes USB rozhraní linku řídí nastavení posuvu aktuátoru.

10.1 Software pro řízení ovladače z počítače

Pro vytvoření grafického prostředí je vhodné vývojové prostředí Processing 3, jenž umožňuje programování grafických objektů. Jedná se o open source vývojové prostředí, jehož základem je programovací jazyk Java. Ten je zjednodušen do podoby vlastního programovacího jazyka Processing. K volnému použití je značná spousta open source knihoven vytvořená programátory sdružujících se do komunity Processing Foundation. Dostupné jsou přes odkazy na stránkách Processingu [34].

Pro potřeby vytvoření grafického rozhraní ovladače aktuátoru byla použita knihovna ControlP5 od umělce a vývojáře Andrease Schlegela [26]. Tato knihovna umožňuje vytvoření různých ovládacích prvků, jako jsou tlačítka, přepínače, posuvníky, zobrazovače hodnot, seznamy a další.

Na obrázku 10.1 je grafické prostředí ovládacího programu. Zdrojový kód programu je v příloze 7. Pro ovládání aktuátoru jsou použita tlačítka pro kroky o velikosti 5, 10, 100 a 1000 nm. Pro jednu velikost jsou vždy dvě tlačítka, pro zvyšování a snižování hodnoty posunu. Vzhledem k tomu, že symboly „+“ a „-“ jsou v programovacím jazyku vyhrazeny pro matematické operace, není možné je použít pro název funkce, která se spouští po stisku tlačítka. Tyto symboly jsou nahrazeny písmeny „P“ pro plus a „M“ pro minus. Dále jsou vytvořena tři tlačítka pro posun do minimální, maximální a nulové pozice. Nulová pozice je softwarově vytvořený střed maximální fyzické délky posuvu, aktuátor je roztažen na polovinu své délky. Maximální posuv aktuátoru je 20 μm , ovladač je tedy softwarově realizován od -10 μm do +10 μm . Pod těmito tlačítky se nachází numerický ukazatel aktuální polohy aktuátoru. Níže se po celé šířce okna programu nachází grafický ukazatel aktuální polohy s červenou ryskou vyznačující nulovou polohu.



Obr. 10.1 Grafické rozhraní ovladače piezoaktuátoru

Forma rozhraní pomocí tlačítek s jednotlivými kroky byla zvolena z důvodu nemožnosti znát přesnou hodnotu požadovaného posuvu. V případě zadávání numerické hodnoty by bylo nutné při každé změně posuvu tuto hodnotu přepisovat. Pomocí tlačítek stačí pouze klikáním posouvat o požadovaný krok.

Tento program je čistě jen ovládací. Po stisku tlačítka se přes USB rozhraní odesílá příkaz, který je reprezentován znakem abecedy. Tento znak je přijímán mikroprocesorovou platformou, která na jeho základě vyhodnotí příkaz a následně vykoná posuv v určitém kroku.

10.2 Software pro mikroprocesorovou platformu

Veškerý běh řídicího programu probíhá na mikroprocesorové platformě. Byla zvolena mikroprocesorová platforma Arduino Uno. Důvodem pro užití platformy z rodiny Arduino byla jeho jednoduchost použití, cenová dostupnost a rozšířenost v různých aplikacích. Právě díky velké rozšířenosti mezi odborníky i laiky existuje velké množství knihoven pro různé využití. Vývojové prostředí Arduino IDE udává velikost programu ovladače řídicího jeden kanál manipulátoru na 5818 bytů, což je 18 % úložného místa pro program. Globální proměnné zabírají 441 bytů, to odpovídá 21 % dynamické paměti. Volba verze Uno je naprosto dostačující pro realizaci jednoduchého ovladače piezoaktuátoru a má dostatečnou paměťovou rezervu i pro řízení dalších kanálů manipulátoru. Hlavními funkcemi jsou přepočítání požadované hodnoty posuvu aktuátoru, nastavení výstupu D/A převodníku, vyčítání hodnoty A/D převodníku, korekce zpětnovazebního signálu a realizace PSD regulátoru. Zdrojový kód programu je v příloze 8.

Pro sériovou komunikaci je užita knihovna „Wire“, kterou obsahuje Arduino IDE už v základu [35]. Ta je potřeba pro komunikaci po sběrnici I²C s D/A a A/D převodníky. S její pomocí fungují i další užité knihovny pro ovládání D/A a A/D převodníků.

Z USB rozhraní získává Arduino i příkazy z ovládacího programu, kterými se nastavuje požadovaná hodnota posuvu tzv. setpoint. Vzhledem k povaze celé logiky nastavování pomocí zvyšování či snižování o určitou velikost kroku by se mohlo stát, že se výpočet požadované hodnoty dostane nad nebo pod meze pro nastavení hodnoty výstupu D/A převodníku. To by způsobilo přetečení rozsahu a tím ztrátu funkce celého ovladače. Pro zamezení tohoto stavu je na konci výpočtu zavedena limitace, která udržuje hodnotu výstupu v daných mezích.

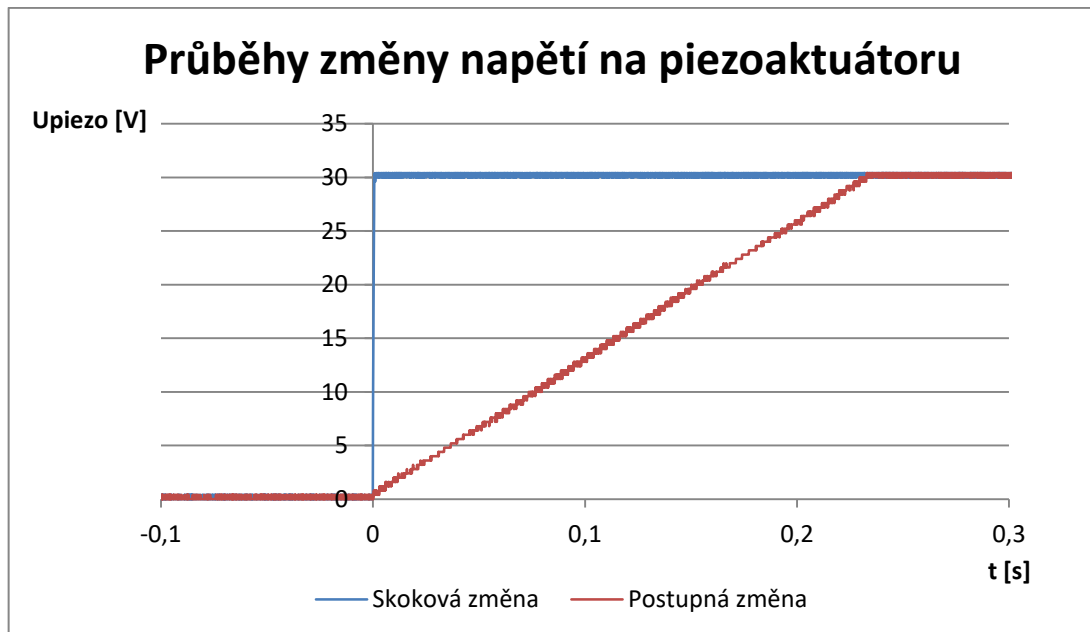
Pro vyčítání hodnot z A/D převodníku slouží knihovna „MCP3421“, jejímž autorem je Martin Nawrath [28]. Tato knihovna také zprostředkovává komunikaci přes sběrnici I²C, umožňuje nastavení různých adres jednotlivých zařízení, nastavení bitové hloubky A/D převodu a nastavení zesílení vestavěným PGA zesilovačem. Obsahuje funkce pro vrácení buď číselné hodnoty převodu, nebo již přepočítanou hodnotu napětí na vstupu převodníku. Pro softwarové zpracování zpětné vazby je použita funkce vracející číselnou hodnotu převodu. Od této hodnoty je následně odečtena hodnota offsetu, který je popsán v kapitole 8.2. Následně je již kalibrovaná hodnota A/D převodu korigována na 12bitovou hodnotu, která je tedy rozsahově shodná s hodnotou pro nastavení výstupu D/A převodníku. Po této úpravě je možné porovnání obou hodnot a provedení PSD regulace.

Pro vytvoření PSD (PID) regulátoru existuje knihovna „PIDv1“ od Bretta Beauregarda [29]. Ta je ovšem přizpůsobena pro řízení motorů a jiných zařízení pomocí PWM přes digitální výstupy Arduina. Pro vytvoření PSD regulátoru ovladače piezoaktuátoru je tedy nevhodná, neboť je potřeba pouze numerický výpočet hodnoty, která bude zpracována D/A převodníkem. Proto byla z knihovny použita a upravena pouze funkce pro výpočet [29], [30]. Funkce provádí výpočet, jenž je matematicky popsán v kapitole 6.2.5. Během výpočtu je možné, že se výsledek výpočtu korekce dostane nad nebo pod meze pro nastavení hodnoty výstupu D/A převodníku, podobně jako při nastavování požadované hodnoty. I v této části jsou zavedeny podobné limitace, aby se nastavení výstupu udrželo v daných mezích.

Pro nastavení D/A převodníku je užita knihovna „Adafruit_MCP4725“ vytvořená sdružením Adafruit [27]. Tato knihovna zprostředkovává komunikaci mezi převodníkem a Arduinem pomocí sběrnice I²C. Umožňuje nastavení různých adres jednotlivých zařízení. Výstupní napětí převodníku se nastavuje číselnou hodnotou od 0 do 4095, která koresponduje s jednotlivými napěťovými hladinami převodníku. Zároveň umožňuje příkaz, zda se má hodnota ukládat do vestavěné paměti převodníku či nikoliv.

Při nastavování napětí z D/A regulátoru po výpočtu PSD regulátoru je změna napětí skoková, což způsobuje velice prudké deformace piezomateriálu. Při této skokové změně byla z manipulátoru slyšet zvuková odezva (hlasité „cvaknutí“). Čím větší byla provedena změna napětí, tím hlasitěji bylo toto „cvaknutí“ patrné. Již poslechem a subjektivním vnímáním je cítit nadměrné zatěžování piezomateriálu způsobené těmito

prudkými změnami. Z tohoto důvodu je v programu zavedena smyčka pro zpomalení nástupné či sestupné hrany. Díky tomuto opatření se aktuátor rozpíná mnohem plynuleji, neboť každá změna probíhá postupnými skoky, jejichž velikost je vždy jen o jednu úroveň D/A převodu. V grafu 10.1 jsou zobrazeny průběhy řídicího napětí při změně z 0 V na 30 V s použitím a bez použití smyčky pro zpomalení hrany.



Graf 10.1 Průběhy změny napětí na piezoaktuátoru

11. POSTUP ZPROVOZNĚNÍ OVLADAČE

Deska je vyrobena jako dvouvrstvá, ale nebyla vyrobena s prokovy. Nejdříve tedy byly vytvořeny všechny spoje mezi vrchní a spodní deskou a propojení napěťové a signálové země. Poté byly osazeny všechny pasivní součástky. Následovalo ožívování jednotlivých integrovaných obvodů, které byly zatím odděleny neosazenými propojkami.

Jako první byl na desku osazen D/A převodník. Nejprve byla vyzkoušena komunikace pomocí I²C Scanneru, jehož autorem je Nick Gammon [31]. Po vyzkoušení komunikace byl již vytvořen jednoduchý program pro nastavení výstupu D/A převodníku. Výstupní napětí bylo měřeno přes kontaktní bod za D/A převodníkem.

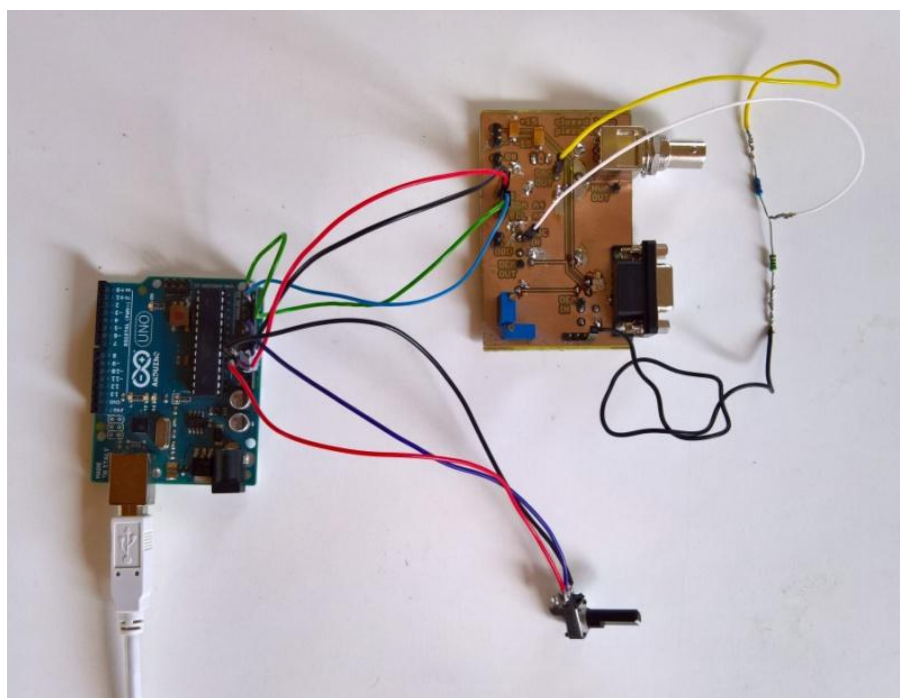
Po zprovoznění D/A převodníku byl osazen vysokonapěťový zesilovač a na jeho vstup byl propojkou připojen výstup již funkčního D/A převodníku. Následně bylo otestováno, zda je napětí zesíleno dle požadavků. Takto byla zprovozněna větev pro řízení napájení aktuátoru.

Následovalo zprovoznění analogové části zpětnovazební větve. Nejdříve byl osazen A/D převodník. Opět byla vyzkoušena komunikace pomocí I²C Scanneru. Poté byl vytvořen jednoduchý program pro vyčítání hodnoty A/D převodu. Na jeho vstup bylo přivedeno napětí ze stabilizovaného laboratorního zdroje. Toto napětí bylo zároveň měřeno multimetrem pro porovnání hodnoty nastavované zdrojem a vyčítané převodníkem.

Na závěr byl osazen synchronní detektor. Obdélníkový signál byl přiváděn na referenční vstup a propojkou D-Sub konektoru zároveň na signálový vstup. Tím byla ověřena jeho správná funkce. Poté však nebyl propojkou spojen se vstupem A/D převodníku.

Následovalo vytvoření softwarového PSD regulátoru. Pro tento účel byl sestrojen jednoduchý odporový dělič složený s odporů o hodnotách 2,2 k Ω a 1,5 k Ω , jak je možné vidět na obrázku 11.1. Pro účel vývoje PSD regulátoru nebyl využit zesílený napájecí signál, ale pouze výstup D/A převodníku. Napětí z D/A převodníku o maximální hodnotě 5 V bylo sníženo na napětí 2 V pro přivedení na vstup A/D převodníku. Úkolem děliče bylo zjednodušeně simulovat změnu zpětnovazebního signálu v závislosti na změně napájecího napětí. Nejprve byly složeny programy pro načítání hodnot do D/A převodníku a vyčítání hodnot z A/D převodníku do jednoho.

Tento složený program se stal základem pro další rozšiřování. Nejprve bylo potřeba zavést nastavování hodnoty D/A převodníku v průběhu běhu programu. Bylo využito 10bitového A/D převodníku platformy Arduino a externího potenciometru. Tím bylo možné nastavovat 1024 hodnot, které byly násobením čtyřmi převedeny na rozsah do 4096. Prakticky tím byl 12bitový rozsah D/A převodníku snížen na 10bitový, pro potřeby zkoušení a vývoje bylo toto řešení dostačující. Dalším krokem to byla korekce vyčtené číselné hodnoty A/D převodu na hodnotu korespondující s nastavením D/A převodníku a výpočet rozdílu mezi nastavením a vyčtením. Tento rozdíl byl poté využit pro snahu o korekci nastavení D/A převodníku pouhým odečtením rozdílové hodnoty, avšak bez PSD regulátoru došlo k rozkmitání. Následovala tedy implementace funkce pro PSD regulátor.



Obr. 11.1. Zkušební zapojení s potenciometrem a odporovým děličem

Po úspěšném zpracování PSD regulátoru bylo možné nahradit testovací odporový dělič za manipulátor. K tomu bylo nutné propojit poslední zbývající část, tedy výstup synchronního detektoru a vstup A/D převodníku. Poté muselo dojít k posledním úpravám programu – softwarovou část úpravy zpětnovazebního signálu a úpravu průběhu změny napětí na aktuátoru.

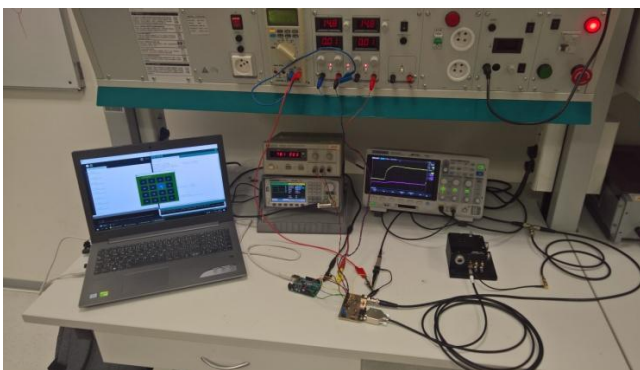
Na závěr byl vytvořen ovládací program pro počítač, čímž bylo nahrazeno ovládání potenciometrem. Tím bylo nastavování hodnot řídicího napětí zpřesněno z 10bitového na 12bitové.

12. OVĚŘENÍ FUNKCE OVLADAČE

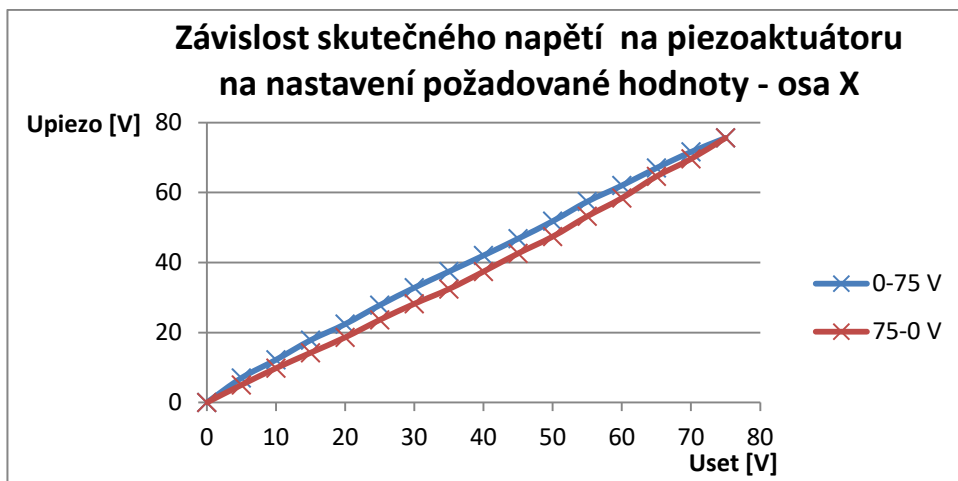
Pro ověření funkce regulátoru bylo provedeno stejné měření, jako při ověřování charakteristik piezoaktuátorů, tedy nepřímé měření posuvu odečítáním zpětnovazebního signálu. Dále bylo provedeno přímé měření pomocí laserového světla, interferometru a fotodiody.

Pro potřeby nepřímého měření byl upraven ovládací program, aby umožňoval měření dle napětí na aktuátoru od 0 V do 75 V s krokem 5 V. Jeho grafické rozhraní je na obrázku 12.1. Nastavení těchto hodnot je pouze předpoklad pro lineární systém a zavedeno je především pro přehlednou orientaci při porovnávání měření bez regulátoru a s regulátorem. Je to tedy nastavování požadované hodnoty PSD regulátoru, nikoliv skutečné hodnoty napětí na aktuátoru. Skutečné napětí má hysterezi v opačném smyslu, než je rozpínání a smršťování aktuátoru bez použití regulátoru. Průběh tohoto skutečného napětí byl také změřen, graf a z nich vytvořené grafy 12.1 až 12.3. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách P2.1 a P2.2 v příloze 2.

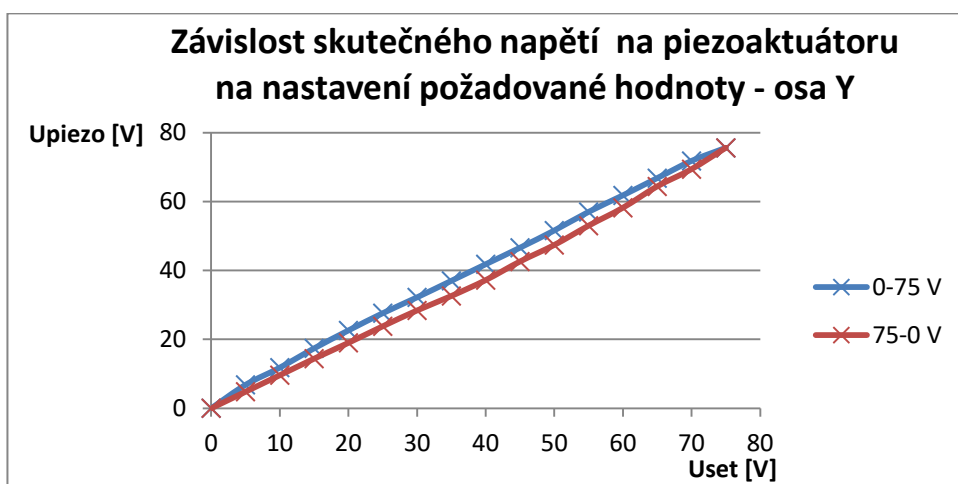
Pro buzení tenzometrického můstku byl užit střídavý obdélníkový signál s frekvencí 1 kHz a nastavenou maximální hodnotou 1 V. Připojením signálu k manipulátoru dojde k zatížení a napětí klesne na 0,8 V. 18bitový A/D převodník má však dostatečnou bitovou rezervu pro zpracování i sníženého signálu bez omezení přesnosti. Byla provedena tři měření, pro každou osu manipulátoru zvlášť. V grafech 12.4 až 12.6 je patrná eliminace hystereze piezoaktuátorů v porovnání s grafy 6.1 až 6.3. Hodnoty z tohoto měření jsou uvedeny v tabulkách P3.1 a P3.2 příloze 2. Měřicí pracoviště pro nepřímé měření je vidět na obrázku 12.2.



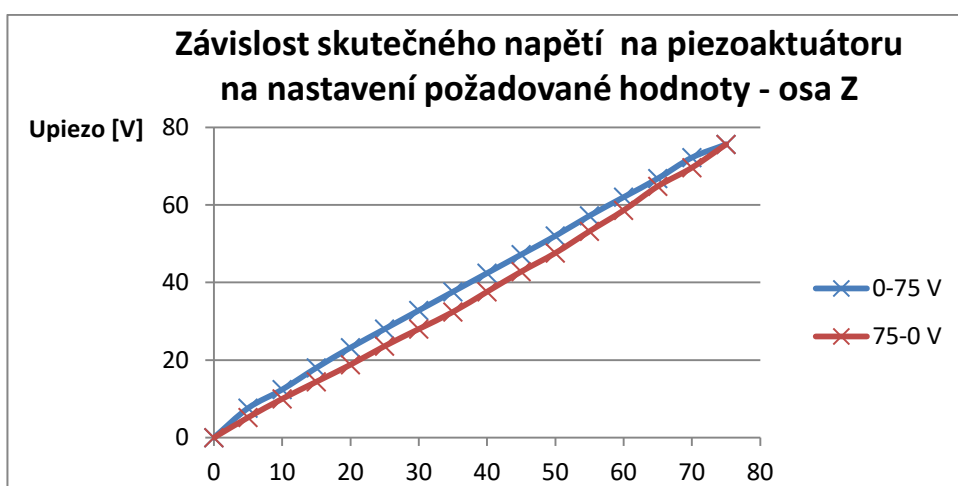
Obr. 12.1 Program pro měření **Obr. 12.2 Pracoviště pro nepřímé měření**



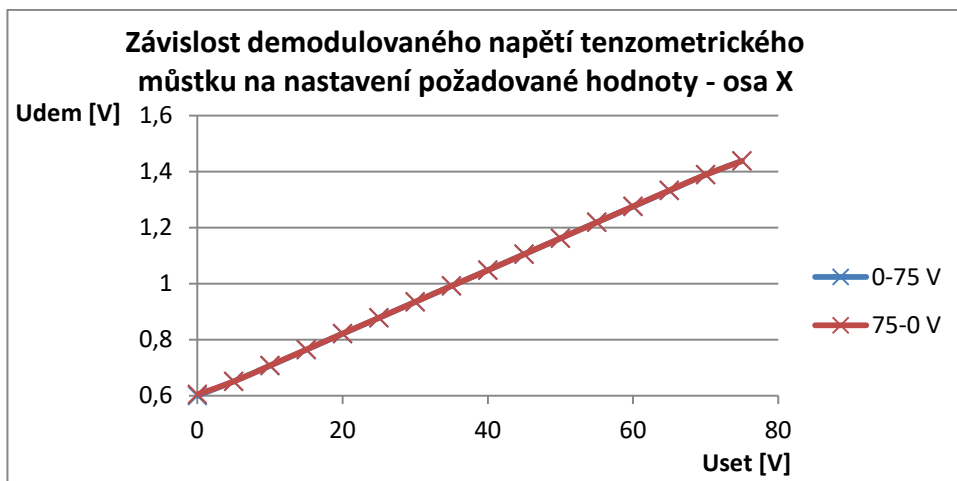
**Graf 12.1 Závislost skutečného napětí na piezoaktuátoru
na nastavení požadované hodnoty – osa X**



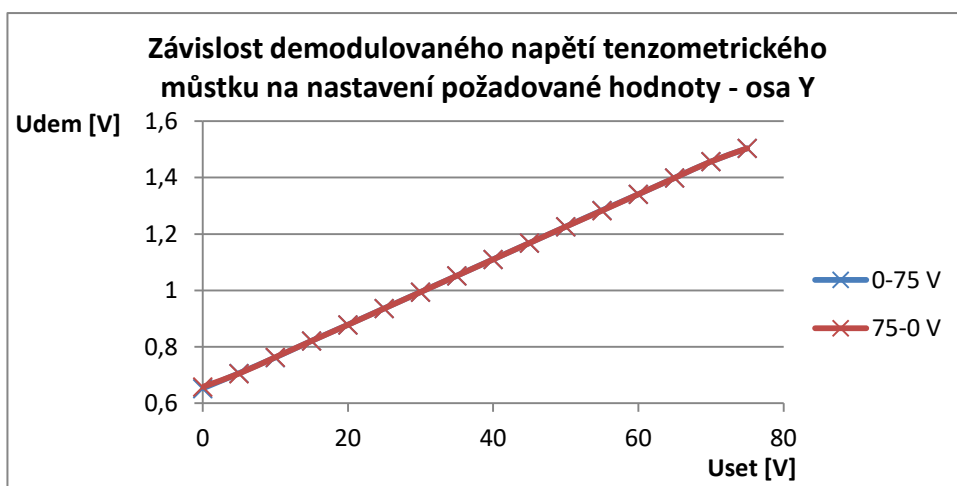
**Graf 12.2 Závislost skutečného napětí na piezoaktuátoru
na nastavení požadované hodnoty – osa Y**



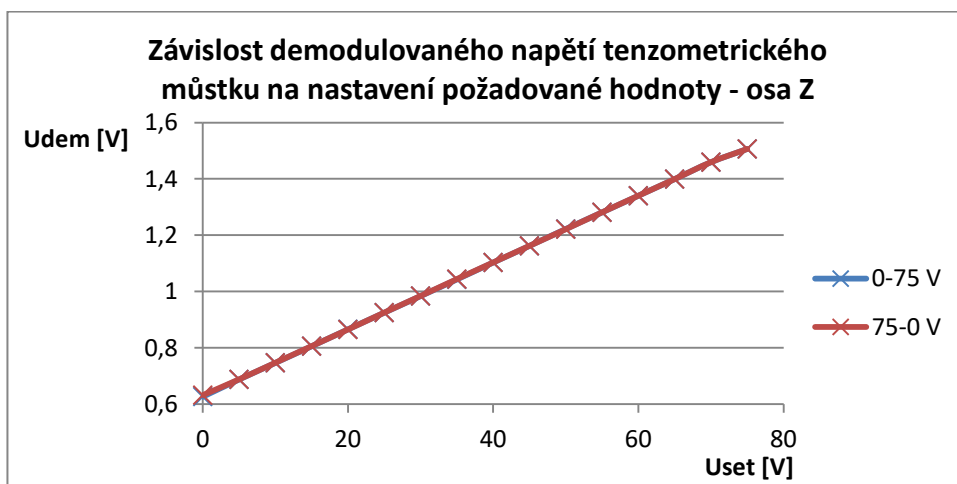
**Graf 12.3 Závislost skutečného napětí na piezoaktuátoru
na nastavení požadované hodnoty – osa Z**



Graf 12.4 Závislost demodulovaného napětí tenzometrického můstku na nastavení požadované hodnoty – osa X

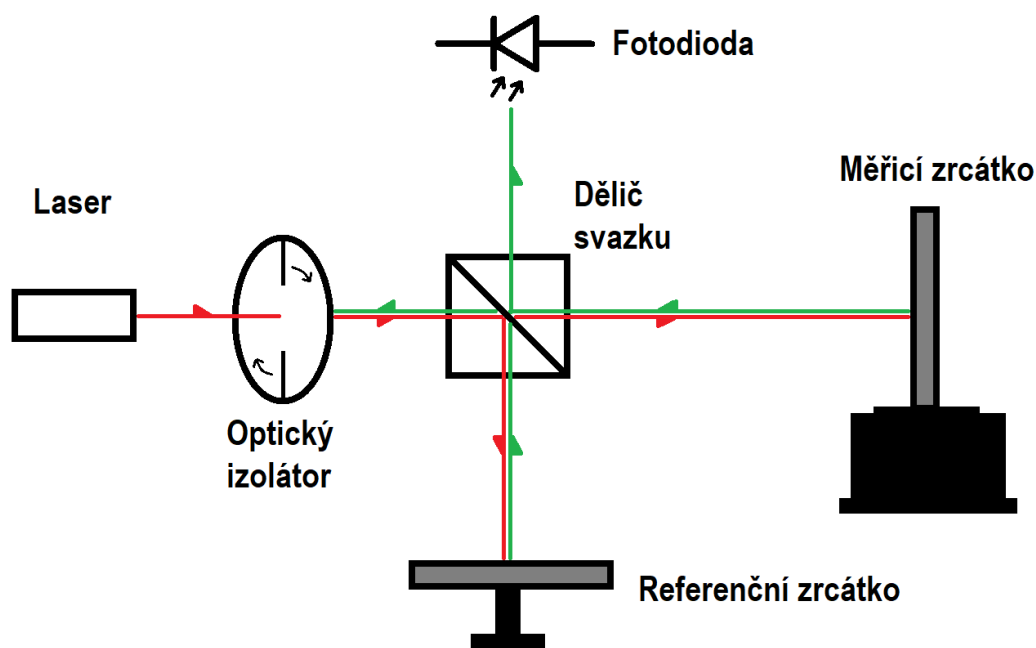


Graf 12.5 Závislost demodulovaného napětí tenzometrického můstku na nastavení požadované hodnoty – osa Y



Graf 12.6 Závislost demodulovaného napětí tenzometrického můstku na nastavení požadované hodnoty – osa Z

Po nepřímém měření pomocí odečítání demodulovaného napětí z tenzometrického snímače bylo provedeno přímé optické měření posuvu pomocí Michelsonova interferometru. Jeho schematické znázornění je na obrázku 12.3. Interferometr pracuje na principu rozdělení jednoho optického svazku do dvou, referenčního a měřicího. Oba paprsky se po odrazu od zrcátek opět spojují a dochází mezi nimi k interferenci a to buď konstruktivní (maximum), nebo destruktivní (minimum) podle polohy měřicího zrcátka. Při plynulém pohybu měřicího zrcátka jedním směrem nabývá intenzita světla sinusového průběhu.



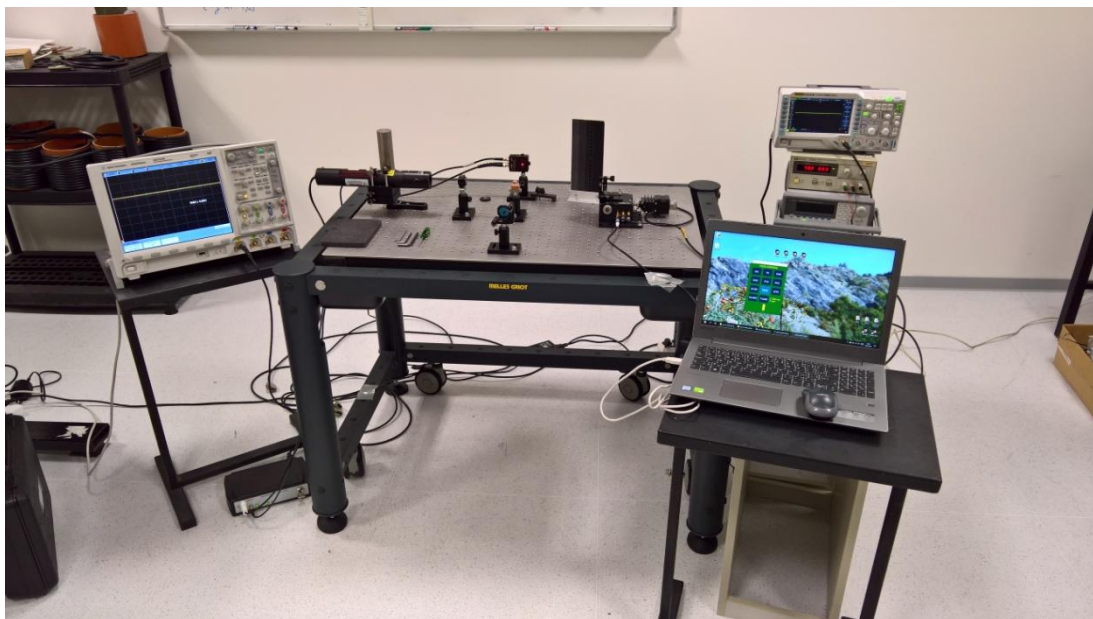
Obr. 12.3 Schéma Michelsonova interferometru

Vzdálenost maxim (nebo minim) je dána vztahem [32]:

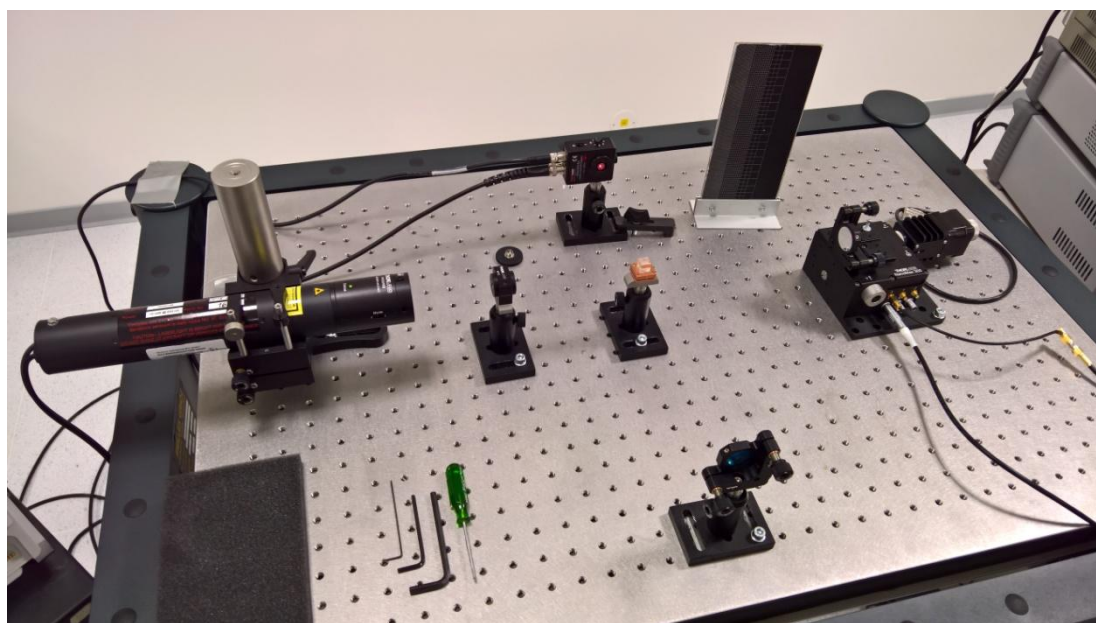
$$\Delta x = \frac{\lambda N}{2} \quad (12.1)$$

kde Δx je vzdálenost maxim (minim), λ je vlnová délka a N je pořadí maxim (minim). Z toho je patrné, že vzdálenost dvou maxim (minim) je $\lambda/2$. Vzdálenost maxima a minima je tedy $\lambda/4$.

Měřicí zrcátko bylo připevněno na vrchní desku manipulátoru. Pro účely měření byl použit He-Ne laser Thorlabs HRS015B o vakuové vlnové délce 632,991 nm. Vzdálenost maxima a minima tedy dle výpočtu vychází přibližně na 158,25 nm. Na obrázku 12.4 je sestavené měřicí pracoviště s interferometrem, na obrázku 12.5 je detailní pohled na interferometr.



Obr. 12.4 Měřicí pracoviště s Michelsonovým interferometrem



Obr. 12.5 Detail Michelsonova interferometru

Měření s nanometrovou přesností je však velice náchylné na stabilitu celého optického systému. Těsně za laser bylo třeba umístit optický izolátor, který zamezoval zpětným odrazům laserového svazku zpět do laseru. Ty totiž způsobovaly nestabilitu laseru. Dalším problémem byly mechanické otřesy. Ačkoliv byl interferometr postaven na speciálním stole pro optické měření a všechny součásti interferometru byly pevně přišroubovány, nebylo možné veškeré otřesy a vibrace úplně eliminovat. Všechny přívodní kabely k laseru, manipulátoru a fotodiodě byly přilepeny páskou, neboť otřesy kabelů se přenášely dále na jednotlivé přístroje. Vliv měly také otřesy způsobené průchodem osob a případné vibrace budovy. Proto byl během měření co nejvíce omezen

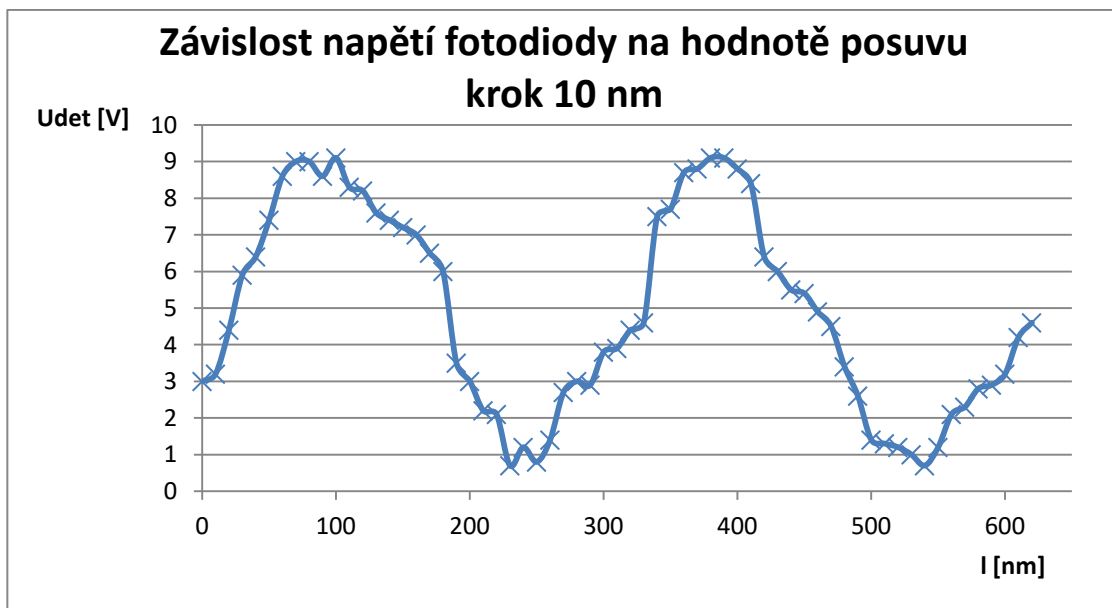
pohyb osob v blízkosti interferometru. Bylo zjištěno, že vliv má i proudění vzduchu, laboratorní přístroje byly umístěny tak, aby jejich chladicí ventilátory vyfukovaly vzduch mimo prostor s interferometrem. I přestože je speciální stolní deska velice pevná, při stlačení se mohla projevit deformace materiálu a následné rozladění optického systému. Proto se na ní nacházel pouze interferometr a během měření se jí nesmělo dotýkat.

Přes všechna opatření nebylo možné minimalizovat vibrace do té míry, aby bylo možné provést přesné měření s nejmenším krokem posunu. Hodnota napětí detekovaného fotodiodou kolísala v různém rozsahu, který byl ovlivněn zbytkovými vibracemi a případným prouděním vzduchu. Při krokování po 5 nm byla na obrazovce osciloskopu při dlouhodobém pozorování patrná změna polohy rozkmitu, avšak přesné odečítání nebylo možné. Tento problém by se dal vyřešit použitím těžkého stolu s masivní kameninovou deskou, vícebodové pevné uchycení kabelů, vzdálení obsluhy (ideálně do vedlejší místnosti), omezení pohybu dalších osob i v blízkém okolí laboratoře, zamezením proudění vzduchu uzavřením do boxu bez otvorů a přestěhováním celého měřicího pracoviště k základům budovy.

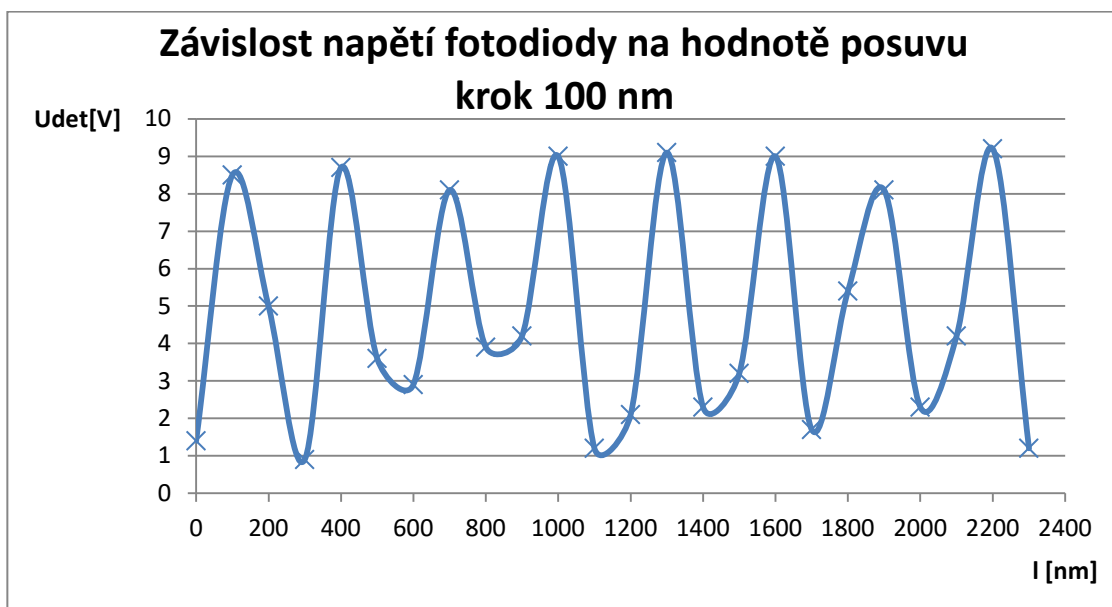
Nejprve bylo provedeno měření s kroky po 10 nm. Bylo provedeno 63 kroků, aby byla obsažena celá vlnová délka světla (tedy dvě periody sinusového průběhu změny intenzity vlivem interference při pohybu měřicího zrcátka). Na grafu 12.7 je vidět sinusový průběh intenzity, je však zřetelná nestabilita celého měření. Vzdálenost minima a maxima je ovšem dobře patrná, vychází na 15 – 16 kroků. Velice názorná je vzdálenost minima a maxima při posuvu od hodnoty 90 nm do 250 nm, což přibližně odpovídá vypočítané teoretické hodnotě 158,25 nm. Hodnoty z tohoto měření jsou uvedeny v tabulce P4.1. Tabulka P4.1 v příloze 4 je rozdělena právě podle vzdálenosti maxima a minima. Tímto měřením byla ověřena a potvrzena přesnost posuvu s krokem 10 nm.

Dále bylo provedeno měření s kroky po 100 nm. Došlo prakticky k podvzorkování sinusového průběhu intenzity, který je vidět na grafu 12.8. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce P4.2 v příloze 4. Opět je patrná vzdálenost mezi maximem a minimem, v tomto případě po jednom a půl kroku (150 – 160 nm), což také odpovídá vypočítané teoretické hodnotě. Také tedy byla ověřena a potvrzena přesnost posuvu s krokem 100 nm. Interferometrická měření byla provedena pouze pro osu X. Osy Y a Z jsou dle poznatků z nepřímého měření tenzometrem totožné.

Hodnota řídicího napětí byla stabilní a nekolísala. Při pozorování zesíleného řídicího napětí osciloskopem bylo možné pozorovat drobný šum, který taktéž mohl ovlivnit přesnost měření. Ten by bylo možné odstranit dodatečně zařazenou dolní propustí.



Graf 12.7 Závislost napětí fotodiody na hodnotě posuvu – krok 10 nm



Graf 12.8 Závislost napětí fotodiody na hodnotě posuvu – krok 100 nm

Závěr

V teoretické části této diplomové práce byly popsány ovládací prvky manipulátoru Thorlabs MAX 341/M s důrazem na vestavěné piezoelektrické aktuátory. Dále byl vysvětlen piezoelektrický jev a jeho použití v technické praxi, následně byly rozebrány jednotlivé druhy piezoelektrických aktuátorů. Poté byl objasněn princip realizace zpětné vazby za pomoci signálu odečítaného z tenzometrického snímače. Na závěr teoretické části byly představeny možné způsoby řešení ovladače pro piezoaktuátory.

V praktické části bylo nejdříve provedeno měření charakteristik aktuátorů všech tří os a fázového posuvu mezi referenčním a zpětnovazebním signálem. Dalším krokem bylo vypracování obvodového návrhu zpětnovazebního ovladače pro piezoaktuátory. Návrh se opírá o informace získané z měření a z výrobcem zadaných parametrů. Dále byl zpracován a poté realizován konstrukční návrh vycházející z obvodového návrhu a aplikačních poznámek poskytovaných výrobcí jednotlivých integrovaných obvodů. Po osazení všech součástek byly postupně zprovozněny a zkoušeny jednotlivé části ovladače. Po ověření funkčnosti všech částí došlo k jejich propojení a tedy sestavení celého ovladače.

Dalším krokem byla realizace softwarové části ovladače určené pro mikroprocesorovou platformu. Postup byl obdobný jako při zprovoznování hardwarové části. Zpočátku formou separátních testovacích programů pro jednotlivé funkce a následně průběžné spojování do kompletního programu. Po dokončení software pro mikroprocesorovou platformu byl vytvořen ovládací program pro počítač. Tímto byl ovladač pro piezoaktuátory dokončen a bylo možno přejít k ověření funkčnosti.

Bylo provedeno několik druhů měření. Nejprve to bylo nepřímé měření zpětnovazebního signálu, obdobně jako při úvodním měření charakteristik aktuátorů. Tímto měřením byla potvrzena eliminace hystereze rozpínání a smršťování aktuátoru. Měření napětí na aktuátoru dokázalo, že jeho průběh má charakter inverzní k hysterezní dilatační charakteristice aktuátoru, což umožňuje linearizaci posuvu. Po ověření funkčnosti ovladače následovalo optické měření pomocí interferometru za účelem stanovení přesnosti posuvu. Toto měření bylo ovlivněno mnoha mechanickými vlivy a bohužel se jej nepodařilo provést pro 5nm krok posuvu. Pro 10nm krok se již měření podařilo a byla ověřena přesnost posuvu v tomto rozsahu. Poté byla přesnost ověřena i pomocí měření 100nm krokem na delším rozsahu posuvu.

Dalším možným krokem vývoje navrženého ovladače by mohlo být sestavení do finálního laboratorního zařízení. Pro to se nabízí několik možných řešení. Buď to může být jeden tříkanálový ovladač, nebo tři nezávislé jednocanálové ovladače. Případně může být provedena kombinace těchto řešení, například dvoukanálový ovladač pro horizontální posuv v osách X a Y a dodatečně připojitelný jednocanálový ovladač pro vertikální posuv v ose Z. Výběr nejlepšího řešení závisí na potřebách měření a způsobu používání v laboratoři. Po výběru nejvhodnějšího provedení ovladače budou doplněny napájecí obvody a interní zdroj buzení tenzometrického můstku. Na závěr se propojí řízení piezoaktuátorů s řízením krokových motorů, které je v tuto chvíli funkčně vyřešeno na oddělené platformě Arduino Uno.

Literatura

- [1] MAX300 Series, NanoMax 3-Axis Flexure Stage - User Guide. [online]. 2018 [cit.2018-10-12]. Dostupné z: www.thorlabs.com/drawings/8b8a763e2a1f82c4-51EFB386-AF11-6D11-A3BD2852B5CCF70C/MAX341-Manual.pdf
- [2] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1.
- [3] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.
- [4] PETRŽÍLKA, Václav a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Piezelektrina a její použití v technické praxi ...* V Praze: Jednota českých matematiků a fyziků, 1940. Cesta k vědě (Jednota českých matematiků a fyziků).
- [5] Krokové motory 1 - typy motorů. Robodoupě [online]. 2013 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: robodoupe.cz/2013/krokove-motory-1-typy-motoru/
- [6] Piezoelectric Tutorial. Thorlabs. [online]. 2018 [cit. 2018-11-26] Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5030
- [7] Advanced Ceramics in Piezo Applications. Ceramtec GmbH. [online]. 2018 [cit. 2018-10-04] Dostupné z: www.ceramtec.com/files/mf_broschure-piezoapplications_en_de.pdf
- [8] Piezoelectric Actuator Technology. Texas Instruments. [online]. 2016 [cit. 2018-09-26] Dostupné z: training.ti.com/piezoelectric-actuator-technology-audio-actuator-technology
- [9] PUSTKA, Martin a Jaroslav NOSEK. *Piezelektrický aktuátor na bázi relaxorů PZN-PT* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: www.aei.tuke.sk/papers/2002/2/NOSEK.pdf
- [10] Displacement Modes of Piezoelectric Actuators. PI. [online]. 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: www.piceramic.com/en/piezo-technology/properties-piezo-actuators/displacement-modes
- [11] AMP 002 Strain Gauge Pre Amplifier. [online]. 2017 [cit.2018-10-12]. Dostupné z: www.thorlabs.com/drawings/8b8a763e2a1f82c4-51EFB386-AF11-6D11-A3BD2852B5CCF70C/AMP002-Manual.pdf
- [12] Closed Loop Piezoelectric Stack Fitted with Strain Gauge, 150 V, 38.5 μm . [online]. 2017 [cit.2018-10-12]. Dostupné z: www.thorlabs.com/drawings/aa685213a7f25d40-61D8A459-955B-ACEB-08A01BF0DFAD5C66/PK4FYC2-SpecSheet.pdf

- [13] 150V USB Closed-Loop Piezo Controllers. Thorlabs. [online]. 2018 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: www.thorlabs.com/drawings/aa685213a7f25d40-61D8A459-955B-ACEB-08A01BF0DFAD5C66/BPC303-APTManual.pdf
- [14] PD32 – 32 Channel Piezo Driver. Piezodrive. [online]. 2018 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: www.piezodrive.com/wp-content/uploads/2018/11/PD32Manual_V4_R1.pdf
- [15] DRV2700EVM High Voltage Piezo Driver Evaluation Kit. Texas Instruments. [online]. 2018 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: www.ti.com/lit/ug/slou403c/slou403c.pdf
- [16] Piezomaster VP7206. Viking Industrial Products. [online]. 2018 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: www.piezomaster.com
- [17] Accessories for Flexure Stages. Thorlabs. [online]. 2018 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: www.thorlabs.com/navigation.cfm?Guide_ID=144
- [18] Piezo Transducers: Flexure Actuators, Piezo Stacks, Tubes, Bimorph Benders, Shear Actuators... PI. [online]. 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: www.pi-usa.us/en/products/piezo-actuators-stacks-benders-tubes/#c60955
- [19] VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Základy automatické regulace*. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.
- [20] Spojité regulátory. Ústav počítačové a řídicí techniky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [online]. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k34-sprg.htm
- [21] JOHNSON, Mark. *Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems*. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 9780071409445.
- [22] Balanced Modulator/Demodulator AD630. Analog Devices. [online]. 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad630.pdf
- [23] Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier. Analog Devices. [online]. 2011 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf
- [24] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-020-2.
- [25] VODA, Zbyšek. *Processing*. Arduino.cz. [online]. 2015 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: arduino.cz/processing/

- [26] SCHLEGEL, Andreas. *controlP5, A GUI library for processing*. Sojamo.de. [online]. 2015 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: www.sojamo.de/libraries/controlP5/
- [27] DICOLA, Tony, REMBOR, Kattni a lady ada. *MCP4725 12-Bit DAC Tutorial*. Adafruit. [online]. 2012 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: learn.adafruit.com/mcp4725-12-bit-dac-tutorial
- [28] NAWRATH, Martin. *Connect a MCP3421 18-Bit Analog-to-Digital Converter to an Arduino Board*. Laboratory for Experimental Computer Science, Academy of Media Arts Cologne. [online]. 2012 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: interface.khm.de/index.php/lab-log/connect-a-mcp3421-18-bit-analog-to-digital-converter-to-an-arduino-board/
- [29] BEAUREGARD, Brett. *Improving the Beginner's PID - Introduction*. brettbeauregard.com. [online]. 2011 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/
- [30] Arduino PID Control Tutorial. Teach Me Micro, [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: www.teachmemicro.com/arduino-pid-control-tutorial/
- [31] GAMMON, Nick. *Arduino quick tip: Find your I2C address*. Henry's Bench. [online]. 2011 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-projects-tips-and-more/arduino-quick-tip-find-your-i2c-address/
- [32] EDU-MINT2 Michelson Interferometer Kit – User Guide. [online]. 2018 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: www.thorlabs.com/drawings/3a3fc2ce6ba2bf8f-5719B330-D79F-1C56-10C5A27A59CDB797/EDU-MINT2_M-EnglishManual.pdf
- [33] RICHTER, Miloslav. *Ziegler-Nicholsonova metoda návrhu regulátorů*. [online]. 2009 [cit. 2019-05-10]. http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/1011_BRR1/labs/zn_reg.html
- [34] Libraries. Extend Processing beyond graphics and images into audio, video, and communication with other devices. Processing. [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: processing.org/reference/libraries/
- [35] Arduino Wire Library. Arduino. [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: www.arduino.cc/en/Reference/Wire

Seznam příloh

Příloha 1 - Tabulky měření bez PSD regulátoru	66
Příloha 2 - Tabulky měření s PSD regulátorem	67
Příloha 3 - Tabulky měření s PSD regulátorem	68
Příloha 4 - Tabulky měření interferometrem	69
Příloha 5 - Obvodový návrh.....	70
Příloha 6 - Osazovací plány DPS ovladače	71
Příloha 7 - Zdrojový kód programu pro počítač	72
Příloha 8 - Zdrojový kód programu pro Arduino.....	76

Příloha 1 - Tabulky měření bez PSD regulátoru

<i>U</i> piezo [V]	<i>U</i> tenzo X [V]	<i>U</i> tenzo Y [V]	<i>U</i> tenzo Z [V]
0	0,70	0,72	0,80
5	0,76	0,76	0,84
15	0,88	0,88	0,96
25	1,02	1,02	1,10
35	1,16	1,16	1,24
45	1,32	1,32	1,40
55	1,48	1,48	1,56
65	1,64	1,64	1,72
75	1,78	1,80	1,88

Tab. P1.1 Měření napětí zpětnovazebního signálu bez použití PSD regulátoru
zvysování napětí na aktuátoru

<i>U</i> piezo [V]	<i>U</i> tenzo X [V]	<i>U</i> tenzo Y [V]	<i>U</i> tenzo Z [V]
75	1,78	1,80	1,88
65	1,68	1,70	1,80
55	1,58	1,58	1,68
45	1,44	1,46	1,54
35	1,30	1,32	1,40
25	1,16	1,16	1,24
15	1,00	1,00	1,08
5	0,82	0,84	0,88
0	0,72	0,72	0,80

Tab. P1.2 Měření napětí zpětnovazebního signálu bez použití PSD regulátoru
snižování napětí na aktuátoru

Příloha 2 - Tabulky měření s PSD regulátorem

<i>U_{set}</i> [V]	<i>U_{piezo X}</i> [V]	<i>U_{piezo Y}</i> [V]	<i>U_{piezo Z}</i> [V]
0	0,0	0,0	0,0
5	7,0	6,8	7,6
10	12,2	11,8	12,4
15	17,8	17,4	18,0
20	22,4	22,6	23,2
25	27,8	27,6	28,0
30	32,8	32,2	32,8
35	37,4	37,0	37,6
40	42,0	41,8	42,4
45	46,8	46,6	47,2
50	51,8	51,6	52,0
55	57,4	57,0	57,2
60	62,0	61,8	62,0
65	67,0	66,8	66,8
70	71,6	71,8	72,2
75	75,6	75,6	75,6

Tab. P2.1 Měření skutečného napětí na aktuátoru s použitím PSD regulátoru zvyšování požadované hodnoty regulátoru

<i>U_{set}</i> [V]	<i>U_{piezo X}</i> [V]	<i>U_{piezo Y}</i> [V]	<i>U_{piezo Z}</i> [V]
75	75,6	75,6	75,6
70	69,6	69,4	69,6
65	64,6	64,4	64,8
60	58,4	58,2	58,6
55	53,2	53,0	53,2
50	47,4	47,4	47,6
45	42,6	42,6	42,8
40	37,4	37,2	37,6
35	32,4	32,6	32,4
30	28,2	28,4	28,0
25	23,6	23,8	23,6
20	18,6	19,0	18,8
15	14,2	14,4	14,4
10	9,8	9,6	10,0
5	5,0	4,8	5,2
0	0,0	0,0	0,0

Tab. P2.2 Měření skutečného napětí na aktuátoru s použitím PSD regulátoru snižování požadované hodnoty regulátoru

Příloha 3 - Tabulky měření s PSD regulátorem

<i>U_{set}</i> [V]	<i>U_{dem}</i> X [V]	<i>U_{dem}</i> Y [V]	<i>U_{dem}</i> Z [V]
0	0,6	0,652	0,627
5	0,651	0,706	0,688
10	0,707	0,762	0,747
15	0,764	0,821	0,806
20	0,821	0,878	0,866
25	0,878	0,936	0,925
30	0,935	0,994	0,984
35	0,992	1,052	1,043
40	1,048	1,11	1,103
45	1,105	1,168	1,162
50	1,162	1,226	1,222
55	1,219	1,284	1,281
60	1,275	1,341	1,34
65	1,332	1,399	1,399
70	1,389	1,457	1,459
75	1,438	1,504	1,506

Tab. P3.1 Měření napětí zpětnovazebního signálu s použitím PSD regulátoru zvyšování požadované hodnoty regulátoru

<i>U_{set}</i> [V]	<i>U_{dem}</i> X [V]	<i>U_{dem}</i> Y [V]	<i>U_{dem}</i> Z [V]
75	1,438	1,504	1,506
70	1,389	1,457	1,459
65	1,333	1,399	1,399
60	1,276	1,341	1,34
55	1,219	1,283	1,281
50	1,162	1,226	1,221
45	1,105	1,168	1,162
40	1,048	1,11	1,103
35	0,992	1,052	1,044
30	0,935	0,994	0,984
25	0,878	0,936	0,925
20	0,822	0,878	0,865
15	0,765	0,821	0,806
10	0,708	0,763	0,747
5	0,651	0,705	0,688
0	0,605	0,658	0,632

Tab. P3.2 Měření napětí zpětnovazebního signálu s použitím PSD regulátoru snižování požadované hodnoty regulátoru

Příloha 4 - Tabulky měření interferometrem

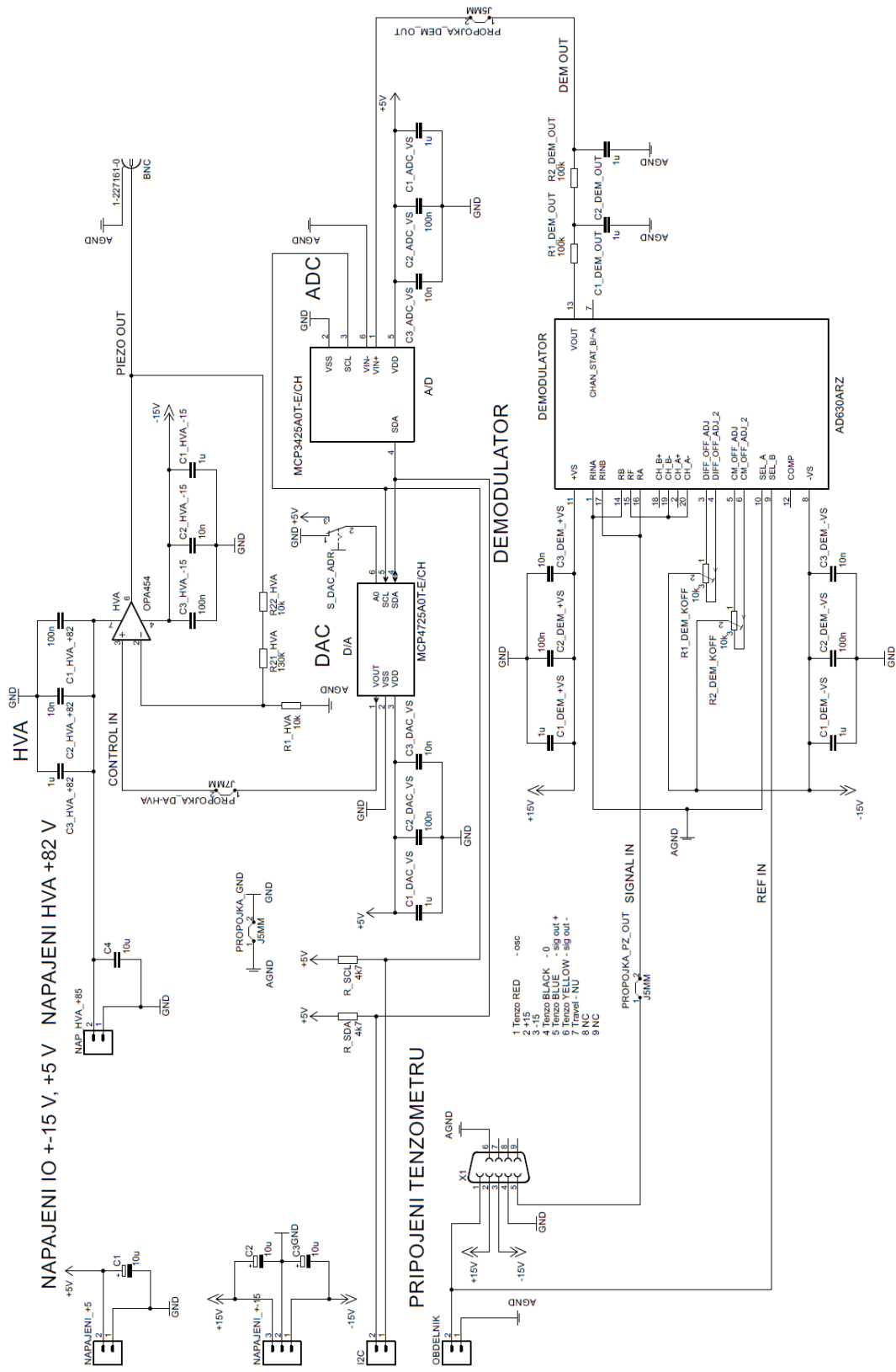
l [nm]	U_{det} [V]	l [nm]	U_{det} [V]	l [nm]	U_{det} [V]	l [nm]	U_{det} [V]	l [nm]	U_{det} [V]
		90	8,6	240	1,2	390	9,1	540	0,7
		100	9,1	250	0,8	400	8,8	550	1,2
		110	8,3	260	1,4	410	8,4	560	2,1
		120	8,2	270	2,7	420	6,4	570	2,3
		130	7,6	280	3	430	6	580	2,8
		140	7,4	290	2,9	440	5,5	590	2,9
0	3	150	7,2	300	3,8	450	5,4	600	3,2
10	3,2	160	7	310	3,9	460	4,9	610	4,2
20	4,4	170	6,5	320	4,4	470	4,5	620	4,6
30	5,9	180	6	330	4,6	480	3,4		
40	6,4	190	3,5	340	7,5	490	2,6		
50	7,4	200	3	350	7,7	500	1,4		
60	8,6	210	2,2	360	8,7	510	1,3		
70	9	220	2,1	370	8,8	520	1,2		
80	9	230	0,7	380	9,1	530	1		

Tab. P4.1 Měření délky posuvu interferometrem – krok 10 nm

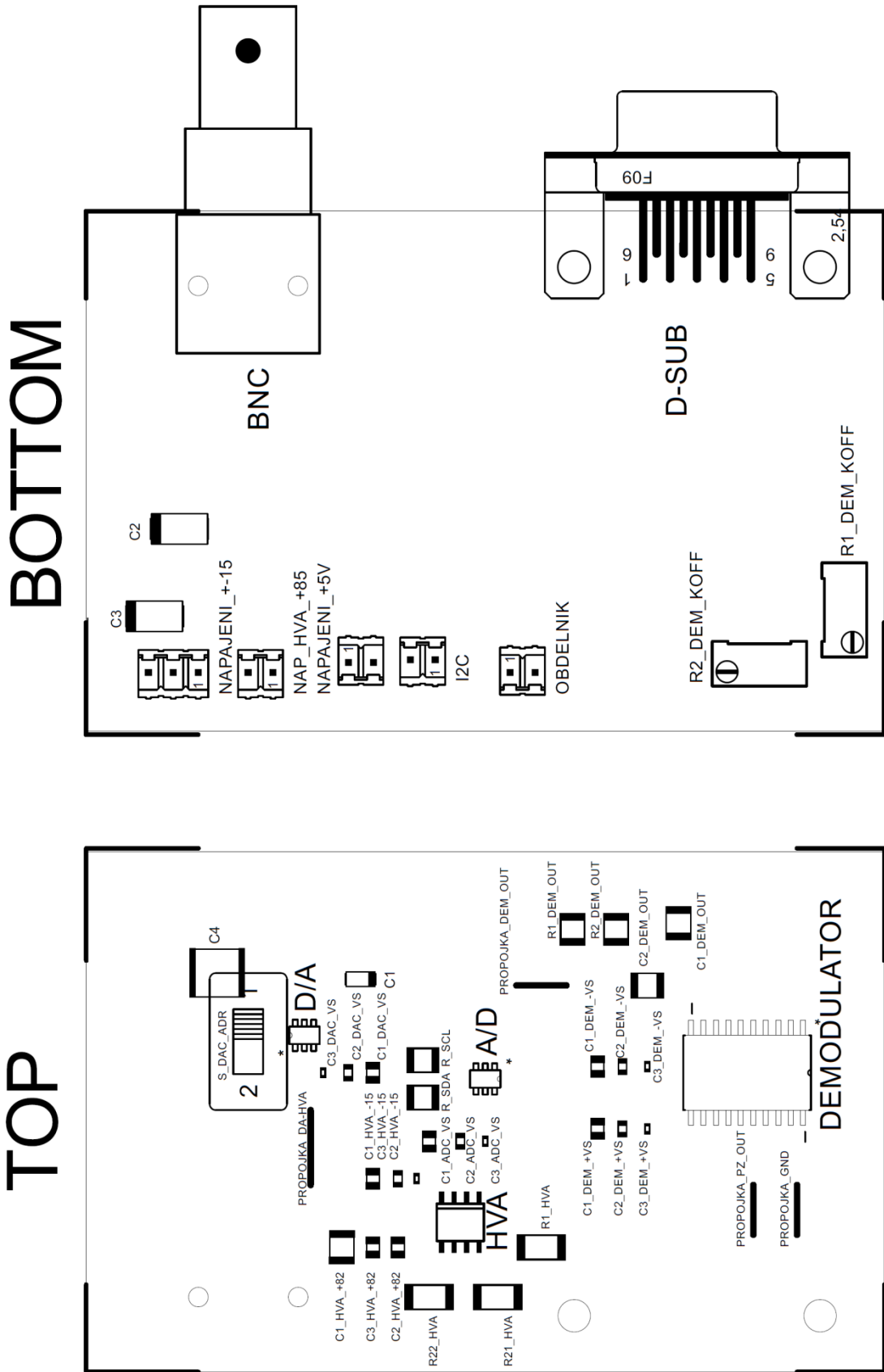
l [nm]	U_{det} [V]	l [nm]	U_{det} [V]
0	1,4	1200	2,1
100	8,5	1300	9,1
200	5	1400	2,3
300	0,9	1500	3,2
400	8,7	1600	9
500	3,6	1700	1,7
600	2,9	1800	5,4
700	8,1	1900	8,1
800	3,9	2000	2,3
900	4,2	2100	4,2
1000	9	2200	9,2
1100	1,2	2300	1,2

Tab. P4.2 Měření délky posuvu interferometrem – krok 100 nm

Příloha 5 - Obvodový návrh



Příloha 6 - Osazovací plány DPS ovladače



Příloha 7 - Zdrojový kód programu pro počítač

```
import controlP5.*;           //knihovna pro ovládací prvky
import processing.serial.*;   //knihovna pro komunikaci přes USB

Serial port;
ControlP5 cp5;

PFont font;

int bargraf = 10000;

Textlabel myValuelabel1;
Textlabel myValuelabel2;

void setup(){

    size(400, 550);           // velikost okna výška, šířka
    noStroke();              // bez obrysu
    printArray(Serial.list());

    port = new Serial(this, "COM5", 9600); // zahájení sériové
    komunikace

    cp5 = new ControlP5(this); // konstruktor controlP5
    font = createFont("calibri", 30);

    cp5.addButton("M5")           // tlačítko -5
        .setPosition(30, 50)     // x a y souřadnice levého horního rohu
        .setSize(100, 80)       // šířka, výška
        .setFont(font)
        ;

    cp5.addButton("P5")           // tlačítko +5
        .setPosition(150, 50)
        .setSize(100, 80)
        .setFont(font)
        ;

    cp5.addButton("M10")         // tlačítko -10
        .setPosition(30, 150)
        .setSize(100, 80)
        .setFont(font)
        ;

    cp5.addButton("P10")         // tlačítko +10
        .setPosition(150, 150)
        .setSize(100, 80)
        .setFont(font)
        ;

    cp5.addButton("M100")       // tlačítko -100
        .setPosition(30, 250)
        .setSize(100, 80)
        .setFont(font)
        ;
}
```



```

cp5.addButton("P100") // tlačítko +100
  .setPosition(150, 250)
  .setSize(100, 80)
  .setFont(font)
;

cp5.addButton("M1000") // tlačítko -1000
  .setPosition(30, 350)
  .setSize(100, 80)
  .setFont(font)
;

cp5.addButton("P1000") // tlačítko +1000
  .setPosition(150, 350)
  .setSize(100, 80)
  .setFont(font)
;

cp5.addButton("MIN") // tlačítko minimum
  .setPosition(270, 50)
  .setSize(100, 80)
  .setFont(font)
;

cp5.addButton("NUL") // tlačítko nulování
  .setPosition(270, 150)
  .setSize(100, 80)
  .setFont(font)
;

cp5.addButton("MAX") // tlačítko maximum
  .setPosition(270, 250)
  .setSize(100, 80)
  .setFont(font)
;

myValueLabel1 = cp5.addTextlabel("label1") // číselná hodnota nm
  .setPosition(260, 360)
  .setColorValue(#FFD700)
  .setFont(font);

myValueLabel2 = cp5.addTextlabel("label2") // číselná hodnota um
  .setPosition(260, 385)
  .setColorValue(#FFD700)
  .setFont(font);

}

void draw(){

  background(0, 150, 0); // barva pozadí r, g, b
  fill(255, 215, 0); // barva textu
  textFont(font);
  text("PIEZO CONTROL", 105, 35); // text, souřadnice x, y

```

```

        fill(255, 215, 0); // barva bargrafu
        rectMode(CORNER); // vytvoření obdélníku
        rect(200,450,((bargraf-10000)/50),70); // souřadnice levého
horního rohu x, y, šířka(proměnná), výška

        fill(255,0,0); // barva rysky
        rectMode(CORNER); // vytvoření obdélníku
        rect(200,450,1,70); // souřadnice levého
horního rohu x, y, šířka(proměnná), výška

        myValueLabel1.setText(nfc(bargraf-10000) + " nm");
        myValueLabel2.setText(nfc((bargraf-10000)/1000) + " um");
    }

void M5() { // příkaz -1
    port.write("A");
    if (bargraf < 5) {
        bargraf = 0;
    } else {
        bargraf = bargraf - 5;
    }
}

void P5() { // příkaz +1
    port.write("B");
    if (bargraf > 19995) {
        bargraf = 20000;
    } else {
        bargraf = bargraf + 5;
    }
}

void M10() { // příkaz -10
    port.write("C");
    if (bargraf < 10) {
        bargraf = 0;
    } else {
        bargraf = bargraf - 10;
    }
}

void P10() { // příkaz +10
    port.write("D");
    if (bargraf > 19990) {
        bargraf = 20000;
    } else {
        bargraf = bargraf + 10;
    }
}

```

```

void M100(){ // příkaz -100
    port.write("E");
    if (bargraf < 100) {
        bargraf = 0;
    } else {
        bargraf = bargraf - 100;
    }
}

void P100(){ // příkaz +100
    port.write("F");
    if (bargraf > 19900) {
        bargraf = 20000;
    } else {
        bargraf = bargraf + 100;
    }
}

void M1000(){ // příkaz -1000
    port.write("G");
    if (bargraf < 1000) {
        bargraf = 0;
    } else {
        bargraf = bargraf - 1000;
    }
}

void P1000(){ // příkaz +1000
    port.write("H");
    if (bargraf > 19000) {
        bargraf = 20000;
    } else {
        bargraf = bargraf + 1000;
    }
}

void MIN(){ // příkaz minimum
    port.write("I");
    bargraf = 0;
}

void NUL(){ // příkaz minimum
    port.write("J");
    bargraf = 10000;
}

void MAX(){ // příkaz maximum
    port.write("K");
    bargraf = 20000;
}

```

Příloha 8 - Zdrojový kód programu pro Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
#include "MCP3421.h"

// Proměnné pro řízení z počítače
char Prikaz;
float Posuv;
float Prepocet;

// Proměnné PID regulátoru
int Setpoint, Input, Output;           // připojení PID
regulátoru
double kp=0.009, ki=0.001, kd=0.0005; // konstanty PID
regulátoru

unsigned long AktualniCas, PredchoziCas;
double Uplynulycas;
double Chyba;
double MinulaChyba;
double KumulaceChyby, RychlostChyby;

// Proměnné AD převodníku
double UrovenADC;
double KorekceADC;

// Proměnná DA převodníku
int VystupPID;
int UrovenDAC;

Adafruit_MCP4725 dac;           // DAC konstruktor --- MCP4725
MCP3421 MCP = MCP3421();       // ADC konstruktor --- MCP3421

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();

  dac.begin(0x60);           // DAC nastavení adresy
  MCP.init(0x68,3,0);       // ADC nastavení adresy, sample rate a PGA

  while(Setpoint < 2048){    //náběh do softwarové nuly po spuštění
    Setpoint = Setpoint + 1;
  }
}

void loop() {

// nastavení Setpointu PID
// -----

  if (Serial.available()>0) {
    Prikaz = Serial.read();
    if (Prikaz == 'A') {           // snižování po jednotkách
      Posuv = Posuv - 5;
    }
    if (Prikaz == 'B') {           // zvyšování po jednotkách
```

```

    Posuv = Posuv + 5;
}
if (Prikaz == 'C') {           // snižování po desítkách
    Posuv = Posuv - 10;
}
if (Prikaz == 'D') {           // zvyšování po desítkách
    Posuv = Posuv + 10;
}
if (Prikaz == 'E') {           // snižování po stech
    Posuv = Posuv - 100;
}
if (Prikaz == 'F') {           // zvyšování po stech
    Posuv = Posuv + 100;
}
if (Prikaz == 'G') {           // snižování po tisících
    Posuv = Posuv - 1000;
}
if (Prikaz == 'H') {           // zvyšování po tisících
    Posuv = Posuv + 1000;
}

if (Prikaz == 'I') {           // nastavení minima
    Posuv = 0;
}
if (Prikaz == 'J') {           // nastavení nuly
    Posuv = 10000;
}
if (Prikaz == 'K') {           // nastavení maxima
    Posuv = 20000;
}

if (Posuv < 0){                 // limitace pod rozsahem
    Posuv = 0;
}
if (Posuv > 20000){             // limitace nad rozsahem
    Posuv = 20000;
}

Prepocet = Posuv / 4.8828125;
Setpoint = Prepocet;
}

// vyceteni Inputu pro PID z ADC
// -----

while(MCP.ready()==0);
    UrovenADC = MCP.getLong(); // 0 - 131072

    if (UrovenADC < 40000){       // limitace pod rozsahem
        UrovenADC = 40000;       // X: 40000   Y: 43500   Z: 41000
    }
    if (UrovenADC > 95000){       // limitace nad rozsahem
        UrovenADC = 95000;       // X: 95000   Y: 98500   Z: 99000

KorekceADC = UrovenADC - 40000; // X: 55000 Y: 55000 Z: 58000
Input = KorekceADC/13.427734; // KorekceADC / 4096
// X: 13.427734   Y: 13.696285   Z: 14.160156

```

```

// vypocet Outputu PID a nastaveni vystupu DAC
// -----

VystupPID = computePID(Input);

if(VystupPID > UrovenDAC){ // zpomalení náběžné hrany -
    while(UrovenDAC < VystupPID){
        dac.setVoltage(UrovenDAC, false);
        UrovenDAC = UrovenDAC + 1;
    }
}

if (VystupPID < UrovenDAC){ // zpomalení sestupné hrany
    while(UrovenDAC > VystupPID){
        dac.setVoltage(UrovenDAC, false);
        UrovenDAC = UrovenDAC - 1;
    }
}
}

double computePID(double PIDinp){
    AktualniCas = millis(); // aktuální čas od spuštění programu
    UplynulCas = (double)(AktualniCas - PredchoziCas);
    // výpočet času od předchozího výpočtu
    Chyba = Setpoint - PIDinp; // výpočet chyby

    KumulaceChyby += Chyba * UplynulCas; // výpočet integrálu

    RychlostChyby = (Chyba - MinulaChyba)/UplynulCas;
    // výpočet derivace

    double PIDout = kp*Chyba + ki*KumulaceChyby +
kd*RychlostChyby; // součet složek PID

    MinulaChyba = Chyba; // uložení aktuální chyby
    PredchoziCas = AktualniCas; // uložení aktuálního času
    Output = Setpoint + PIDout; // výstup PID regulátoru

    if (Output < 0){ // limitace pod rozsahem
        Output = 0;
    }
    if (Output > 4095){ // limitace nad rozsahem
        Output = 4095;
    }

    return Output;
}

```