VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

PŘESNOST A DYNAMIKA LINEÁRNÍCH PIEZO MOTORŮ

PRECISION AND DYNAMICS OF LINEAR PIEZO MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTERS´S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. ONDŘEJ ILICHMAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. PAVEL HOUŠKA, PH.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Ilichman

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Přesnost a dynamika lineárních piezo motorů

v anglickém jazyce:

Precision and dynamics of linear piezo motors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá možnostmi použití lineárních piezo motorů pro přesné polohování v aplikacích pracujících ve vakuu. Cílem je ověřit parametry lineárních motorů firmy PiezoMotor Uppsala AB a vyhodnotit jejich použitelnost ve vakuu a vysokém elektrickém poli (do 30KV).

Cíle diplomové práce:

1. Seznamte se problematikou konstrukce a řízení piezoelektrických motorů.
2. Seznamte se se zapůjčenými piezo motory a řídicími jednotkami firmy PiezoMotor Uppsala AB.
3. Navrhněte a realizujte aplikaci pro experimentální vyhodnocování parametrů zapůjčených piezo motorů.
4. Proveďte potřebné experimenty a vyhodnoťte dynamiku a přesnost polohování v laboratorních podmínkách za atmosférického tlaku.
5. Proveďte potřebné experimenty ve vakuu a elektrickém poli, proveďte vyhodnocení použitelnosti zapůjčených motorů pro použití ve vakuu.

Seznam odborné literatury:

[1] Yang, J.: An introduction to the theory of piezoelectricity, 2005, Springer-Verlag, ISBN 0-387-23546-9
[2] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
[3] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
[4] National Instruments: LabVIEW Measurements Manual 322661 [online], 2003, dostupné z URL:<http://www.ni.com>
[5] National Instruments: LabView Control Design User Manual 371057 [online], 2009, dostupné z URL:<http://www.ni.com>

Vedoucí diplomové práce:Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 25.11.2013

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematiku konstrukce, řízení, přesnosti a dynamikou lineárních piezoelektrických motorů od firmy PiezoMotor Uppsala AB. Cílem této diplomové práce je zhodnotit aplikovatelnost zapůjčeného motoru v hmotnostním spektrometru.

V úvodní části této práce je rozebrána konstrukce, princip funkčnosti, používané materiály, řízení a druhy piezoelektrických motorů.

Dále se práce věnuje volbě hardwaru a návrhu mechanické sestavy, která by mohla nahradit stávající mechanismus s použitými elektromagnetickými motory. Následně je navrhnuta a vyrobena testovací sestava se zapůjčeným piezoelektrickým motorem. Ve vývojovém prostředí NI LabView je vytvořena testovací aplikace pro řízení a vyhodnocování.

Závěrečná část je věnována shrnutí kladných i záporných vlastností zapůjčeného piezoelektrického motoru a vyhodnocení přesnosti a dynamiky polohování.

ABSTRACT

The work deals with the design, control, precision and dynamics of linear piezoelectric motors from PiezoMotor Uppsala AB. The aim of this thesis is to evaluate the applicability of the loaned engine in a mass spectrometer.

In introduction‘s section of this work is discussing the design principles of functionality, materials used, procedure and types of piezoelectric motors.

It focuses the choice of hardware and design of mechanical assemblies, which could replace the current mechanism with electromagnetic motors. Then we designed and fabricated a test report with hired piezoelectric motor. In NI LabView development environment is created test application for control and measurement.

The final section is devoted to a summary of the positive and negative features of the hired piezoelectric motor and evaluation of accuracy and dynamics.

KLÍČOVÁ SLOVA

Piezoelektrický motor, přesnost, dynamika, vakuum, elektrické pole, hmotnostní spektrometr.

KEYWORDS

Piezoelectric motor, accuracy, dynamics, vacuum, electric field, mass spectrometer.

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, dle pokynů vedoucího diplomové práce. Všechny podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 30. 5. 2014

……...
podpis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ILICHMAN, O. Přesnost a dynamika lineárních piezo motorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, a také za veškerou pomoc, kterou mi v průběhu tvorby práce ochotně poskytoval. Dále bych chtěl poděkovat firmě Routech a firmě PiezoMotor Uppsala AB za uskutečněné konzultace a zapůjčení piezoelektrického motoru a řídicí jednotky.

OBSAH

Abstrakt 5
1. Úvod 13
2. Piezoelektrický jev a piezo materiály 15
2.1 Piezoelektrický jev 15
2.2 Materiály pro použití v piezoelektrických motorech 16
2.2.1 Krystalické látky 16
2.2.2 Keramické materiály 16
2.2.3 Organické piezoelektrické polymery 17
2.3 Rozdělení piezoelektrických kompozitních struktur 17
2.3.1 Unimorfy 17
2.3.2 Bimorfy 18
2.3.3 Polymorfy 18
3. Principy piezoelektrických motorů 19
3.1.1 Motory s postupovou vlnou 19
3.1.2 Motory s vícevrstvou piezoelektrickou strukturou 20
3.1.3 Motory s pevnými nebo elastickými lamelami 20
3.1.4 Motory typu „Hula-hop“ 21
3.1.5 Piezo LEGS 21
3.2 Řízení piezoelektrických motorů typu PIEZO LEGS 23
4. Hmotnostní spektrometr 25
4.1 Vakuum 28
4.1.1 Stupně vakua 28
4.1.2 Podtlak 28
4.1.3 Hrubé vakuum 29
4.1.4 Jemné vakuum 29
4.1.5 Vysoké vakuum 29
4.1.6 Ultravysoké a extrémně vysoké vakuum 29
5. Návrh stolku pro hmotnostní spektrometr 31
5.1 Popis stávajícího návrhu 31
5.2 Požadavky nového návrhu 32
5.3 Volba motorického a řídícího vybavení 32
5.3.1 Motor Piezo LEGS Caliper 32
5.3.2 Řídící jednotka PMD206 34

5.4 Návrh hardwarové části 35
5.5 Síly působící na jednotlivé osy 37
5.5.1 Síla působící na osu Y 38
5.5.2 Síla působící na osu X 39
5.5.3 Zhodnocení vypočtených sil pro jednotlivé osy 40
5.6 Alternativní řešení s využitím hardwaru od firmy PI 41
6. Aplikace pro řízení a vyhodnocení 43
6.1 Použitý hardware pro řízení a měření 43
6.1.1 Piezo LEGS Twin 20N 43
6.1.2 Řídící jednotka PMD 101 43
6.1.3 Snímač polohy RGH24Y 44
6.1.4 Digitální modul NI 9411 44
6.1.5 Modulární rozhraní NI CompactDAQ – USB 45
6.1.6 Přípravek pro testování motoru 45
6.2 Princip aplikace 46
7. Vyhodnocení dynamiky a přesnosti v laboratorních podmínkách 49
7.1 Princip měření 49
7.2 Naměřené grafy chyby polohy 50
7.3 Naměřené grafy doby přejezdu 51
7.4 Histogramy chyb polohy 52
7.5 Výpočet předpokládané doby polohování navrhnutého vzorku 53
7.6 Zhodnocení zapůjčeného piezoelektrického motoru 54
8. Vyhodnocení dynamiky a přesnosti ve vakuu a elektrickém poli 55
9. Závěr 57
10. Seznam použité literatury 59
11. Seznam obrázků 61
12. Seznam tabulek 63

1. ÚVOD

Piezoelektrické motory jsou poměrně novým typem elektrických pohonů, který se používá převážně pro velmi přesné polohovaní. Jejich zásadní výhodou je možnost polohovat s rozlišením typicky 1nm a s přejezdy odpovídajícími jejich rozlišení. To z nich činí pohony vhodné pro velmi přesnou mechaniku, jako jsou například zaostřovací pohony v objektivech fotoaparátů. Stále častěji nachází uplatnění v přesných polohovacích mechanizmech, kdy konvenční elektromagnetické motory mají problém nebo nejsou vůbec schopné dosáhnout požadované přesnosti polohování. Proto se „piezo motory“ stále častěji používají v robotice, medicíně, automobilovém průmyslu, elektronové mikroskopii a mnoha jiných aplikacích. Další nespornou výhodou jsou dosahované rychlosti a zrychlení, které se projevují převážně při opakovaných mikro posuvech, kdy jsou schopny ve většině případů dosáhnout výrazně kratších cyklů a tím dosáhnout časových úspor.

Mezi nevýhody patří poměrně nízká zatížitelnost, která se pohybuje v řádech Newtonů. Platí zde pravidlo „co je malé, to je slabé“. S rostoucím zatížením znatelně klesá jejich přesnost a zrychlení. Je tedy nezbytně nutné klást důraz na návrh a přesnou výrobu sestavy, ve které budou motory využívány.

V současnosti mezi jejich přední výrobce patří firmy Physik Instrumente (PI) GmbH & Co, PiezoMotor Uppsala AB, Cedrat Technologies a další. Množství piezoelektrických motorů vzniká také v rámci různých vědeckých projektů, které se zabývají vývojem a použitelností piezoelektrických motorů v dalších odvětvích.

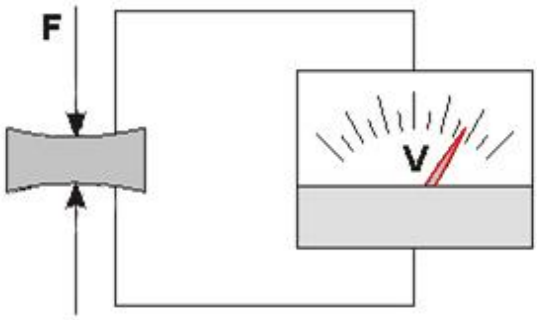
Cílem této práce je navrhnout dvouosý polohovací stolek s piezoelektrickými motory pro hmotnostní spektrometr a otestovat parametry zvolených piezoelektrických motorů. V rámci dlouhodobé spolupráce s firmami Uzimex a Routech nám byla nabídnuta možnost využití piezoelektrických motorů firmy PiezoMotor Uppsala AB, kterou firma Routech zastupuje na českém trhu.

2. PIEZOELEKTRICKÝ JEV A PIEZO MATERIÁLY

Fyzikální princip, na kterém jsou založeny piezoelektrické motory, je znám již od konce 19. století. Výrazně se na tomto objevu podíleli bratři Curieovi. Přivedením elektrického napětí na piezoelektrický materiál lze dosáhnout jejich mechanické deformace. Taková deformace však běžně činí pouze zlomek jeho celkového rozměru materiálu, typicky 0,1%, což je pro použití v praxi velmi málo. Jako příklad lze uvést krok o velikosti 1mm, v takovém případě by byl nutný materiál o rozměrech 1m, aby se dosáhlo požadovaného kroku. Pro použití v praxi je tedy důležité deformaci piezoelektrického materiálu mechanicky zesílit, nebo výsledný žádaný pohyb motoru složit z několika malých kroků poskytnutých piezoelektrickým materiálem. [1]

2.1 Piezoelektrický jev

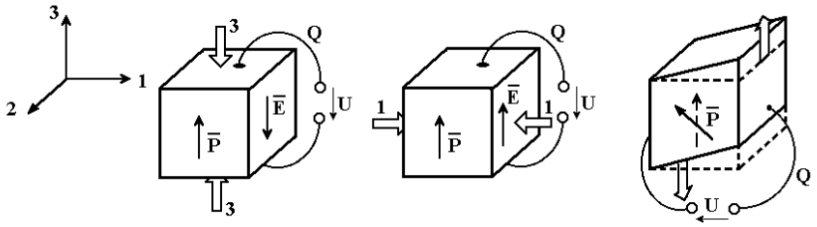
Pohyb motoru je založen na využití piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je schopnost krystalu vytvářet elektrické napětí při jeho deformování a opačně, krystal se deformuje vlivem přiloženého elektrického pole a jeho intenzity (Obr. 1). Vnitřní struktura materiálů, v nichž dochází k piezoelektrickému efektu, je tvořena z kladných a záporných iontů, které mají v klidovém stavu jistou rovnovážnou polohu, respektive jejich těžiště se nachází v definovaném místě. [2]



Obr. 1. Princip piezoelektrického jevu. [2]

Podle orientace deformačních sil a rozmístění elektrického náboje uvažujeme podélný, příčný a střižný piezoelektrický jev (Obr. 2). U podélného jevu dochází k deformacím látky i polarizaci ve stejném směru.

U příčného jevu působí deformace ve směru osy Y a směr polarizace je rovnoběžný s osou X, jen opačného směru. U střižného jevu dochází k deformaci střihem v rovině kolmé na směr polarizace. [1], [2]



Obr. 2. Druhy piezoelektrických jevů podle orientace struktury krystalů. [1], [2]

2.2 Materiály pro použití v piezoelektrických motorech

Cílem vývoje piezoelektrických látek je snaha najít materiál s co nejvhodnějšími piezoelektrickými vlastnostmi. Mezi tyto vlastnosti patří citlivost, účinnost, převod elektrické a mechanické energie, teplotní stabilita rezonančního kmitočtu a snížení pracovního napětí při zachování stejného pracovního efektu. Tato kapitola se zabývá vlastnostmi a historií vývoje piezoelektrických krystalických látek s ohledem na jejich nejrůznější vlastnosti.

2.2.1 Krystalické látky

Krystalické látky patřily k jediným používaným piezoelektrickým materiálům až do 60. let 20. století. K nejznámějším zástupcům krystalických látek patří křemen, lithium niobát, titaničitan lithia, germanium bizmut, triglycin sulfát, oxid berylnatý, sirník kademnatý, galiumarsenid, galium fosfid, oxid zinečnatý, sirník zinečnatý, turmalín, Seignettova sůl a jiné. Nejhojněji používaným zástupcem krystalických piezoelektrických látek je křemen, jenž patří k nejrozšířenějším nerostům zemské kůry. Jeho čirou formou je křišťál a dalšími odrůdami jsou např. ametyst, citrín, záhněda, černý morion a růženín. Křemen se využívá především v krystalových oscilátorech. Jeho velkou předností je malá závislost piezoelektrického koeficientu na teplotě v porovnání s jinými krystalickými látkami, jenž mají nezanedbatelné pyroelektrické vlastnosti. Kromě této vlastnosti má dobré použití při vyšších teplotách. [2]

2.2.2 Keramické materiály

V průběhu 50. let 20. století nastává změna ve vývoji a použití nových keramických piezoelektrických materiálů, díky čemuž se piezoelektrického jevu začíná používat v mnoha nových aplikacích (snímače a aktuátory). Jedná se o polykrystalické keramické materiály, které jsou v běžném stavu paraelektrické. Piezoelektrických vlastností nabývají až po polarizaci v silném elektrickém poli. Mezi tyto keramické materiály řadíme např. titaničitan barnatý, zirkoničitan olovnatý, titaničitan olovnatý, titaničitan bismutitý, niobičnan olovnatý a nejpoužívanější PZT keramika.

PZT keramika se vyrábí metodou práškové metalurgie. Prášek je složený z jednotlivých rozemletých složek v požadovaném poměru spolu s příměsemi (Nb, Sr, Fe, Mn, Cr, U atd.), které keramice dodávají piezoelektrické vlastnosti. Nejprve dochází ke kalcinaci, kdy se při zvýšené teplotě uvolní krystalická voda a ze složek se stane tuhý roztok. Následuje další drcení až na velikost zrna v řádu jednotek mikronů. Po přidání organického pojiva se materiál tvaruje lisováním do forem, extrudováním a jinými metodami, dále se vypaluje při teplotách okolo 1200-1300°C. Tímto postupem vzniklá keramika se obrábí běžnými způsoby do potřebných tvarů. Po vypálení nemá keramika makroskopické piezoelektrické vlastnosti (projevuje se jen v rámci jednotlivých domén, které jsou náhodně spontánně orientovány, a tím se tento jev vyruší). Proto se keramika polarizuje vystavením elektrickému poli o velikosti asi 2-4kV/mm buď při pokojové teplotě, nebo ohřátá na vyšší teplotu (v některých případech i vyšší než Curieova teplota, která se u PZT keramiky pohybuje v rozmezí 150 - 360°C). [2]

2.2.3 Organické piezoelektrické polymery

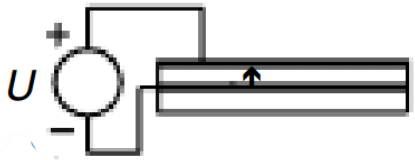
Třetí skupinou piezoelektrických materiálů jsou organické piezoelektrické polymery, z nichž nejpoužívanější jsou polyvinylidenfluoridem a difluorpolyetylén, které se vyznačují až několikrát vyšším piezoelektrickým koeficientem než krystaly křemene. Díky možnosti připojení vysokého napětí se používají především jako citlivé akustické a vibrační snímače. Jejich výroba je podstatně jednodušší než výroba piezoelektrické keramiky. [2]

2.3 Rozdělení piezoelektrických kompozitních struktur

Piezoelektrické kompozitní ohybové struktury se využívají pro převod elektrického napětí na sílu, moment síly či tlak a naopak. Nejčastěji jde o tzv. unimorfy, bimorfy či obecně polymorfy. [4]

2.3.1 Unimorfy

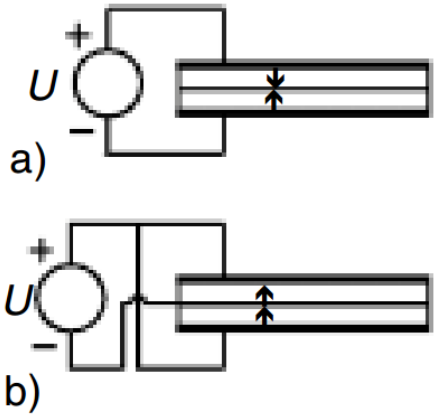
Nejčastěji se používají na bzučáky, sirény atd. Jsou to tenké kovové destičky s nalepenou deskou PZT keramiky uspořádané v kruhové konfiguraci. [4]



Obr. 3. Konfigurace unimorfu. [4]

2.3.2 Bimorfy

Používají se jako aktuátory (převod elektrického signálu na mechanický pohyb) v pletacích strojích při zvedání jehel, jednotkách pro převod Braillova písma do počítače atd. [4]



Obr. 4. Konfigurace bimorfů: a) sériové; b) paralelní. [4]

2.3.3 Polymorfy

Jsou struktury s více než dvěma vrstvami PZT keramiky, které zvyšují účinnost převodu elektrické a mechanické formy energie a hlavně zmenšují potřebné elektrické napětí pří zachovaní stejného výkonu. [4]

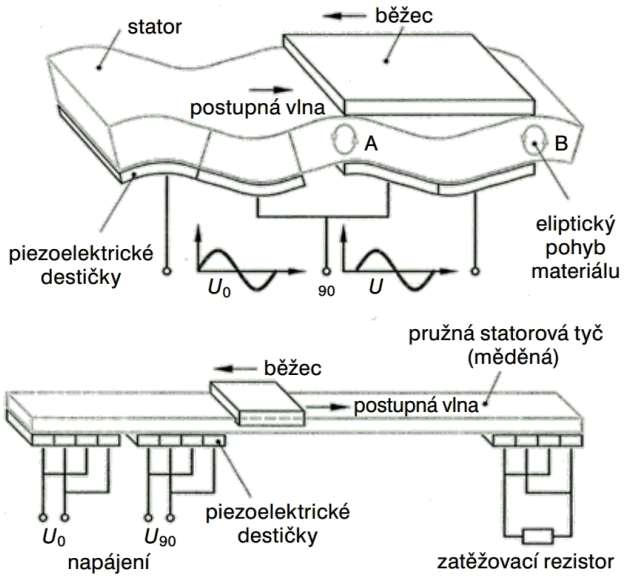
3. PRINCIPY PIEZOELEKTRICKÝCH MOTORŮ

Piezoelektrické motory můžeme na základě podobných vlastností rozdělit do následujících kategorií:

- **Trajektorie pohybu:**
  - Lineární
  - Rotační
- **Podle přeměny elektrické energie na mechanický pohyb:**
  - Motory s postupovou vlnou
  - Motory s vícevrstvou piezoelektrickou strukturou
  - Motory s pevnými nebo elastickými lamelami
  - Motory typu „hula-hop“
  - Piezo LEGS

3.1.1 Motory s postupovou vlnou

Princip piezoelektrického motoru s postupovou vlnou lze snadno vysvětlit na jeho lineární variantě. Pohyblivá část motoru („běžec“) se pohybuje po vlnící se statorové tyči. Stator lineárního piezoelektrického motoru je tvořen pružným pásem, k jehož spodní straně jsou přilepeny piezoelektrické destičky. Tady nastává přeměna elektrické energie na energii mechanickou, dále se vzniklými kmity podél statorové tyče vytvoří mechanické kmity a postupná vlna, po které se důsledkem tření pohybuje běžec. Destičky jsou buzeny ze střídavého ultrazvukového zdroje. [5]

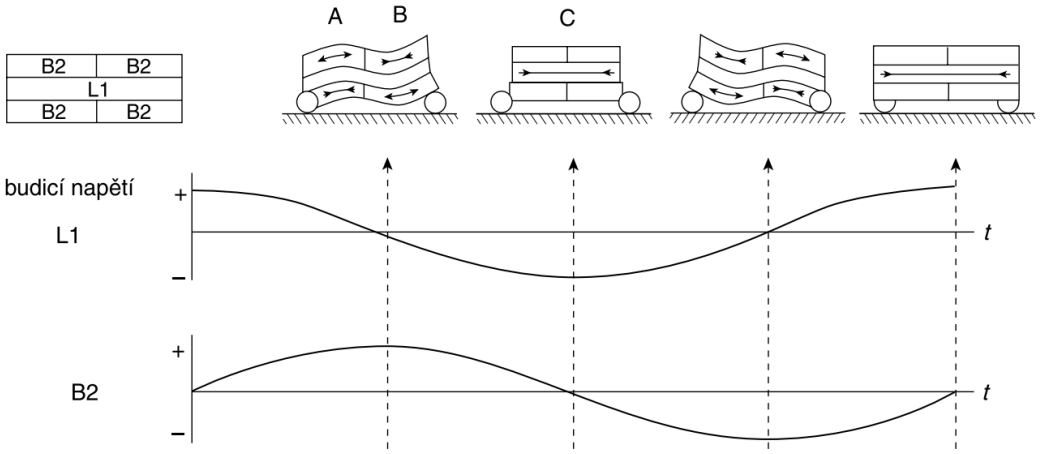


Obr. 5. Princip piezoelektrického motoru s postupovou vlnou. [5]

3.1.2 Motory s vícevrstvou piezoelektrickou strukturou

Princip vzniku pohybu je uveden na obr. 6. Podélné kmity L_1 jsou vytvářeny expanzí a kontrakcí části označené C. Příčné kmity B_2 vznikají rozdílným pohybem prvků označených A a B, které jsou umístěny v rozích měniče. Opačných pohybů částí označených A a B je dosahováno opačnou polarizací. Shodně polarizované jsou části v protilehlých rozích.

K napájení slouží dvě střídavá napětí s fázovým posuvem 90°. Jedno napětí je určeno pro buzení kmitů L_1 a druhé pro buzení kmitů B_2. Frekvence těchto napětí musí být přibližně rezonanční frekvence podélných a příčných kmitů. Sloučením podélných a příčných kmitů jednotlivých částí budou povrchové body styčných ploch vykonávat eliptický pohyb s extrémním zdvihem, který umožní unášení rotoru. [6]

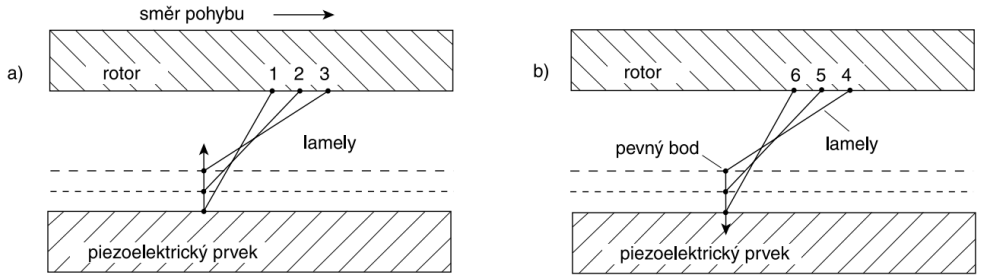


Obr. 6. Princip vzniku eliptického pohybu na styčné ploše (vícevrstvý měnič). [6]

3.1.3 Motory s pevnými nebo elastickými lamelami

Na obr. 7a je znázorněn pohyb lamely při zvětšování tloušťky piezoelektrického prvku. Volný konec lamely koná pohyb, při němž se posunuje rotor ve směru pohybu (pozice koncového bodu 1, 2, 3).

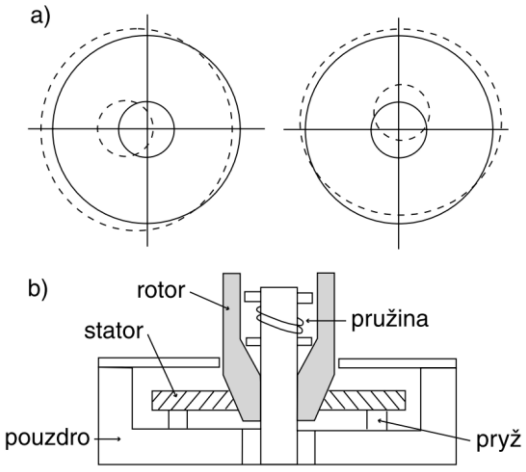
Na obr. 7b je znázorněn pohyb lamely při zmenšování tloušťky piezoelektrického prvku. Volný konec lamely vykonává pohyb, při němž se pohybuje zpět do výchozí pozice bez silového působení na rotor (pozice koncového bodu 4, 5, 6). V této fázi nastává prokluz mezi rotorem a lamelami. Tyto dvě sekvence se opakují, a tak vzniká otáčivý pohyb rotoru. [6]



Obr. 7. Princip činnosti piezoelektrického motoru s lamelami. [6]

3.1.4 Motory typu „Hula-hop“

Tento motor využívá radiální kmity a osově nesymetrický vibrační mód. Na obr. 8a je znázorněn průběh deformace piezoelektrické vrstvy, která je v tomto případě v radiálním směru. Tyto motory jsou buzeny pomocí dvou harmonických signálů s fázovým posuvem 90°. V důsledku působení dvou budicích harmonických signálů vzájemně posunutých o 90° vznikají pod jednotlivými elektrodami piezoelektrického měniče stojaté kmity v radiálním směru. Konstrukční uspořádání motoru, který pracuje na uvedeném principu, v praxi je na obr. 8b. [6]



Obr. 8. Princip činnosti motoru typu Hula-hop. [6]

3.1.5 Piezo LEGS

Základním prvkem tohoto typu piezoelektrického motoru jsou tzv. „chodící nohy“, jenž jsou vlivem elektrického napětí deformovány a správnou posloupností deformací následně zapříčiní pohyb. V motorech jsou bimorfní aktuátory slinuté do jediného tělesa se čtyřmi nohami, neboli dvěma páry, které jsou v podstatě keramickými „svaly“.

Díky tomu, že tento princip nevyužívá žádných pohyblivých mechanických dílů je chod velice přesný a lze dosahovat kroků menších než je jeden nanometr.

Maximální rychlost okolo 20 mm/s je dána délkou kroku a maximální krokovou frekvencí. Piezo LEGS má ve srovnání s tradičním DC motorem zcela zanedbatelnou setrvačnost a reakční doba je téměř nulová. Tento princip má v porovnání s tradičními elektromotory větší energetickou účinnost, protože nespotřebovává žádnou energii v klidové poloze a nevykazuje proudové špičky v režimech start a stop. [7]

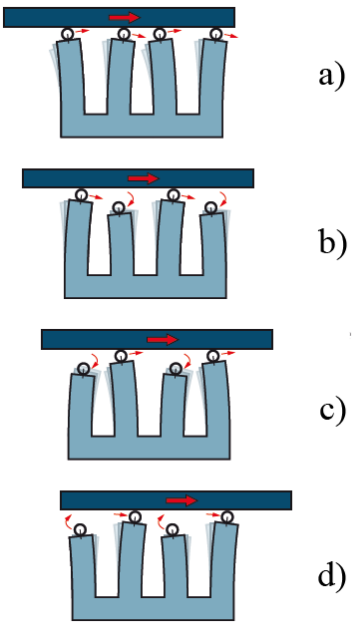
Obr. 9. Porovnání skutečné velikost piezo LEGS. [8]

a) Při elektrické aktivaci všech čtyř noh dochází k jejich natahování a prohýbání. Na šipkách je vidět pohyb každé nohy a lze zpozorovat, že nohy se pohybují v párech.

b) První pár nohou je v kontaktu s posuvnou tyčí a pohybuje se směrem doprava. Druhý pár se stahuje a jeho vrcholky se pohybují vlevo.

c) Druhý pár se nyní natahuje a přebírá kontakt s tyčí. Jeho vrcholky se začínají pohybovat vpravo. První pár se stahuje a jeho vrcholky se pohybují vlevo.

d) Druhý pár se pohybuje vpravo. První pár se začíná natahovat a pohybovat směrem k tyči.



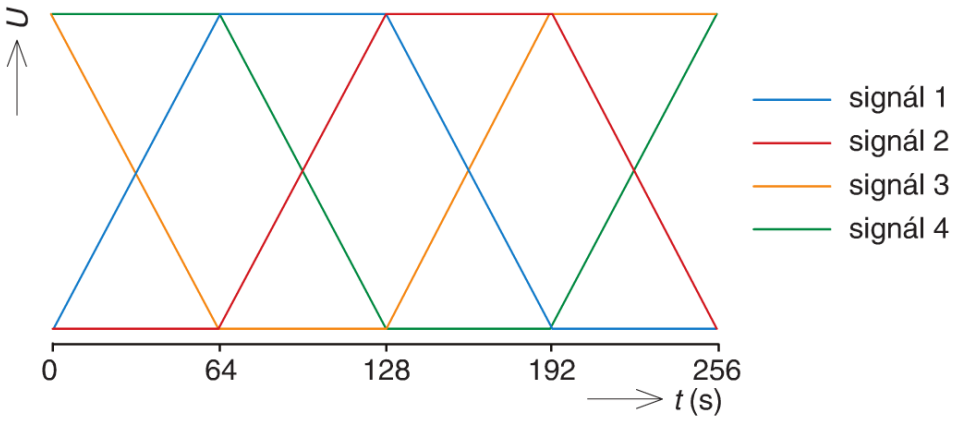
Obr. 10. Princip činnosti piezo LEGS. [7]

3.2 Řízení piezoelektrických motorů typu PIEZO LEGS

Pohyb piezoelektrických motorů je řízen tvarem křivky přiváděného napěťového signálu, který prodlužuje a ohýbá každou z nich. Tvar křivky je tvarován tak, aby se vykonal požadovaný pohyb tzv. „krok“.

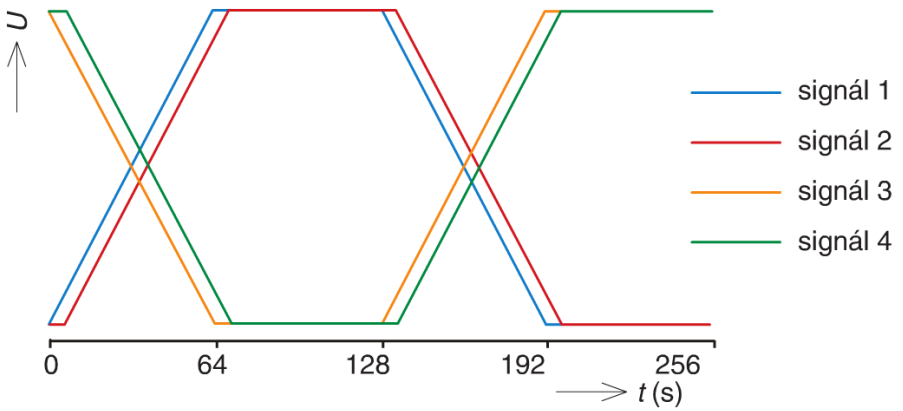
Každý pár je řízen dvěma analogovými signály. Z elektrického hlediska představují tyto čtyři fáze motoru kondenzátory.

Na obr. 11 jsou signály přivedeny na čtyři fáze, které jsou barevně rozlišeny a všechny jsou vzájemně fázově posunuty o 90°. Složením těchto signálů lze pohybovat hnacími nohami podél kosočtverečné trajektorie, jde o tzv. plný krok. [7]



Obr. 11. Tvar křivky pro plný krok. [7]

V některých případech je zapotřebí větší přesnosti, než je délka plného kroku. Délka plného kroku může být zkrácena upravením fázového posunu mezi signály. Průběh signálů na obr. 12 vyvolává krok o velikosti kolem 10% ve srovnání s plným krokem. Jsou-li fáze řídícího napětí takto posunuté, budou kroky kratší, a jedná se o tzv. zmenšený krok, jehož nevýhodou je pomalejší rychlost. [7]



Obr. 12. Tvar řídící křivky pro zkrácený krok. [7]

Jiným způsobem řízení motoru je mikrokrokování, kterým se dosáhne velmi jemného rozlišení. Při této metodě je v řídící jednotce mikroprocesorem vytvořen napěťový signál tak, že jeho křivka je interpolována velkým počtem napěťových přírůstků. Mikroprocesor vyhledá data signálu v tabulce a pomocí D/A převodníku je převede na čtyři analogové signály, které jsou pro každou fázi zesíleny, a poté jsou zvolenou frekvencí přivedeny na fáze motoru. [7]

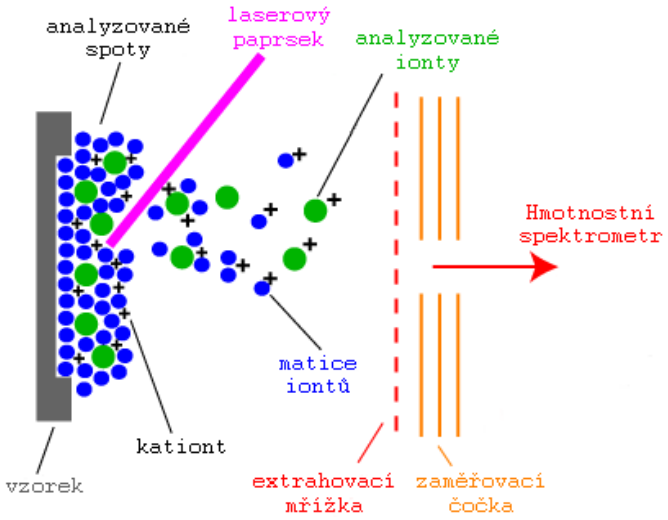
4. HMOTNOSTNÍ SPEKTROMETR

Jednou z možných cílových aplikací pro použití piezoelektrických motorů je polohovací stolek hmotnostního spektrometru, u kterého je vyžadováno velmi rychlé polohování s velmi malým krokem (od 0.1 do 0.001mm). V rámci spolupráce s Ústavem chemie, Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity se podílíme na řešení projektu hmotnostního spektrometru TOF-MALDI. Tento spektrometr je osazen stolkem s rotačními DC motory a pohybovými šrouby, které nevyhovují jak rychlostí a přesností polohování, tak i nižší spolehlivostí. Stolek pracuje ve vysokém vakuu a je obklopen elektromagnetickým polem hodnoty blízké 15kV. Piezoelektrické motory mají potenciál nahradit dosavadní konvenční elektromagnetické motory ve stolku, které nyní obsahuje hmotnostní spektrometr. Tím se předpokládá zrychlení dynamiky a přesnosti polohování stolku.

Obr. 13. Hmotnostní spektrometr MALDI-TOF. [9]

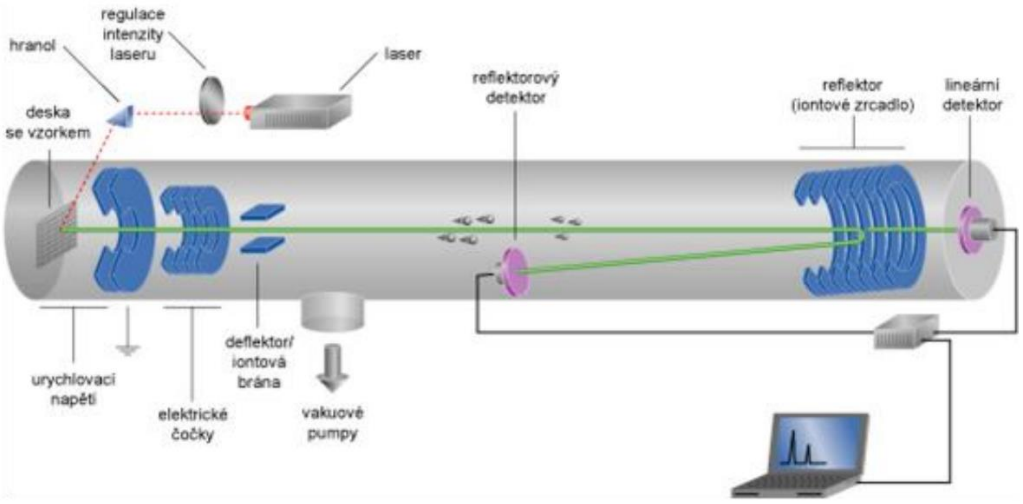
Zobrazovací hmotnostní spektrometrie je technika sloužící k vizualizaci prostorové distribuce látek ve zkoumaném vzorku. Základním principem je rozdělení vzorku na částice, u kterých je zjišťováno poměrné číslo hmotnosti a elektrického náboje. Oproti běžnému optickému zobrazení, kdy jsou pro každý pixel zobrazovaného vzorku zaznamenány barvy a jejich intenzity, jsou zaznamenávána hmotnostní spektra. Ze souboru spekter získaných z analyzovaného vzorku lze generovat obrazy pro zvolenou hmotnost, přesněji poměr hmotnosti vůči náboji. Analýzou řezů vzorku lze získat představu také o trojrozměrné distribuci látek. [9]

V dnešním výzkumu hmotnostních spekter převládají dvě metody ionizace vzorků. První možností je ionizace elektrosprejem. Druhou je tzv. MALDI metoda (Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization), která využívá ionizaci laserem a její hlavní výhoda spočívá v možnosti analyzovat vzorky vícekrát. Další výhodou jsou jednodušší spektra, protože při MALDI metodě vznikají jen jednou nabité iontya jelikož se jedná o „měkkou“ fragmentaci, lze analyzovat komplexní sloučeniny. [9], [10]



Obr. 14. Princip MALDI ionizace. [10]

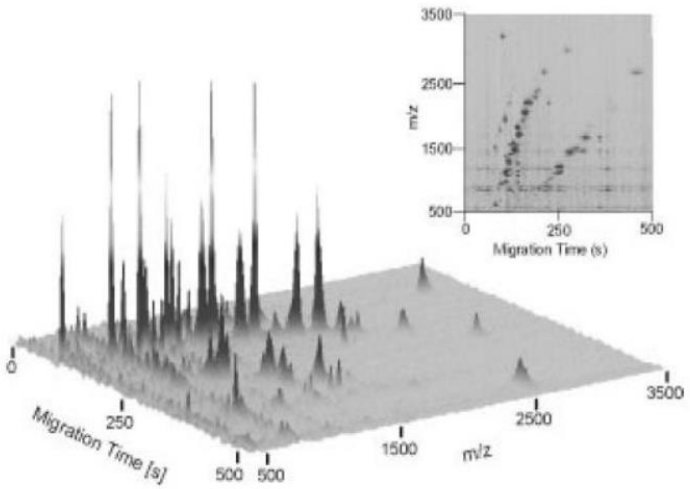
K měření dat se používá průletový analyzátor TOF (Time of Flight). Analyzátor měří čas přeletu částic. Vzorky jsou nejprve naneseny na matrici (Obr. 17) a poté společně s matricí umístěny ve vakuové komoře. Následně se částice za pomocí laseru ionizují, a poté jsou urychlovány vysokým napětím (přibližně 15kV). Takto urychlené částice se pohybují v letové trubici o známé délce. Na jejím konci je detektor, do něhož ionty naráží. Nárazy jsou detekovány a pomocí hardwarového řešení převáděny na napětí. [9]



Obr. 15. Schéma TOF spektrometru. [9]

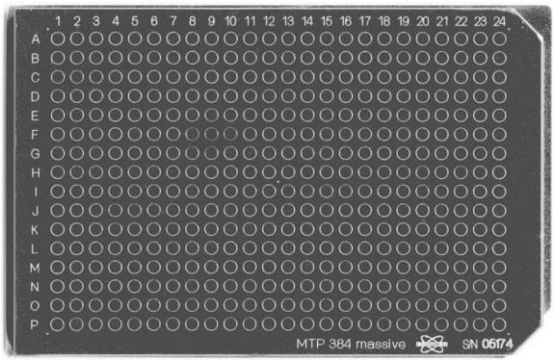
Jelikož mají jednotlivé prvky různé hmotnosti, po urychlení stejným urychlovacím napětím mají různou kinetickou energii. Tento princip zapříčiní odchylku v rychlostech jednotlivých iontů a také různou dobu letu pro jednotlivé částice. Ani částice o stejné hmotnosti však nemusí mít stejnou počáteční kinetickou energii, tudíž je možné detekovat malé odchylky u stejných látek. Tento problém je částečně řešen pomocí iontového zrcadla zabudovaného v letové trubici. [9]

Data jsou interpretována jako jednotlivá spektra. Výsledkem je graf zobrazující intenzitu částic o dané hmotnosti.



Obr. 16. Ukázka naměřených dat z hmotnostního spektrometru. [9]

Využitím hmotnostní spektrometrie je identifikace neznámých látek, určování izotopového složení prvků v molekule a stanovení struktury sloučeniny. Další použití zahrnují kvantitativní množství směsi ve vzorcích nebo studium základů iontů v plynné fázi chemie. Běžně se používá v analytických laboratořích, které studují fyzikální, chemické nebo biologické vlastnosti nejrůznějších sloučenin. [9]



Obr. 17. Nanášecí matrice s vygravírovanými spoty. [9]

4.1 Vakuum

Na návrhy zařízení, která pracují v prostředí vakua, jsou kladeny specifické parametry a uplatňovány různé konstrukční principy. Jelikož se výše zmíněný stolek obsažený v hmotnostním spektrometru nachází ve vysokém vakuu, následující kapitoly jsou věnovány druhům, vlastnostem a způsobu jak lze vakua dosáhnout.

Teoretická fyzika používá pojem dokonalé vakuum, což je stav systému s nejnižší možnou energií. V ideálním případě označuje vakuum takový fyzikální stav, v němž není přítomná žádná částice, a to jak hmoty (např. elektrony, protony a podobně), tak ani záření (např. fotony). Jedná se tedy o část prostoru, která neobsahuje hmotu, může však do ní zasahovat fyzikální pole, např. gravitační. Takové vakuum bývá označováno jako dokonalé. [11]

4.1.1 Stupně vakua

Vakuum se vytváří vývěvami a měří pomocí různých vakuometrů. Dokonalému vakuu, kterého nelze dosáhnout, by odpovídala nulová hodnota tlaku (nejnižší laboratorně dosažená hodnota je však 1.33×10^{-11}Pa).

V praxi dělíme vakuum do několika stupňů, které se liší principem, jakým jich lze dosáhnout a změřit, a také rozlišujeme několik oblastí použití. [11]

Pásmo	**Tlak [Pa]**
Atmosférický tlak	$\approx 1{,}01 \times 10^5$
Podtlak	$1{,}01 \times 10^5 \ldots 10^4$
Hrubé vakuum	$10^4 \ldots 10^2$
Jemné vakuum	$10^2 \ldots 10^{-1}$
Vysoké vakuum	$10^{-1} \ldots 10^{-5}$
Ultravysoké vakuum	$10^{-5} \ldots 10^{-10}$
Extrémně vysoké vakuum	$<10^{-10}$

Tabulka 1. Stupně vakua. [11]

4.1.2 Podtlak

Podtlak se využívá ve strojírenství k uchopení předmětů, v potravinářství (vakuové balení a sušení) nebo jako tepelná izolace (vakuová okenní skla). Vytváří se běžnými

čerpadly a měří tlakoměry. Běžný vysavač dosahuje přibližně poloviny atmosférického tlaku. [11]

4.1.3 Hrubé vakuum

Hrubé vakuum je chemicky netečné prostředí, které zabraňuje oxidaci žhavých součástí, a proto se používá v elektrotechnice (výbojky, žárovky), ve strojírenství (vakuový ohřev, tavení, sváření, pájení) a podobně. Vytváří se zpravidla mechanickými vývěvami a měří termickými a jinými vakuometry. [11]

4.1.4 Jemné vakuum

Jemné vakuum poskytuje delší střední volnou dráhu částic, která umožňuje jisté typy výbojů, a proto se používá v elektronice (vakuové a rentgenové výbojky, čisté technologie, vakuové napařování aj.). Vytváří se mechanickými nebo difuzními vývěvami a měří se ionizačními vakuometry. [11]

4.1.5 Vysoké vakuum

Vysoké vakuum poskytuje relativně dlouhé volné dráhy a používá se převážně v elektronice (vakuová elektronka, elektronová mikroskopie, hmotnostní spektrometrie, výroba polovodičů atd.). Vytváří se tubomolekulárními, difuzními, sorpčními nebo iontovými vývěvami. Vyžaduje již používání vakuově kompatibilních materiálů, mazacích prostředků a těsnění. [11]

4.1.6 Ultravysoké a extrémně vysoké vakuum

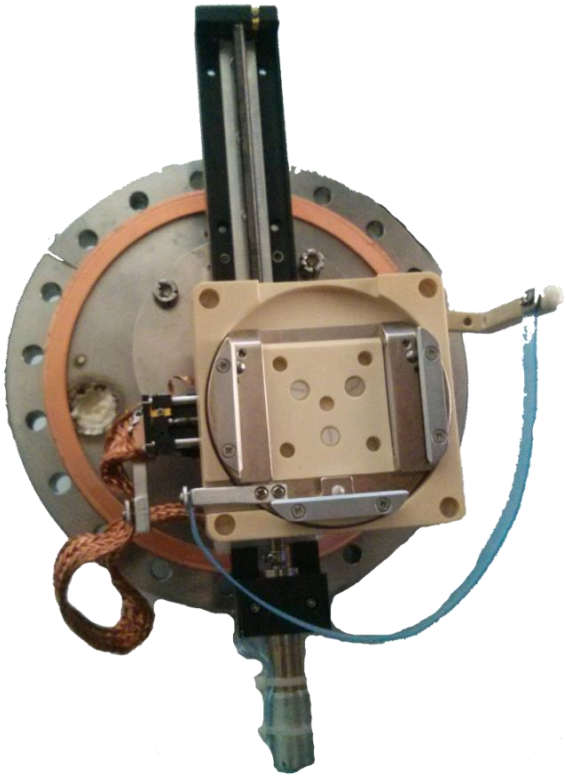
Ultravysoké a extrémně vysoké vakuum slouží především pro velmi dlouhé volné dráhy částic a používá se například v urychlovačích částic. Umožňuje také vytvořit a zachovat čistý povrch materiálů po dlouhou dobu a zkoumat jeho vlastnosti bez molekulami narušeného prostředí (například koroze). Vytváří se iontově sorpčními či kryogenními vývěvami či několikastupňovými sestavami mechanických vývěv. Vyžaduje speciální materiály a technologie. Vyskytuje se ve vesmírném prostoru za hranicemi zemské atmosféry. Průměrná hustota vakua mezihvězdného prostoru se odhaduje na 1 atom (v drtivé většině vodíku) na 1 m^3. [11]

5. NÁVRH STOLKU PRO HMOTNOSTNÍ SPEKTROMETR

Tato kapitola se zabývá návrhem nové sestavy stolku pro hmotnostní spektrometr popisovaný v předchozí kapitole. V následujících kapitolách je ověřována přesnost a dynamika vybraných piezoelektrických motorů. V případě kladných výsledků bude na základě této navrhnuté sestavy vyrobena skutečná sestava stolku pro řešený hmotnostní spektrometr.

5.1 Popis stávajícího návrhu

Na obr. 18 je zobrazena dosavadní sestava stolku využívající konvenčních elektromagnetických motorů, které jsou rozměrnější, než je otvor komory pro jejich vložení (měděné těsnění vymezuje průměr otvoru). Při instalaci je tedy nutné sestavu rozebrat a protáhnout ji rozloženou do nitra komory. Tento postup způsobuje nemalé problémy a provést tuto operaci pro jednoho člověka je téměř nemožné. Komponenty musí být velice přesně vystředěny a tudíž jakékoliv neopatrné „ťuknutí“ může způsobit nefunkčnost celé sestavy. Následná kalibrace je komplikovaná, jelikož pro správné ověření se musí sestava vložit do hmotnostního spektrometru, vyčerpat vzduch pro dosažení požadovaného vakua a následně ověřit funkčnost. Stávající stolek je schopen zvládnou pojezd mezi body vzdálenými 100µm za 117ms.

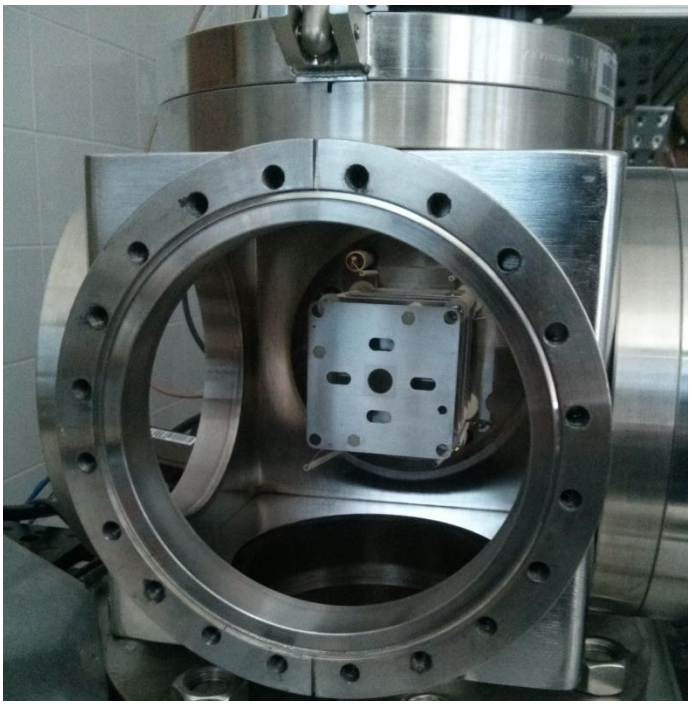


Obr. 18. Dosavadní mechanismus stolku.

5.2 Požadavky nového návrhu

Hlavními požadavky nového návrhu je zrychlení a zpřesnění polohování. Stolek se nachází ve vysokém vakuu, tudíž musí být všechny komponenty použité v sestavě použitelné pro vakuum. Je požadována dostatečná tuhost, kompaktnost a co nejjednodušší instalace. V blízkosti vzorku se nachází napětí blízké hodnotě 15kV. Nečistoty mohou v takto vysokém poli způsobovat nežádoucí elektrické výboje. Nutná je tedy izolace části se vzorkem od ostatních komponentů. Místo kde přijde našroubovat příruba se stolkem je zobrazeno na obr. 19.

Rozsah polohování je požadován minimálně 35mm a to pro osu X i Y. Vzdálenosti mezi řádky a sloupci jsou 100µm. V budoucnu je však možné tuto vzdálenost zmenšit až na 1µm, ale v tuto chvíli to není možné z důvodu limitní velikosti laserového paprsku.



Obr. 19. Místo pro přišroubování příruby.

5.3 Volba motorického a řídícího vybavení

Komponenty byly voleny s ohledem na požadavky nového návrhu a konzultovány se zástupci firmy PiezoMotor Upsala AB.

5.3.1 Motor Piezo LEGS Caliper

Caliper je piezoelektrický motor typu Piezo LEGS od firmy PiezoMotor Uppsala AB. Princip tohoto motoru je zmíněn v kapitole 3.1.5. Oproti jiným verzím s podobnými

parametry má tento motor výhodu v možnosti umístění motoru do nitra konstrukce. Tato vlastnost je žádoucí pro náš případ, kde je snaha dosáhnout co nejkompaktnějších rozměrů. Další parametry jsou uvedeny v tab. 2. Polohovatelný rozsah motoru je pouhých 29mm, což je pro polohování stolku nedostatečné. Komunikací se zástupci výrobce, byla potvrzena možnost dodání tohoto motoru v provedení se zdvihem 35mm.

Obr. 20. Piezo LEGS Caliper. [12]

	Hodnoty	**Poznámka**
Rozsah	29 mm	100.8 mm tyč, bez mechanického adaptéru
Rozsah rychlosti	0-10 mm/s	doporučená, bez zatížení
Délka kroku	0.001 µm* 4 µm	- mikro krok, 8192 (záleží na použité řídící jednotce) na wfm-step, bez zatížení - wfm-step, bez zatížení
Rozlišení*	< 1 nm	
Doporučené provozní zatížení	0-10 N	Pro nejlepší přesnost, dynamiku a životnost.
Přídržná síla	20 N	
Zajišťovací síla	22 N	
Maximální napětí	48 V	
Konektor	2x pájený kabel s JST 05SR-3S	
Rozměry	60 x 20.7 x 20.4	více v technických specifikacích
Materiál konstrukce	Nerezová ocel	
Hmotnost	110 g	odhadovaná
Operační teplota	0 to +50 ºC	

Tabulka 2. Parametry Piezo LEGS Caliper. [12]

5.3.2 Řídící jednotka PMD206

Jelikož firma PiezoMotor Uppsala AB nabízí pouze jednu řídící jednotku, která je schopna řídit více než jednu osu, padla volba na PMD206. Parametry této řídící jednotky jsou uvedeny v tab. 3.

Obr. 21. Řídící jednotka PMD206. [13]

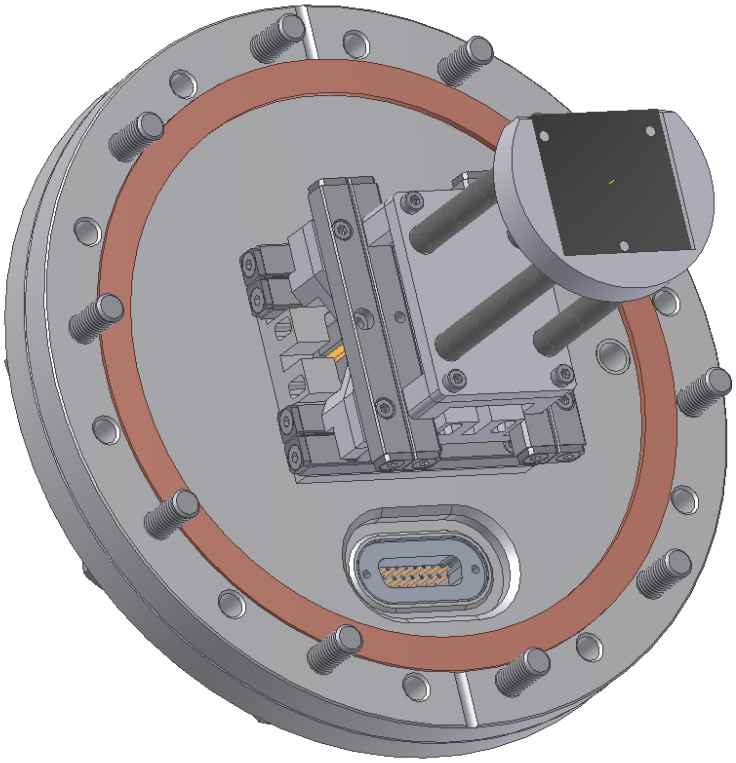
	Hodnoty	Poznámka
Počet os	6	
Elektrické fáze na osu	4	
Rozsah napětí	0-45 V	
Maximální rozlišení	8192 µ krok / wfm-step	příklad LT20 lineární motor bez zatížení: jeden wfm-step ≈ 5 µm jeden µstep ≈ 0.0006 µm = 0.6 nm
Počet os senzorů	6	
Obecné I/O	4 vstupní 3 výstupní	Na každou osu senzoru
Vlastnosti I/O Portů	Směr kroku rozhraní, Analog run	
Komunikační rozhraní	RS485 TCP/IP	Příkazy jsou odesílány ve formátu ASCII
Rozhraní pro připojení PC	1 x D-sub 9M 1 x RJ45	COM1 TCP/IP
Konektor pro motor	6 x D-sub 9F	M1-M6
Sensor a I/O konektor	6 x D-sub HD 15F	S1-S6
Externí senzor	1 x D-sub 9M 1 x RJ45	COM2 TCP/IP
Zdroj napětí	110-230 V AC, 50/60 Hz	
Rozměry	328 x 298 x 83	

Tabulka 3. Parametry řídící jednotky PDM 206. [13]

5.4 Návrh hardwarové části

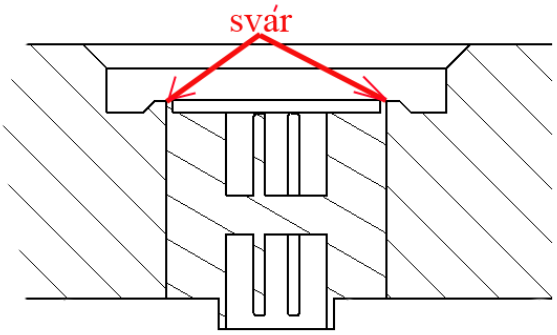
Navrhnutá sestava v prostředí Autodesk Inventor pro hmotnostní spektrometr je zobrazena na obr. 22. Základní částí této sestavy je normalizovaná příruba DN160CF 203mm, kompatibilní s ISO 3669.

Na přírubu je nasazeno měděné těsnění GA-0800, které po dotažení šroubů k hmotnostnímu spektrometru dolehne na vnitřek hmotnostního spektrometru a utěsní ho tak od okolního prostředí. Do příruby je nutné vyvrtat čtyři díry pro uchycení spodní desky osy X a díru pro konektor Kings SD1765-1, který slouží jako přívod vysokého napětí do prostoru stolku.



Obr. 22. Navrhnutá sestava stolku.

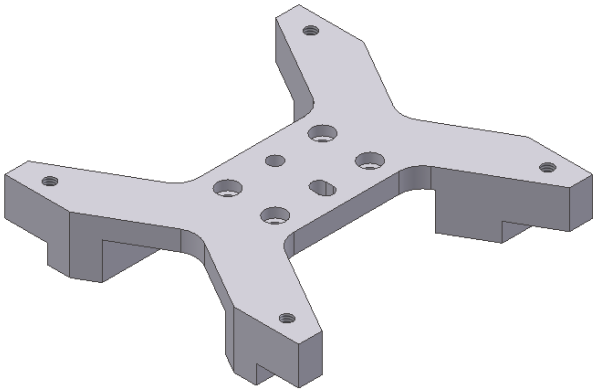
Poslední úpravou příruby je vyfrézování kapsy, do které bude vsazena a přivařena vakuová průchodka pro napájení a řízení piezoelektrických motorů. Na obr. 23 je zobrazen řez vakuovou průchodkou a vyfrézovanou kapsou, kde je vidět náběh materiálu směrem k průchodce. Tato úprava má za úkol zamezit deformacím příruby při svařování, jelikož sebemenší nepřesnosti a způsobené deformace příruby můžou způsobit ztrátu vakuové těsnosti.



Obr. 23. Řez vakuové průchodky a vyfrézované kapsy.

Pořadí os bylo záměrně voleno tak, že osa X je připevněna na přírubu jako první. Jelikož celá sestava bude ve vertikální poloze, byla snaha co nejvíce osy odlehčit. Osa X, která bude přenášet největší váhu (nese celou osu Y), je umístěna tak, aby se pohybovala pouze v horizontálním směru.

Konstrukčním materiálem byl zvolen dural a to hned ze dvou důvodů, tím nejdůležitějším je jeho nízká měrná hustota a z toho vyplývající nízká hmotnost. Druhým důvodem je kompatibilita duralu s vakuovým prostředím. Na obr. 24 je zobrazena vrchní deska osy X, která je tvarově odlehčena, aby bylo dosaženo její nízké hmotnosti.

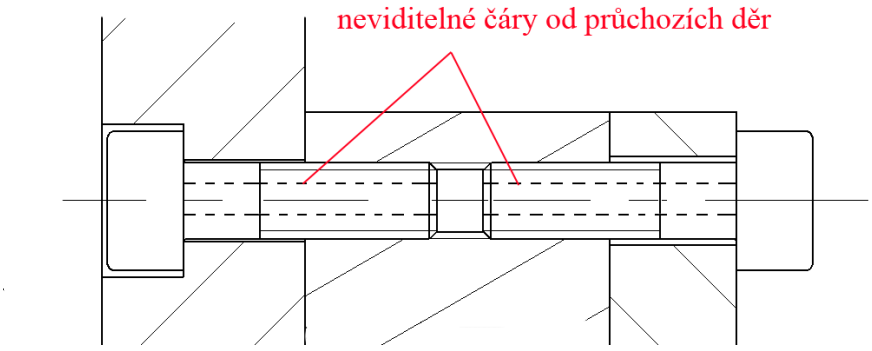


Obr. 24. Vrchní deska osy X.

Lineární vedení LWR 3075 budou přesně vymezovat osu pohybu a zamezovat namáhání piezoelektrického motoru na ohyb. Následně bude upraven jejich rozsah, který primárně odpovídá hodnotě 38mm. Úprava bude provedena zkrácením obou konců o 1,5mm. Výsledný rozsah tedy bude odpovídat hodnotě 35mm, přičemž tato hodnota je shodná s rozsahem navrhnutých motorů. Tím bude zamezeno překročení rozsahu polohování u motoru, které by mohlo způsobit jeho trvalé poškození.

Šrouby, použité pro spojení součástí v neprůchozích dírách nacházejících se ve vakuu, budou duté. Šrouby s touto úpravou lze zakoupit ve specializovaných prodejnách, nebo si

tuto úpravu provést na standardně dostupných šroubech. Důvodem této úpravy je zamezení vzduchových bublin, které vzniknou mezi dírou a šroubem při odčerpávání vzduchu z prostoru, kde je požadován vysoký stupeň vakua.



Obr. 25. Díry ve šroubech.

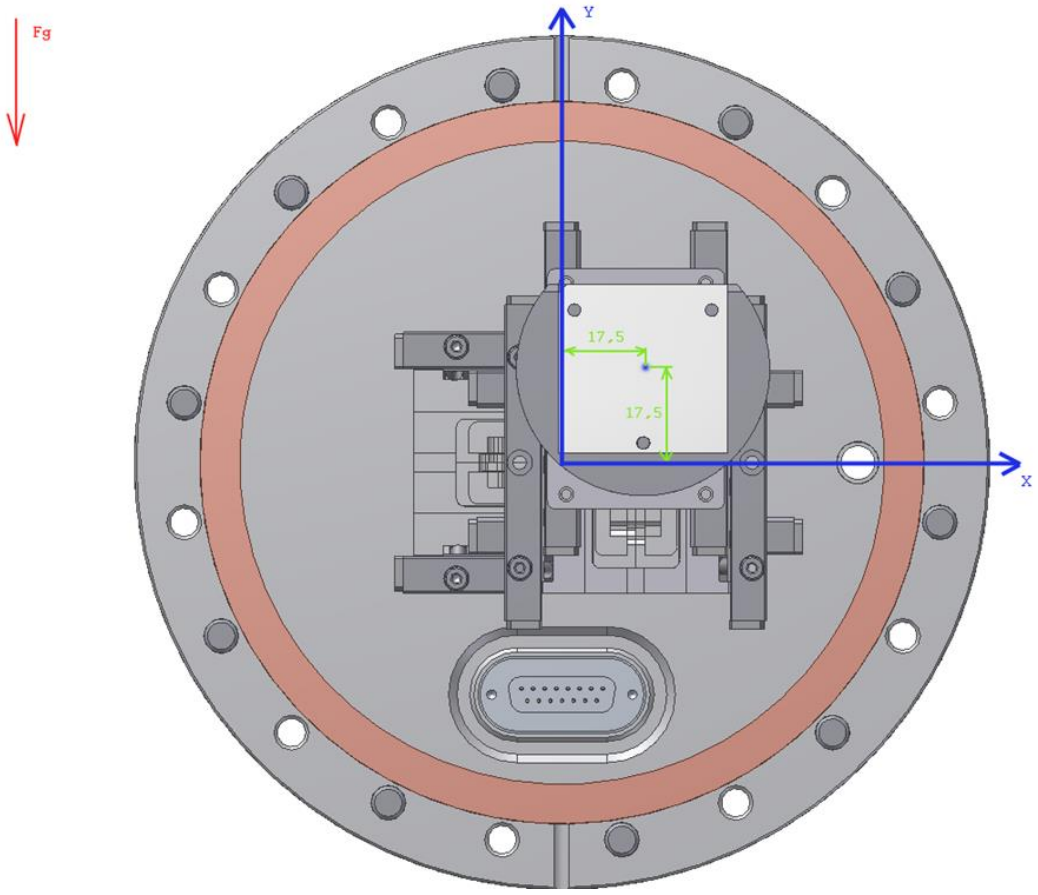
5.5 Síly působící na jednotlivé osy

Před samotným zapůjčením motorů byly provedeny výpočty ověřující síly působící na jednotlivé osy. Pro výpočet sil vycházíme z 2. Newtonova zákona (1), kde byla hmotnost pro každou osu odvozena z 3D modelu. Pro výpočet zrychlení použijeme vzorec (2) průměrného zrychlení. Změna rychlosti použitá ve vzorci (2) je rozdíl mezi klidovou a maximální možnou rychlostí zvoleného piezoelektrického motoru (10 mm/s). Jako časový interval změny rychlosti byla zvolena 0,01s.

$$F = m \cdot a \tag{1}$$

$$\mathrm{a} = \frac{\Delta \mathrm{v}}{\Delta \mathrm{t}} \tag{2}$$

Pro ověření budeme předpokládat situaci, kdy na motor působí největší síla. Výrobce udává doporučený rozsah sil 0-10N. Pro optimální přesnost a rychlost by síly neměly překročit tento rozsah. Na obr. 26 jsou zakresleny polohy os.



Obr. 26. Rozložení os na navrženém stolku.

5.5.1 Síla působící na osu Y

Díly neseny osou Y jsou uvedeny v tab. 4 spolu s jejich počtem a hmotností. Celková hmotnost nesená osou Y je tedy 0,568 kg.

Název dílu	Počet [ks]	Celková Hmotnost [kg]
Vzorek	1	0,037
Držák vzorku s nohama	1	0,376
Spojovací deska	1	0,031
Vrchní deska osy Y	1	0,039
Lineární vedení	1	0,073
Šroub M3 x 10	12	0,001

Tabulka 4. Díly neseny osou Y.

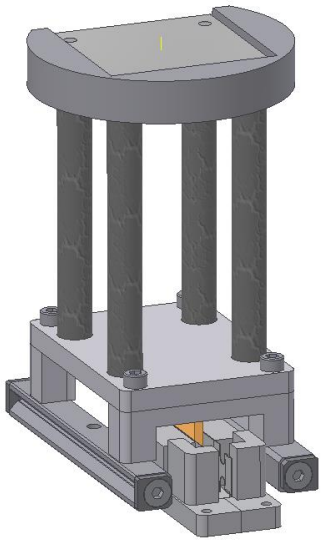
Maximální sílu musí motor vyvinout v případě, když se osa Y bude pohybovat v kladném směru. Maximální síla se tedy bude skládat z gravitační, setrvačné a třecí síly v lineárních vedeních. Předpokládejme třecí sílu 1N.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0{,}01}{0{,}01} = 1m \cdot s^{-2} \quad (3)$$

$$F_s = m \cdot a = 0{,}568 \cdot 1 = 0{,}568N \quad (4)$$

$$F_g = m \cdot g = 0{,}568 \cdot 9{,}81 = 5{,}57N \quad (5)$$

$$F_{max} = F_g + F_s + F_t = 5{,}57 + 0{,}568 + 1 = 7{,}138N \quad (6)$$



Obr. 27. Díly neseny osou Y.

5.5.2 Síla působící na osu X

Díly neseny osou X jsou uvedeny v tab. 5 spolu s jejich počtem a hmotností. Celková hmotnost nesená osou X je tedy 0,904 kg.

Název dílu	Počet [ks]	Celková Hmotnost [kg]
Díly neseny osou Y	1	0,568
Lineární vedení	2	0,146
Spodní deska osy Y	1	0,037
Vrchní deska osy X	1	0,031
Motor osy Y	1	0,110
Šroub M3 x 10	12	0,012

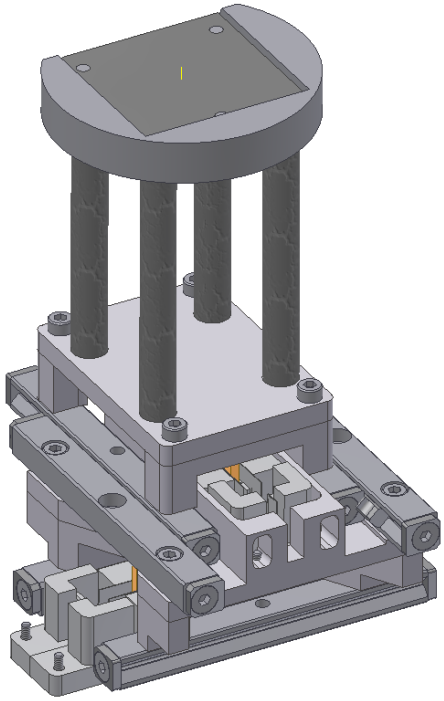
Tabulka 5. Díly neseny osou X.

Na tuto osu bude působit setrvačná a třecí síla. Předpokládejme třecí sílu 1N.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0{,}01}{0{,}01} = 1m \cdot s^{-2} \quad (7)$$

$$F_s = m \cdot a = 0{,}904 \cdot 1 = 0{,}904N \quad (8)$$

$$F_{max} = F_s + F_t = 0{,}904 + 1 = 1{,}904N \quad (9)$$

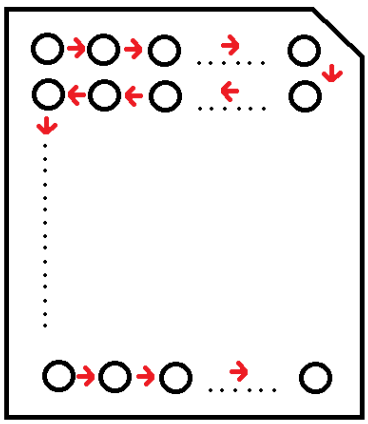


Obr. 28. Díly neseny osou X.

5.5.3 Zhodnocení vypočtených sil pro jednotlivé osy

Pro osu X i Y je navrhnut stejný piezoelektrický motor, který má doporučený rozsah sil 0-10N. Maximální dovolená pro osu Y je 7,14N, což odpovídá rozsahu zvoleného motoru. Pro osu X je maximální zatížení 1,9N, které se taktéž nachází v rozsahu.

Z těchto vypočtených výsledků lze předpovídat následný směr pohybu při polohování. Směr působení gravitační síly bude kolmý na směr posuvu osy X, čímž gravitaci můžeme téměř vyloučit. Působení gravitace se promítne pouze nepatrně vyšším třením lineárních vedení a výsledná působící síla bude menší než síla působící na osu Y. Je tedy vhodné nechat osu X konat největší část posuvů a naopak osou Y konat přísuvy. Předpokládaná cesta polohování je zobrazena na obr. 29.



Obr. 29. Předpokládaná cesta polohování.

5.6 Alternativní řešení s využitím hardwaru od firmy PI

Jako možnou alternativou navrhnutého řešení by mohla být varianta od konkurenční firmy PI (M-683 Dynamic micropositioning stage), která nabízí již sestavený celek, který obsahuje piezoelektrický motor, zpětnovazební snímač, lineární vedení a kovovou konstrukci. Toto řešení nabízí 35x vyšší katalogovou maximální rychlost oproti navrhnutému řešení od firmy PiezoMotor Uppsala AB, ale má nižší dosažitelné rozlišení. M-683 splňuje podmínky použitelnosti ve vakuovém prostředí a provedení je koncipováno tak, že lze připevnit další osu bez nutných konstrukčních úprav.

	Hodnoty
Rozsah	50 mm
Rozsah rychlosti	0-350 mm/s
Délka kroku	0.3 µm
Přídržná síla	6 N
Zajišťovací síla	50 N
Přesnost snímače	0,1 µm
Konektor	MDR-konektor, 14-pin
Rozměry	130 x 95 x 21
Materiál konstrukce	Hliník (černý elox)
Hmotnost	650 g
Operační teplota	0 to +50 ºC

Tabulka 6. Parametry M-683. [14]

Obr. 30. Dynamic micropositioning stage M-683. [14]

6. APLIKACE PRO ŘÍZENÍ A VYHODNOCENÍ

Aplikace pro řízení a následné vyhodnocování, je vytvořena s využitím grafického vývojového prostředí NI LabView a provozována na desktopu.

6.1 Použitý hardware pro řízení a měření

Firma PiezoMotor Uppsala AB zapůjčila pouze demo sadu, která neobsahuje piezoelektrický motor pro použití ve vakuu a snímač, který měl sloužit jako zpětná vazba. Níže je uvedený piezoelektrický motor a k němu potřebná řídící jednotka obsažená v dodané demo sadě.

6.1.1 Piezo LEGS Twin 20N

Pro ověření přesnosti a dynamiky byl zapůjčen jiný typ piezoelektrického motoru, než navrhnutý. Konstrukce je odlišná oproti navrhnutému motoru (kapitola 5.3.1), ale parametry týkající se přesnosti a dynamiky jsou shodné a na experimentální vyhodnocování nemá tento rozdíl vliv.

Obr. 31. Piezo LEGS Twin 20N. [15]

6.1.2 Řídící jednotka PMD 101

Dodaná řídící jednotka lze k řídícímu PC připojit skrze sběrnici USB. Jednotka umí řídit pouze jeden motor, což ale pro podmínky našeho testování vyhovuje. Výrobce uvádí k této jednotce sadu příkazů, na jejichž základě lze snadno vytvořit vlastní aplikaci pro řízení motoru.

Obr. 32. Řídící jednotka PMD 101. [16]

6.1.3 Snímač polohy RGH24Y

Snímač polohy RGH24Y je bezkontaktní čtecí hlava s vnitřní interpolací, jejíž konstrukce nabízí vysokorychlostní a spolehlivý provoz s nulovým třením a opotřebením. Zabudovaná nastavovací dioda usnadňuje instalaci čtecí hlavy. Filtrační optika zaručuje vynikající stabilitu signálu i v podmínkách nevhodných pro většinu otevřených optických snímačů. Referenční značka zajišťuje opakovatelnou výchozí polohu, zatímco koncový spínač nabízí indikaci konce dráhy osy.

Obr. 33. Snímač polohy RGH24Y. [17]

	Hodnoty
Rozlišení	0,1 µm
Napájecí zdroj	5V ± 120mA
Operační teplota	0° C až 55°C
Vlhkost	80% max.
Těsnění	IP40
Zrychlení	500m/s^2
Povolené vibrace	100m/ s^2
Hmotnost	11g
Typ konektoru	CAN 9
Montážní tolerance	0,8 ± 0,1mm

Tabulka 7. Parametry snímače polohy RGH24Y. [17]

6.1.4 Digitální modul NI 9411

Modul NI9411 byl využit pro napájení a připojení optického snímače k modulárnímu systému.

	Hodnoty
Počet vstupních kanálů	6
Maximální vzorkovaní	2 MHz
Vstupní napětí	0 V – 24 V
Pracovní rozsah	-40°C – 70°C
Konektor	15pin D-Sub

Tabulka 8. Parametry digitálního modulu NI 9411. [18]

Obr. 34. Digitální modul NI 9411. [18]

6.1.5 Modulární rozhraní NI CompactDAQ – USB

Modulární rozhraní pro připojení modulu k řídicímu systému prostřednictvím USB sběrnice.

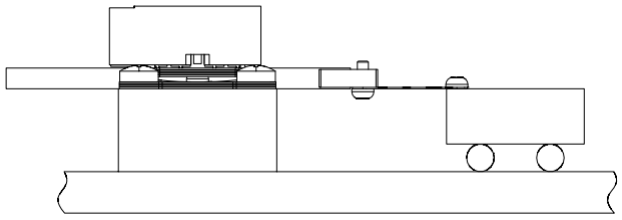
Obr. 35. Modulární rozhraní NI CompaqDAQ. [19]

6.1.6 Přípravek pro testování motoru

Pro uchycení a přesné vedení zapůjčeného motoru byl vyroben přípravek, který je zobrazen na obr. 36. Hlavními částmi této sestavy jsou vrchní a spodní hliníkový díl, mezi které je vloženo lineární vedení LWR 3100 sloužící pro přesné vedení motoru. Lineární vedení zamezuje nežádoucímu namáhání keramické tyče motoru, které by mohlo způsobit jeho trvalé poškození. Funkční a dosedací plochy musely být vyrobeny s co největší přesností (ideálně na jedno upnutí), protože každá sebemenší nerovnost by se mohla promítnout do výsledného měření.

Obr. 36. Vyrobená sestava (rozměr 100x100mm).

Nejproblematičtější částí je přichycení keramické tyče motoru k celé konstrukci, jelikož tyč je křehká a snadno může prasknout (Obr. 37). Toto uchycení je v našem případě řešeno planžetou o tloušťce 0,07mm, která je připevněna k oběma koncům keramické tyče. Uvedené řešení dovoluje mírné vychýlení keramické tyče od vrchního hliníkového dílu. Později jsme vyhodnocováním zjistili, že toto řešení způsobuje okem nepozorovatelnou hysterezi mezi změnou směru polohování. Řešením tohoto problému by bylo do planžety vyfrézovat drážku pro šroub a planžetu na obou stranách dostatečně předepnout.

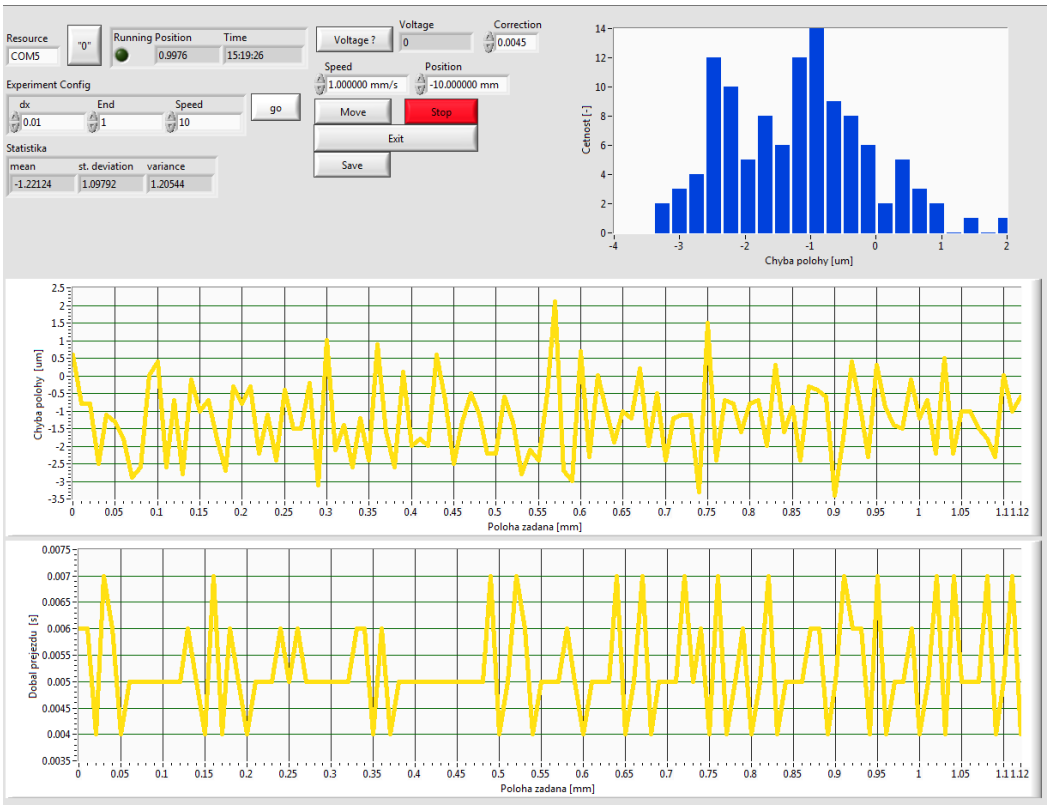


Obr. 37. Výrobcem doporučený způsob uchycení.

6.2 Princip aplikace

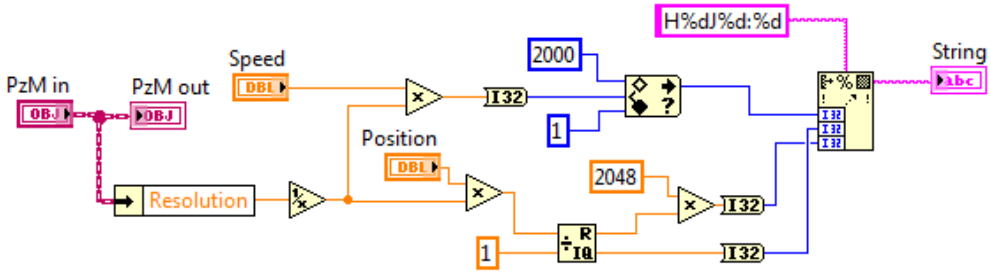
Aplikace pro řízení a vyhodnocování je vytvořena v grafickém vývojovém prostředí NI LabView (Obr. *38*). V aplikaci je možné polohovat piezoelektrickým motorem zadáním rychlosti a požadované vzdálenosti, kterou má motor urazit. Přepočtem těchto zadaných hodnot se vypočte počet kroků a s jakou frekvencí za sekundu se májí vykonat. Z těchto dvou hodnot se složí řetězec, který je prostřednictvím komunikační sběrnice USB odeslán do řídící jednotky. Jelikož jsme motor obdrželi bez snímače, nebylo možné využít zpětnou vazbu, díky které by bylo možné dosáhnout větších přesností při polohování.

Další možností polohování v aplikaci je zadání kroku, konečné polohy a s jakou rychlostí se má motor pohybovat. Konečná poloha je hodnota, které má být dosaženo při odměřování snímačem. V případě zadání těchto hodnot se vygenerují 3 grafy. Na prvním grafu je zobrazen histogram četností chyby polohy. Ve druhém grafu je zobrazena chyba polohy v závislosti na žádané poloze. Třetí graf zobrazuje závislost doby přejezdu na žádané poloze.



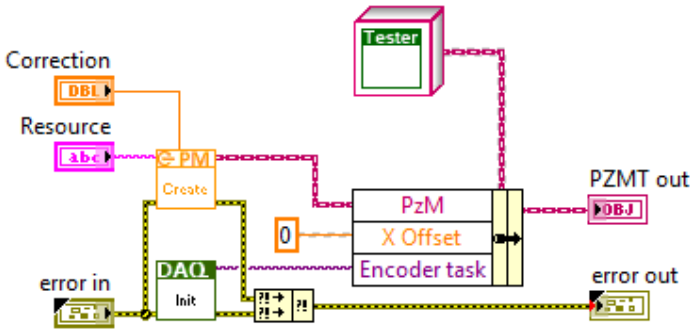
Obr. 38. Ukázka rozhraní aplikace.

Jako příklad pro přepočet zadaných hodnot, lze uvést rychlost rovnající se 1 mm/s a požadovanou délku přejezdu 10mm, kde vypočtený řetězec bude vypadat následovně H236J2358:1005. V případě znaku J je hodnota uvedená před dvojtečkou počet kroků a za dvojtečkou je zbytek po celočíselném dělení. Hodnoty za znakem H udávají počet kroků za sekundu. Na obr. 39 je vidět zdrojový kód výše popisovaného přepočtu.



Obr. 39. Výpočet řetězce ze zadaných hodnot.

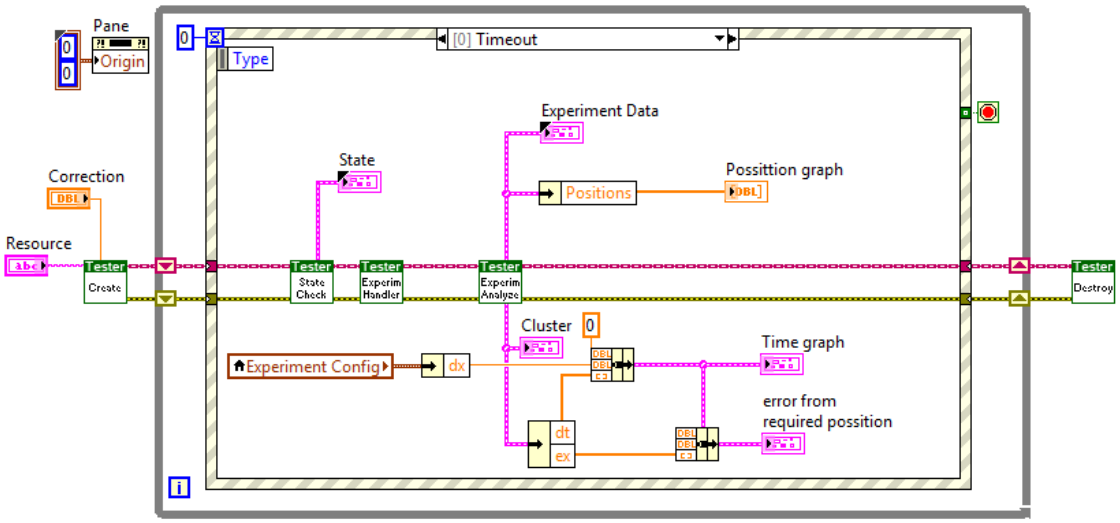
Ve výše uvedeném přepočtu se vychází z manuálu výrobce, kde je uvedena, přibližná délka kroku 5µm a maximální frekvence krokování 2000Hz odpovídající přibližně rychlosti pohybu motoru 10mm/s. Délka kroku je nelineárně závislá na zatížení motoru a aktuálním prokluzu, které jsou závislé na výrobních nepřesnostech a na prokluzu, který má charakter náhodného děje. Pro tuto skutečnost byla v aplikaci zavedena korekce, kterou se dá nepřesnost částečně eliminovat (Obr. 40).



Obr. 40. Ukázka řešení korekce.

Přesnost měření odezvy jednotky pro piezoelektrický motor je problematická hlavně z důvodu použití UART komunikace mezi jednotkou a řídicím systémem přes USB převodník, který má nedeterministickou odezvu. Z tohoto důvodu je testovací aplikace realizována na desktopu a ne na real-time systému.

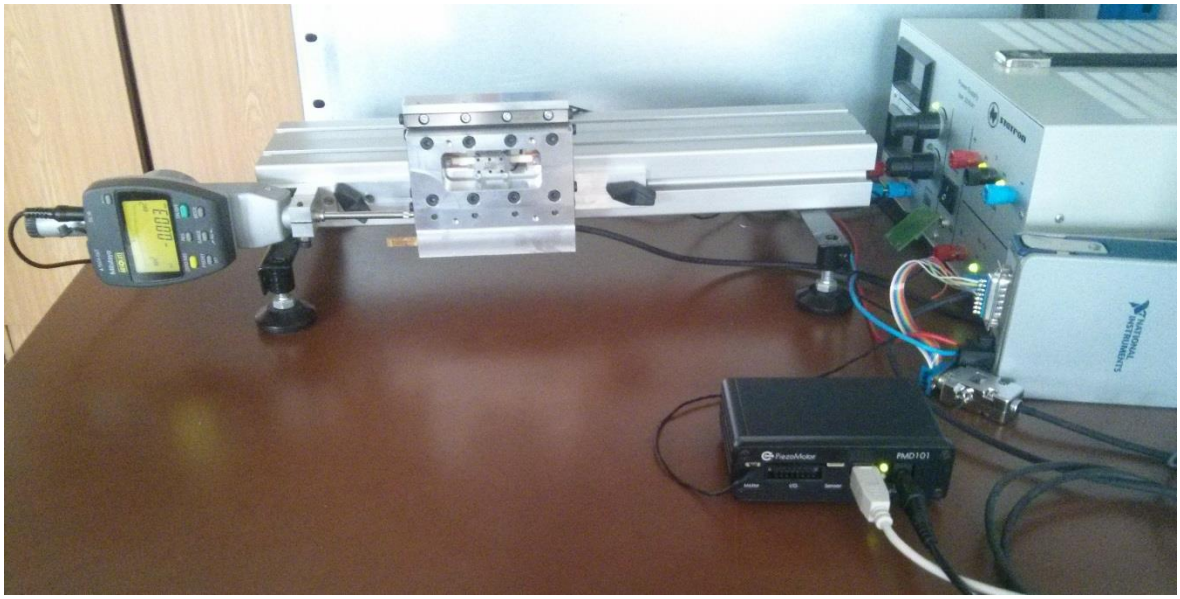
Použitím desktopu plynou omezení nejnižšího měřitelného zpoždění. Na obr. 41 je ukázka zdrojového kódu. Kde je nastaven časový interval pro obdržení následujícího příkazu 0s, tudíž bude využita maximální rychlost použitého hardware. Při vyhodnocování doby přejezdu použitého piezoelektrického motoru se nejmenší měřitelná doba pohybovala okolo 0,004s.



Obr. 41. Ukázka časové smyčky.

7. VYHODNOCENÍ DYNAMIKY A PŘESNOSTI V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

Měření bylo prováděno v laboratorních podmínkách, tedy v normálním atmosférickém tlaku a teplotě 25°C. Na obr. 42 je vidět všechen hardware testované sestavy, vyjma desktopu. V levé části obrázku je vidět snímač Mitutoyo 543-552E, který sloužil pro srovnání přesnosti výše zmíněného optického snímače. Hodnoty z těchto dvou měřidel se vzájemně shodovala a proto nejsou v této práci uváděny hodnoty ze snímače Mitutoyo.



Obr. 42. Ukázka testované sestavy.

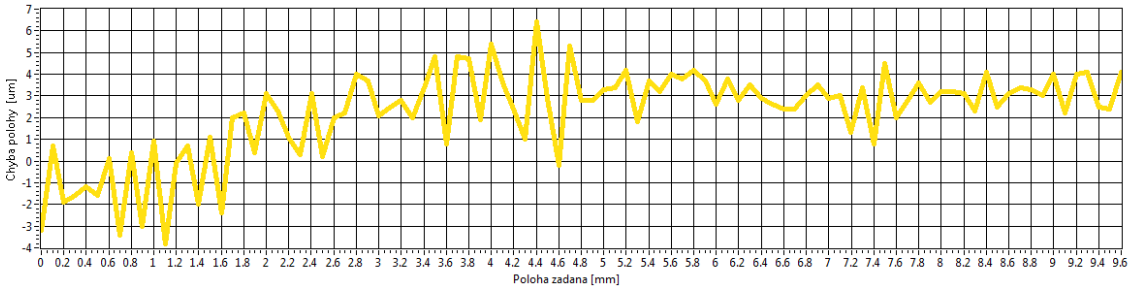
Testovaná sestava je upnuta v hliníkovém profilu, který zaručil správnou polohu při měření. Jelikož měření bylo prováděno s vysokou přesností (10^{-4} mm), tak se i nepatrná vibrace projevovala ve výsledném měření a bylo tedy nutné dbát zvýšené opatrnosti při měření.

7.1 Princip měření

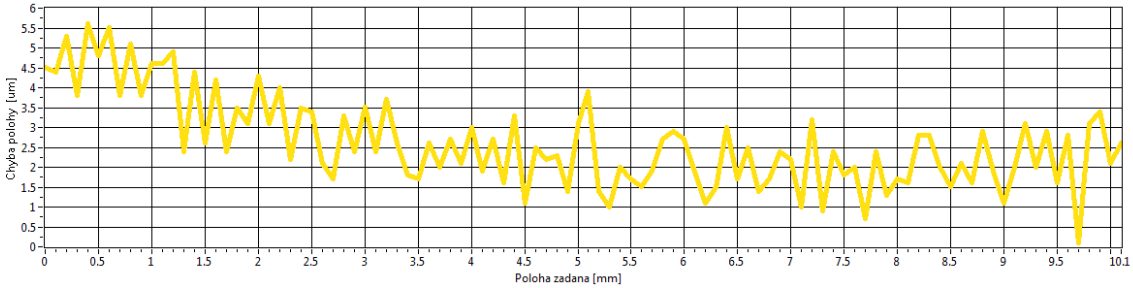
Měření bylo prováděno ve zvolených krocích (0,001mm, 0,01mm a 0,1mm). Největší krok byl volen na základě požadovaných parametrů pro stolek hmotnostního spektrometru, přesnější kroky byly testovány z důvodu možného vylepšení v budoucnosti. Pro každý krok byla volena vzdálenost 100x vetší než je daný krok, což odpovídá vzdálenostem (0,1mm, 1mm, 10mm). Všechny výše uvedené kroky byly testovány v rychlostech (0,1mm/s, 1mm/s, 5mm/s 10mm/s). Všechna výše uvedena měření byla provedena v polohách, kdy motor jezdil horizontálně, vertikálně směrem dolů a vertikálně směrem nahoru.

7.2 Naměřené grafy chyby polohy

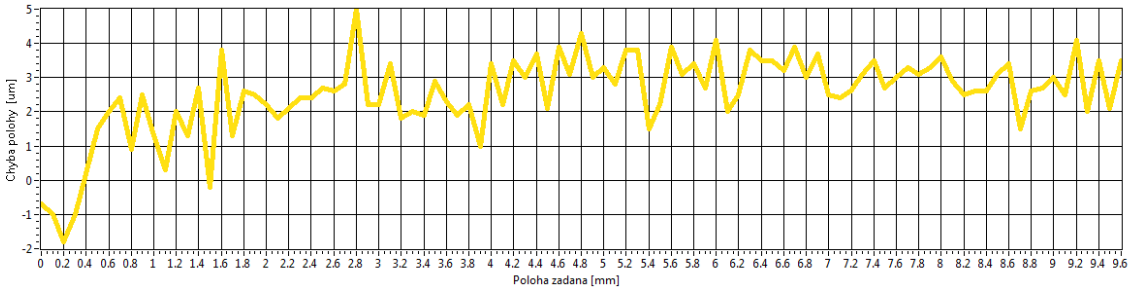
Níže jsou uvedeny grafy pro požadovaný krok a vzdálenost (kapitola 5.2), při maximální rychlosti 10mm/s.



Obr. 43. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, horizontální poloha motoru.



Obr. 44. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální poloha motoru, směr pohybu dolů.

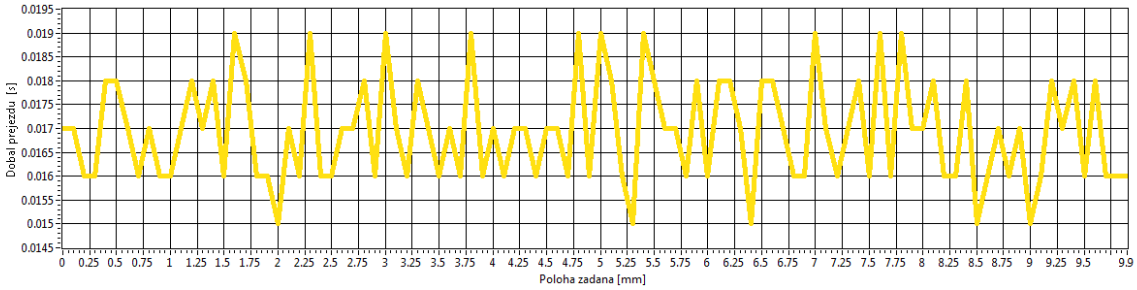


Obr. 45. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální nahoru.

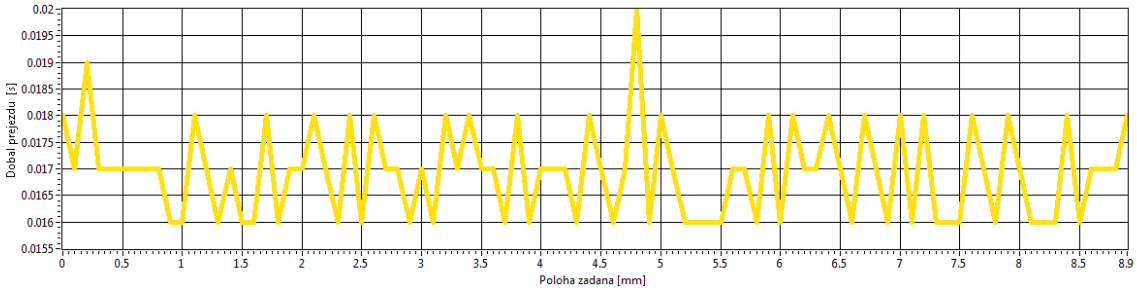
Z výše uvedených grafů vyplývá, že lze se motorem Piezo LEGS Twin 20N i při maximální rychlosti polohovat v případě horizontální polohy s přesností 0,011mm, vertikální polohy pohybem směrem dolů s přesností 0,006mm a vertikální polohy a pohybu směrem nahoru s přesností 0,007mm. Přesnost horizontální polohy nesplnila předpoklad přesnější hodnoty vůči vertikální poloze. Zde se pravděpodobně projevilo nedostatečné předepnutí planžet, které se v případě obou vertikálních měření kompenzovalo gravitační silou.

7.3 Naměřené grafy doby přejezdu

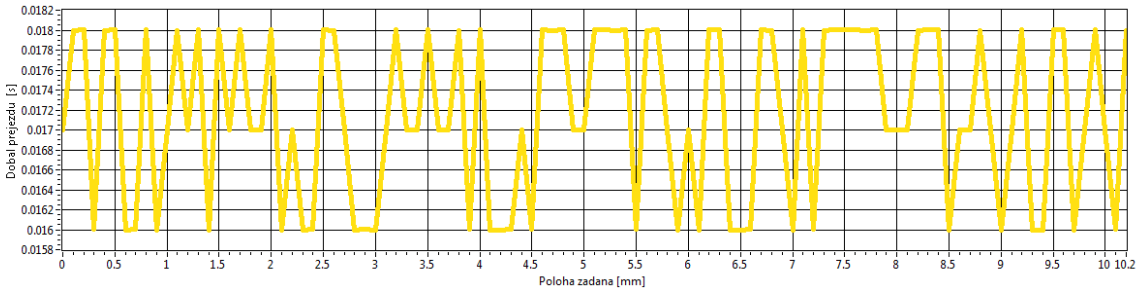
Níže jsou uvedeny grafy pro požadovaný krok a vzdálenost (kapitola 5.2), při maximální rychlosti 10mm/s.



Obr. 46. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, horizontální.



Obr. 47. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální dolů.

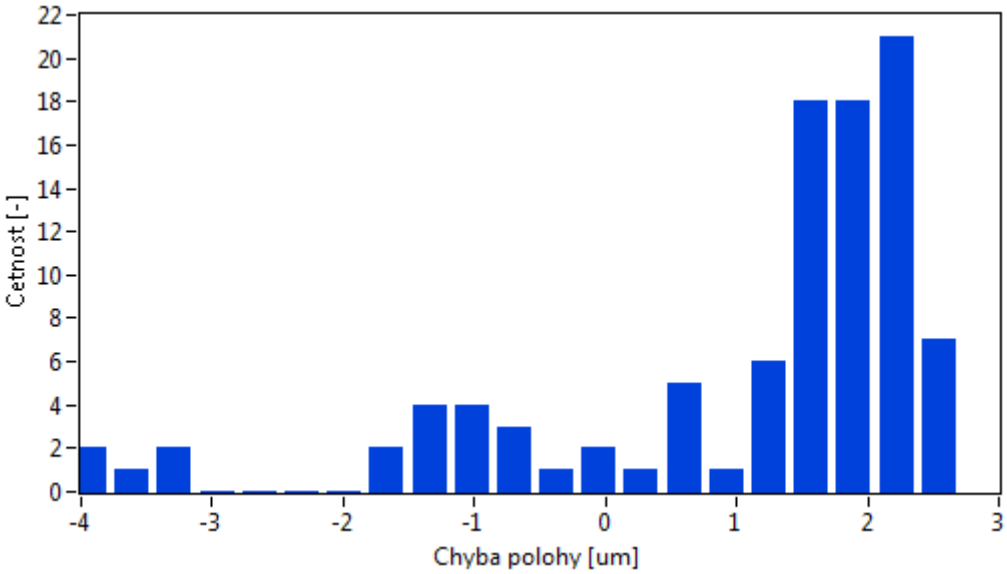


Obr. 48. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální nahoru.

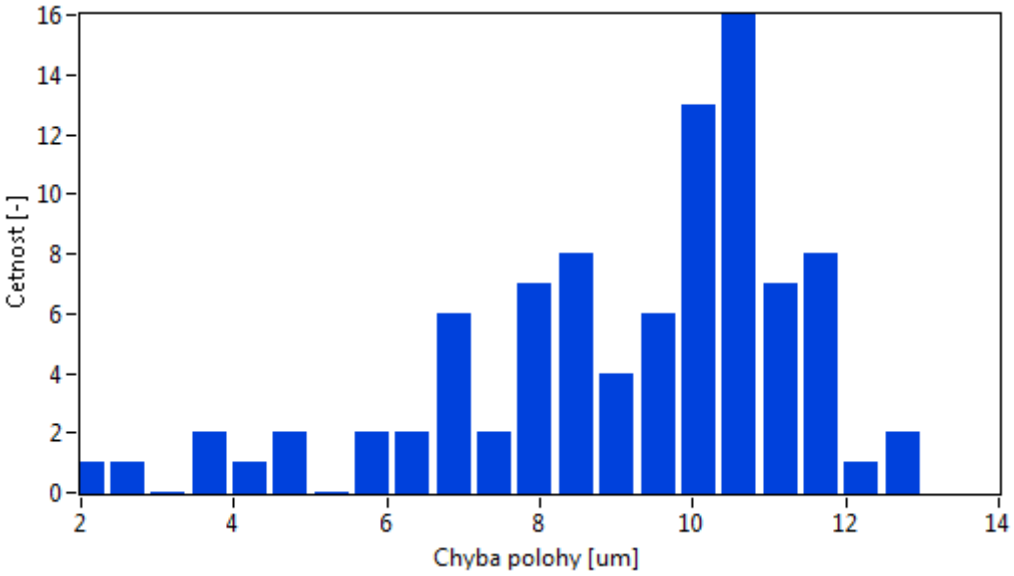
Z výše uvedených grafů vyplývá, že se zapůjčeným motorem lze při maximální rychlosti urazit krok 0,1mm v případě horizontální polohy nejhůře za 19ms, vertikální polohy směrem pohybu dolů nejhůře za 20ms a vertikální poloze směrem pohybu nahoru nejhůře za 18ms. Hodnoty jsou tedy téměř stejné a vliv polohy se na rychlosti téměř neprojevil.

7.4 Histogramy chyb polohy

Na níže uvedených grafech jsou zobrazeny četnosti chyb polohy, ze kterých je přehledně vidět kolik z naměřených hodnot se blíží přesné hodnotě a jaké je rozptýlení těchto hodnot. Histogramy jsou počítány pro 17 intervalů, v případě kroku 0.1mm ze 100 vzorků, pro krok 0.01mm z 1000vzorků

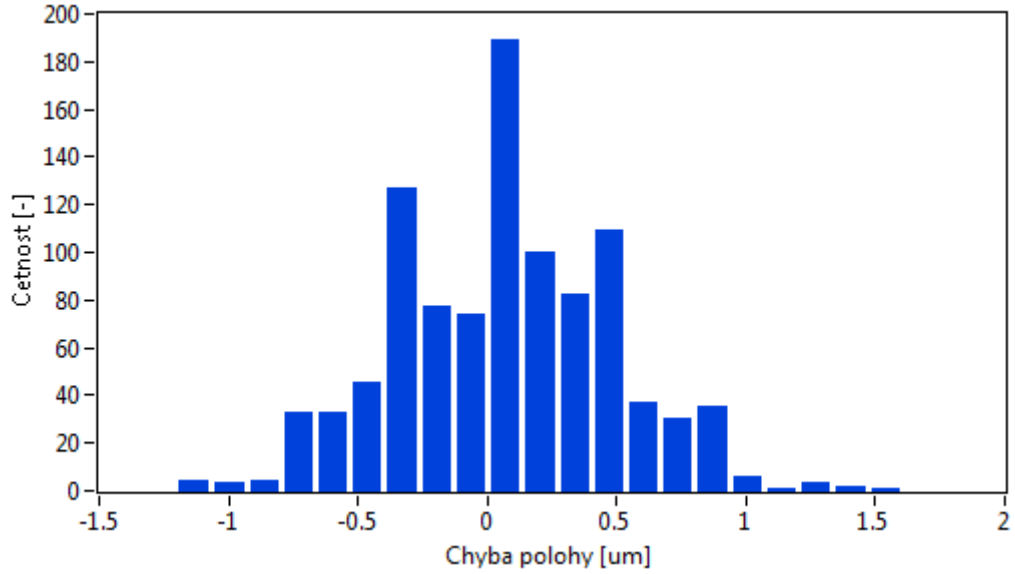


Obr. 49. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 1mm/s, horizontální

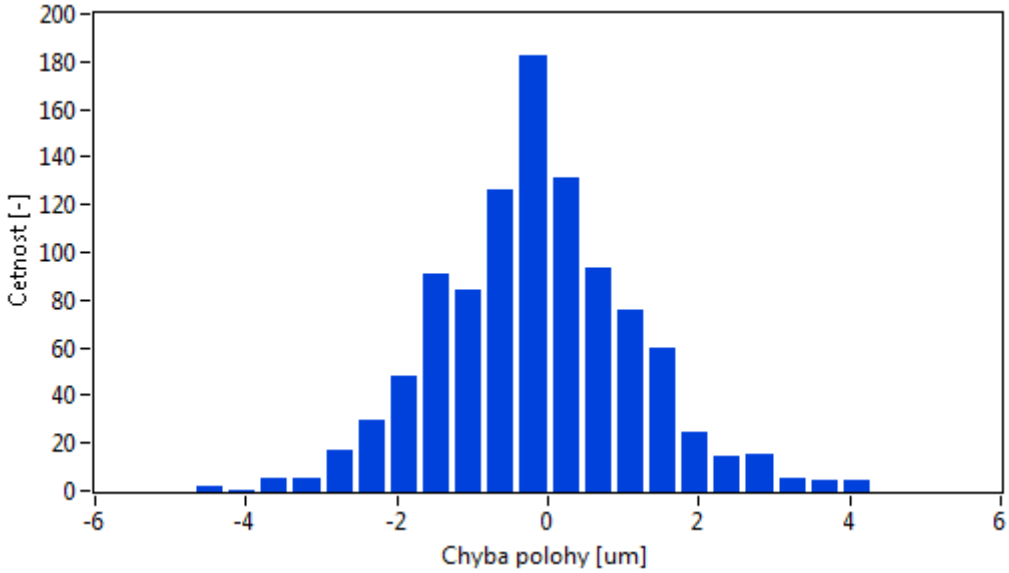


Obr. 50. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, horizontální

Na obr. 49 a obr. 50 jsou četnosti chyb polohy při požadovaném kroku v hmotnostním spektrometru. Zvýšením rychlosti se rozptýlení zvětší a motor je tedy nepřesnější.



Obr. 51. Krok 0,01mm, vzdálenost 10mm, rychlost 1mm/s, horizontální



Obr. 52. Krok 0,01mm, vzdálenost 10mm, rychlost 1mm/s, horizontální

Grafy na obr. 51 a 52 představují histogramy měřené s krokem 0,01mm, tento krok vykazuje i při maximální rychlosti velice dobrou relativní přesnost a největší část měřených hodnot odpovídá přesně žádané hodnotě. Lze tedy v budoucnu pro zmíněný spektrometr uvažovat krok o velikosti 0,01mm, čímž lze docílit větší přesnosti a možnosti zkoumat více bodů na jednom vzorku.

7.5 Výpočet předpokládané doby polohování navrhnutého vzorku

Z naměřených hodnot můžeme spočítat celkový čas polohovaní na reprezentativním vzorku o rozměrech 10mm x 10mm a krokem 0,1mm. Pro kompletní přejezd přes všechny body je nutné vykonat 10 000 přejezdů. Pro přesnější výpočet můžeme vzít střední hodnotu

doby přejezdu, ta se v případě horizontálního a vertikálního pojezdu rovná 17ms. Jednoduchým vynásobením počtu přejezdů s dobou přejezdu dostaneme hodnotu 2min a 50s. V tomto výpočtu není uvažována mezidoba po, kterou je nutné na dané poloze setrvat. Nové hodnoty lze porovnat se stávajícím stolkem a lze tedy použít stejnou analogii jako v případě výpočtu nového stolu. Dosavadní stolek zvládne přejezd mezi dvěma body vzdálenými 0,1mm za 117ms a kompletní přejezd tedy podle uvažované analogie trvá 19min a 30s.

7.6 Zhodnocení zapůjčeného piezoelektrického motoru

Zapůjčený piezoelektrický motor dosahuje v porovnání s konvenčním motorem přibližně 6,5krát rychlejšího času polohováni na vzorku o rozměrech 10mm x 10mm a kroku 0,1mm. Motor lze poměrně přesně řídit i bez použití zpětné vazby, s použitím zpětné vazby bychom mohli dosáhnout výrazně přesnějšího polohování, ale doba pojezdu může mírně narůst doregulováním polohy.

Motor vyniká vysokým zrychlením, nízkým budícím napětím (pohybuje se kolem 48V) a nízkou spotřebou, nespotřebovává žádnou energii v klidové poloze a nevykazuje proudové špičky v režimech start a stop.

Nepříjemnou vlastností je písklavý zvuk, který tento motor vydává. Frekvence a intenzita tohoto zvuku je závislá na rychlosti pojezdu (frekvenci krokování), čím je rychlost vyšší tím je tento zvuk intenzivnější. V případě použití motoru ve vakuu se tato vlastnost z velké části utlumí a neměla by lidskému uchu vadit.

8. VYHODNOCENÍ DYNAMIKY A PŘESNOSTI VE VAKUU A ELEKTRICKÉM POLI

Měření přesnosti a dynamiky ve vakuovém prostředí nebylo možné uskutečnit, jelikož motor obsažený v zapůjčené demo sadě (popsán v kapitole 6.1.1), nebyl určený pro použití ve vakuovém prostředí. Bylo nám tedy sděleno, že není vhodné výše zmíněný motor ve vakuu testovat, jelikož by mohlo dojít k jeho poškození a případné kontaminaci vakuového prostředí.

9. ZÁVĚR

V této práci byla rozebrána problematika konstrukce, řízení, přesnosti a dynamiky lineárních piezoelektrických motorů. Byl zmíněn princip, na jakém je založen piezoelektrický motor a také vývoj, kterým prošly piezoelektrické materiály a motory. Dále jsou v prací uvedeny vlastnosti, kterými piezoelektrické motory vynikají oproti konvenčním elektromagnetickým motorům.

Na základě předpokladu lepších vlastností piezoelektrických motorů vůči konvenčním elektromagnetickým motorům byla vybrána aplikace stolku hmotnostního spektrometru, kde se záměnou stávajících motorů předpokládá přesnější a rychlejší polohování. Proběhla tedy konzultace s pracovníky Masarykovy univerzity, kteří vlastní a používají zmíněný hmotnostní spektrometr. Výsledkem této konzultace byly definovány nové parametry stolku, který zvýší užitnou hodnotu a efektivitu spektrometru. V práci je tedy zmíněn princip a využitelnost hmotnostního spektrometru. Jelikož je pro správnou funkci stolku v hmotnostním spektrometru potřebná dostatečná hloubka vakua, je tomuto problému věnována jedna kapitola.

Firma PiezoMotor Uppsala AB měla zájem zapůjčit potřebné piezoelektrické motory, kde by se touto aplikací ověřila jejich přesnost a dynamika ve vakuovém prostředí. Bylo tedy zapotřebí vybrat vhodný hardware, pro polohování stolku hmotnostního spektrometru a výše zmíněná firma jej byla ochotna zapůjčit. Setkali jsme se tedy se zástupci této firmy na veletrhu Ampér, kde jsme firmě prezentovali naše předpokládané řešení a ta následně přislíbila prezentovaný hardware dodat. Pro zvolené motory byla navržena mechanická konstrukce nového stolku. Při návrhu bylo nutné sestavu koncipovat, tak aby kladla co nejmenší odpor použitým motorům, byla dostatečně tuhá a splňovala použitelnost ve vakuovém prostředí.

Po menších průtazích nám výše zmíněna firma zapůjčila demo sestavu, namísto konzultovaných motorů, která bohužel nesplňoval požadavky pro použití ve vakuu a byla konstrukčně odlišná. Bylo tedy nutné pro jeho měření vyrobit testovací přípravek a vytvořit aplikaci pro jeho řízení a vyhodnocování. Při konečném vyhodnocování se projevilo nevhodné uchycení keramické tyče motoru ke konstrukci, které zapříčiňovalo hysterezi mezi změnou pohybu motoru. Tato hystereze je okem nepozorovatelná a proto se projevila až na výsledném měření.

Ve vývojovém prostředí NI LabView byla vytvořena aplikace pro řízení a vyhodnocování přesnosti a dynamiky. Pomocí této aplikace jsme v laboratorních podmínkách simulovali chování, které by motor vykonával v hmotnostním spektrometru.

Vyhodnocením měření byl ověřen předpoklad, že motor bude schopen polohovat přesněji a mnohem rychleji, konkrétně až 6,5x rychleji než stávající elektromagnetické

motory. Jelikož nám, ale nebyl zapůjčen motor vhodný do vakuového prostředí, nelze s jistotou říci, že tento motor bude schopný dosahovat stejných parametrů. Jako možné alternativní řešení byla uvedena kompletní sestava od konkurenční firmy s piezoelektrickým motorem, který splňuje všechny požadované parametry.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1]Řízení piezoelektrických motorů pro mikropolohování. *Automa* [online]. 2007, roč. 2007, č. 04 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33904

[2]*Piezoelektrický jev. In: Edutorium [online]. 2007 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/clanky.php?key=28*

[3] *Erhart, J. Piezoelektrické "chytré" materiály pro elektrotechniku. Elektro, 2002, č.11, s.4-7.*

[4] *Parametry piezoelektrických bimorfů.* Parametry piezoelektrických bimorfů *[online]. 2002, č. 3, s. 3 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/download/el030204.pdf*

[5]ČERNÝ, CSC., Prof. Václav. Piezoelektricke motory. *Regulace rizeni* [online]. 2004, č. 1 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: *http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010408.pdf*

[6]*RYDLO, PH.D., Ing. Pavel. Piezoelektrické motory.* Piezoelektrické motory *[online]. 2000, 09-2000 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010404.pdf*

[7]Vlastnosti a použití motorů PIEZO LEGS. In: *Automa* [online]. 2013 [cit. 2014-05-10]. Dostupné http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Automa/2013/03/Automa_03_2013_output/web/Automa_03_2013_opf_files/WebSearch/page0068.html

[8]Tiny Motors Make Big Moves. *Tiny Motors Make Big Moves* [online]. 2008 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z:http://machinedesign.com/archive/tiny-motors-make-big-moves

[9]Zobrazovací hmotnostní spektrometrie. In: PREISLER, Jan. *CHEMPOINT* [online]. 2012 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: http://www.chempoint.cz/zobrazovaci-hmotnostni-spektrometrie-1334300722

[10]Theory and History. *Matrix-assisted Laser Desorption/Ionisation (MALDI)* [online]. 2004, č. 1 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.chm.bris.ac.uk/ms/theory/maldi-ionisation.html

[11]*Vakuum. In:* Wikipedia: the free encyclopedia *[online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vakuum*

[12]*Piezo LEGS® Caliper 20N. In:* Piezo LEGS® Caliper 20N *[online]. PiezoMotor Uppsala AB, 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150052_LC20.pdf*

[13]*PIEZOMOTOR UPPSALA AB.* PiezoMotor Microstep Driver 206*. 2014, 3 s. Dostupné z: http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150087_PMD206_TechnicalManual.pdf*

[14]PI. In: *M-683 Dynamic Micropositioning Stage* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=1000520

[15]Piezo LEGS® Linear Twin 20N. In: *PiezoMotor Uppsala AB* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.piezomotor.com/products/linear/lt20/

[16]Microstepping Driver 101. In: *PiezoMotor Uppsala AB* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.piezomotor.com/products/drivers/pmd101/

[17]Lineární snímací systém RGH24. In: *Renishaw* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.renishaw.cz/cs/linearni-snimaci-system-rgh24--6444

[18] NI 9411. In: *National instruments* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208812

[19] NI cDAQ-9171. In: *National instruments* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/209817

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Princip piezoelektrického jevu. [2] 15
Obr. 2. Druhy piezoelektrických jevů podle orientace struktury krystalů. [1], [2] 16
Obr. 3. Konfigurace unimorfu. [4] 17
Obr. 4. Konfigurace bimorfů: a) sériové; b) paralelní. [4] 18
Obr. 5. Princip piezoelektrického motoru s postupovou vlnou. [5] 19
Obr. 6. Princip vzniku eliptického pohybu na styčné ploše (vícevrstvý měnič). [6] 20
Obr. 7. Princip činnosti piezoelektrického motoru s lamelami. [6] 21
Obr. 8. Princip činnosti motoru typu Hula-hop. [6] 21
Obr. 9. Porovnání skutečné velikost piezo LEGS. [8] 22
Obr. 10. Princip činnosti piezo LEGS. [7] 22
Obr. 11. Tvar křivky pro plný krok. [7] 23
Obr. 12. Tvar řídící křivky pro zkrácený krok. [7] 23
Obr. 13. Hmotnostní spektrometr MALDI-TOF. [9] 25
Obr. 14. Princip MALDI ionizace. [10] 26
Obr. 15. Schéma TOF spektrometru. [9] 26
Obr. 16. Ukázka naměřených dat z hmotnostního spektrometru. [9] 27
Obr. 17. Nanášecí matrice s vygravírovanými spoty. [9] 27
Obr. 18. Dosavadní mechanismus stolku. 31
Obr. 19. Místo pro přišroubování příruby. 32
Obr. 20. Piezo LEGS Caliper. [12] 33
Obr. 21. Řídící jednotka PMD206. [13] 34
Obr. 22. Navrhnutá sestava stolku. 35
Obr. 23. Řez vakuové průchodky a vyfrézované kapsy. 36
Obr. 24. Vrchní deska osy X. 36
Obr. 25. Díry ve šroubech. 37
Obr. 26. Rozložení os na navrženém stolku. 38
Obr. 27. Díly neseny osou Y. 39
Obr. 28. Díly neseny osou X. 40
Obr. 29. Předpokládaná cesta polohování. 41
Obr. 30. Dynamic micropositioning stage M-683. [14] 42
Obr. 31. Piezo LEGS Twin 20N. [15] 43
Obr. 32. Řídící jednotka PMD 101. [16] 43
Obr. 33. Snímač polohy RGH24Y. [17] 44
Obr. 34. Digitální modul NI 9411. [18] 45
Obr. 35. Modulární rozhraní NI CompaqDAQ. [19] 45
Obr. 36. Vyrobená sestava (rozměr 100x100mm). 46
Obr. 37. Výrobcem doporučený způsob uchycení. 46
Obr. 38. Ukázka rozhraní aplikace. 47
Obr. 39. Výpočet řetězce ze zadaných hodnot. 47
Obr. 40. Ukázka řešení korekce. 48
Obr. 41. Ukázka časové smyčky. 48
Obr. 42. Ukázka testované sestavy. 49
Obr. 43. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, horizontální poloha motoru. 50

Obr. 44. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální poloha motoru, směr pohybu dolů.....50
Obr. 45. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální nahoru.....50
Obr. 46. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, horizontální.....51
Obr. 47. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální dolů.....51
Obr. 48. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, vertikální nahoru.....51
Obr. 49. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 1mm/s, horizontální.....52
Obr. 50. Krok 0,1mm, vzdálenost 10mm, rychlost 10mm/s, horizontální.....52
Obr. 51. Krok 0,01mm, vzdálenost 10mm, rychlost 1mm/s, horizontální.....53
Obr. 52. Krok 0,01mm, vzdálenost 10mm, rychlost 1mm/s, horizontální.....53

12. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Stupně vakua. [11] 28
Tabulka 2. Parametry Piezo LEGS Caliper. [12] 33
Tabulka 3. Parametry řídící jednotky PDM 206. [13] 34
Tabulka 4. Díly neseny osou Y. 38
Tabulka 5. Díly neseny osou X. 39
Tabulka 6. Parametry M-683. [14] 41
Tabulka 7. Parametry snímače polohy RGH24Y. [17] 44
Tabulka 8. Parametry digitálního modulu NI 9411. [18] 44