

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

VÝVOJ UHV STM/AFM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

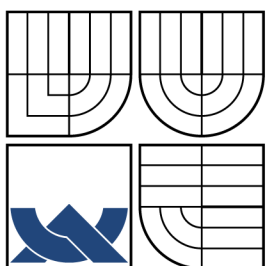
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

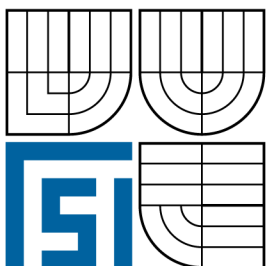
AUTHOR

JIŘÍ PAVELEC

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

VÝVOJ UHV STM/AFM

DEVELOPMENT OF UHV STM/AFM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ PAVELEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK KALOUSEK, Ph.D.

BRNO 2008

Abstrakt

Práce pojednává o piezoelektrickém motoru, který jako součást AFM (Atomic Force Microscopy) provádí zaměřování laserového svazku. Je v ní zaznamenáno měření pro určení vhodných tvarů a frekvencí napájecích pulzů, které slouží k vytváření slip-stick pohybu pomocí piezokeramických segmentů, jenž jsou jeho akčním členem. V textu jsou dále naznačeny možnosti řešení problémů spočívajících v jeho umístění do UHV (Ultra High Vacuum) a to jak na základě měření, tak i zpracované simulace.

Klíčová slova

UHV, vakuum, STM, AFM, piezo, piezokeramický materiál, pulzy, piezoelektrický motor, tření, slip-stick.

Abstract

The main focus of the thesis is on the actuator, which is used for nanopositioning of laser beam in-site AFM (Atomic Force Microscopy). The appropriate shape of supply pulse and frequencies were searched and optimized. They make slip-stick motion of the piezo actuator. Possibilities of solving troubles with UHV (Ultra High Vacuum) are described on the basis of experiment and simulation.

Keywords

UHV, vacuum, STM, AFM, piezo, piezoceramics, pulse, actuator, friction, slip-stick.

Citace

Jiří Pavelec: Vývoj UHV STM/AFM, bakalářská práce, Brno, FSI VUT v Brně, 2008

Vývoj UHV STM/AFM

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana ing. Radka Kalouska, Ph.D.

.....
Jiří Pavelec
26. května 2008

Poděkování

Děkuji obzvláště Bohu, rodičům, rodině, bratrům ze skautského oddílu Antares, svému vedoucímu bakalářské práce ing. Radku Kalouskovi, Ph.D. za pomoc s vypracováním a za řešení technických problémů kolegům ing. Janu Neumanovi a ing. Zdeňku Nováčkovi.

© Jiří Pavelec, 2008.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

Úvod	2
1 Principy a funkce AFM/STM mikroskopie	3
1.1 STM	3
1.2 AFM	3
1.2.1 Rozdělení sil působících na hrot	4
1.3 Piezoelektrický jev	5
1.3.1 Deformační směry	6
1.3.2 Souhrn vlastností piezokeramických materiálů	8
1.4 Teorie tření	8
1.4.1 Vliv UHV na koeficient tření	9
2 Optimalizace a měření piezoelektrických posuvů	10
2.1 Piezoelektrický motor	11
2.1.1 Slip-stick pohyb	11
2.1.2 Mechanismus motoru	12
2.1.3 Určení vychýlení svazku	12
2.2 PSD	13
2.2.1 Určení vzdálenosti pomocí PSD	14
2.2.2 Určení nábojové konstanty d_{15}	15
2.3 Tvary pulzů	17
2.4 Použitý hardware	18
2.5 Popis měřicího programu	18
2.6 Mechanismus měření	21
2.6.1 Zpracování naměřených dat	21
2.7 Zobrazení výsledků měření	21
2.7.1 Ověření přesnosti měření	26
2.7.2 Vliv tvaru pulzu z hlediska směru	27
2.7.3 Změna přítláčné síly	28
2.8 Simulace	29
2.8.1 Shrnutí simulace	30
2.9 Návrh vhodného tvaru pulzu a frekvenčních pásem	30
Závěr	31

Úvod

Mikroskopie založená na principech STM/AFM (Scanning Tunneling Microscopy/ Atomic Force Microscopy) nám otevřela v 80. letech minulého století pohled do světa nanostruktur v atomárním rozlišení. Je jednou z nejrozšířenějších analytických metod zkoumající vlastnosti povrchu materiálu.

Tato bakalářská práce navazuje na úsilí několika lidí, jenž na ÚFI vyvinuli a sestrojili mikroskop pracující na principu tunelového jevu STM a detekce atomárních sil AFM. Na tomto mikroskopu je třeba zdokonalit část AFM. Jeho funkce je nyní omezena na používání za normálního atmosférického tlaku, ale zařízení bylo již od začátku postaveno s úmyslem používání v UHV¹ (Ultra High Vacuum) komoře. Úkolem této práce je prověření možnosti zlepšení spolehlivosti zaměřování laserového svazku, avšak protože toto se jevílo velmi problematickým při práci s mikroskopem v UHV, budou zkoumány aspekty piezoelektrického pohybu sloužícího k manipulaci se zrcátky, které toto zaměřování laserového svazku zajišťují.

¹Ultra vysoké vakuum je přibližně definováno rozmezím tlaku od 10^{-7} Pa do 10^{-9} Pa.

Kapitola 1

Principy a funkce AFM/STM mikroskopie

AFM/STM mikroskop slouží k zjišťování struktury a vlastností povrchů. Využívá dva možné přístupy k zobrazení povrchu vzorku. Je to mikroskopie atomárních sil AFM (Atomic Force Microscopy) a rastrovací tunelovací mikroskopie STM (Scanning Tunneling Microscopy).

1.1 STM

Princip této metody sledování topografie vzorku spočívá v tunelování elektronů mezi pozorovanou látkou a hrotem. Rozměry špičky hrotu se pohybují ve stovkách Å¹. Pokud se s hrotem přiblížíme k povrchu materiálu řádově na stovky až desítky Å, přičemž mezi hrotem a povrchem je nenulový potenciál Φ zajišťovaný zdrojem, začne téct tímto obvodem tunelový proud, aniž by se hrot dotkl povrchu. Tento jev nám popisuje vztah (1.1) odvozený např. v [3]

$$I \approx \frac{\textit{konst.} \cdot \Phi}{L} \exp \frac{-L}{\delta}. \quad (1.1)$$

Všimněme si, že vzdálenost mezi vzorkem a povrchem L v exponentu silně ovlivňuje proud I , proto dokážeme měřit i velmi malou změnu této vzdálenosti. δ je penetrační hloubka bariéry.

Výsledný obraz vzniká tak, že proud I z rovnice (1.1) udržujeme konstantní, tím zůstává neměnná vzdálenost mezi hrotem a vzorkem L . Pomocí piezoskeneru zajišťujeme pohyb vzorku a tento měříme. Posun je třeba řídit ve vertikální ose pro udržení konstantní výšky nad povrchem vzorku a v rovině měřeného vzorku pro rastrování plochy. Piezoskener se posouvá podle hodnoty napětí, které na něj přivedeme, viz dále. Výsledný obraz je tedy záznamem napětí přiváděného na tento piezoskener.

1.2 AFM

Rastrovací mikroskop atomárních sil, dále jen AFM, využívá interakce povrchu a tenké špičky hrotu. Mezi hrotem a atomy na povrchu vzorku působí atomární síly, tyto vychylují

¹Angström je jednotka mimo soustavu SI, která dobře vystihuje atomární rozměry, a pro její velikost platí $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

hrot. Natočení hrotu může být detekováno následujícími způsoby a převáděno pomocí zpětné vazby na výsledný obraz.

- Interferometricky
Upevnění hrotu slouží jako odrazová plocha pro optický svazek na kterém můžeme pozorovat interferenční posun.
- Kapacitně
Mezi ramenem hrotu a druhou elektrodou vznikne kondenzátor o kapacitě, která se mění při změně vzdálenosti těchto elektrod.
- Piezo senzorem
Při deformaci piezokeramiky sledujeme změnu odporu, nebo měříme na něm vzniklé napětí.
- Odrazem laserového svazku
Detekce odrazu laserového svazku od raménka hrotu do čtyřsegmentové fotodiody označované jako PSD (Positional Sensitive Detector), tento princip je použit na AFM sloužícím v laboratoři ÚFI a bude popsán dále.

Signál z detektoru je zaznamenáván při rastrování vzorku hrotem pomocí piezo skeneru a následně je z něj poskládán obraz. Rastrováním povrchu hrotem nám takto vzniká obraz vychýlení hrotu. Mikroskop může pracovat v různých režimech a tím detekovat různé druhy sil. Tyto režimy se dělí na *kontaktní* a *bezkontaktní*. *Kontaktní* se navíc dělí na režim *konstantní síly*, kdy se při rastrování udržuje vychýlení raménka neměnné a na *režim konstantní výšky*, při kterém se nemění piezomanipulátorem vzdálenost od hrotu, ale rastruje se povrch a sleduje se vychýlení raménka. V *bezkontaktním módu* jsou detekovány vzdálené van der Waalovy síly, jelikož jejich velikost klesá se vzdáleností, je třeba užít speciální mechanismy na jejich detekci viz [2]. Další druhy měření lze provádět hroty vyrobené z odlišného materiálu. Například pokovení hrotu feromagnetickým materiálem nám dovolí sledovat magnetickou strukturu povrchu.

1.2.1 Rozdělení sil působících na hrot

V této kapitole je uveden stručný přehled sil, které figurují v interakci mezi hrotem a snímaným vzorkem, více viz [2].

Blízké síly

Síly způsobené překryvem vlnových funkcí elektronů. Jejich dosah je méně než 1 nm. Tyto síly popisuje například odpudivá složka Lennard-Jonesova potenciálu [1]. Je velice obtížné měřit tyto síly pomocí AFM, ale otvírají možnosti k atomárnímu rozlišení AFM.

Van der Waalovy síly

Van der Waalovy síly vznikají jako slabá mezimolekulová interakce. V prvním přiblížení lze považovat látku jako kontinuum a Van der Waalovy síly za aditivní. Na základě těchto zjednodušení se vyjádří interakce mezi hrotem a vzorkem vztahem, odvozeným v [2],

$$F = \frac{HR}{6D^2}, \quad (1.2)$$

kde H je materiálová Hamakerova konstanta, R průměr hrotu a D vzdálenost mezi hrotem a povrchem.

Elektrostatické síly

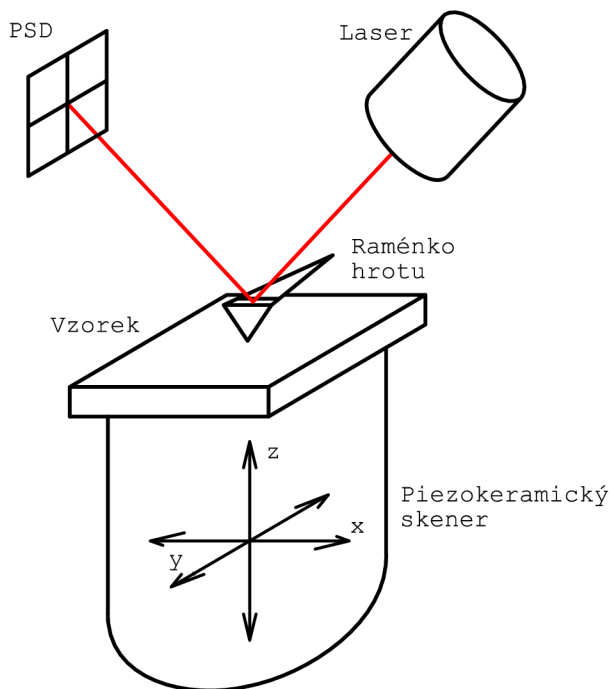
Síly mezi bodovými náboji obsaženými ve hrotu a rozloženými na povrchu vzorku jsou popisovány Coulombovým zákonem.

Magnetické síly

Síly působící na magnetické dipóly vložené do magnetického pole. Jejich detekci lze provádět *magnetickými hroty*.

Kapilární síly

Při styku materiálu s hrotem na vzduchu dochází ke kondenzaci par, tento jev způsobí vznik kapilárních sil působících na hrot. Tyto síly se uplatní při měření na vzduchu. Tento jev lze potlačit umístěním do UHV, či ponořením vzorku do kapaliny. O konstrukci a ná-



Obrázek 1.1: Princip AFM s detekcí odrazu laserového svazku pomocí PSD.

vrhu AFM/STM se dozvíme více v [3], [4] a podrobnější fyzikální popis najdeme v [2].

1.3 Piezoelektrický jev

Pokud je piezoelektrický materiál stlačován, dojde uvnitř něho ke vzniku elektrického pole, naopak pokud jej připojíme ke zdroji napětí, deformuje se. Tuto vlastnost některých

materiálů objevili v roce 1880 Jacques a Pierre Curieovi na křemenném krystalu. Jev se uplatňuje při ochlazení materiálu pod Curieho teplotu, kdy dojde k protažení krystalové buňky. Takto deformovaná buňka se v elektrickém poli chová jako elektrický dipól, více uvedeno v [9]. Druhy piezoelektrických materiálů dle [12] jsou :

- Krystalické látky
Většina krystalických látek ve všech soustavách vykazuje piezoelektrické vlastnosti v závislosti na zvoleném řezu krystalem.
- Polykrystalické látky
Mezi ně se řadí nejčastěji používaná piezoelektrická keramika, což je obvykle tuhý roztok zpolarizovaný velmi silným elektrickým polem.
- Polární polymery
Organické sloučeniny vykazující piezoelektrický jev, jejich výroba je velmi náročná.

Piezoelektrický materiál se může chovat jako generátor elektrického pole nebo naopak jako mechanický akční člen ovládaný elektrickým polem. Tato práce se nadále bude zabývat případem druhým, jelikož piezokeramický materiál slouží k vytváření pohybu pro natáčení zrcátek v laboratorním AFM/STM. Vztah pro malé deformace piezokeramického elementu vychází z Hookova zákona

$$e = s\tau, \quad (1.3)$$

kde e je tenzor malých deformací, s tenzor elastických modulů a τ tenzor napětí v bodě tělesa. Pro dielektrické materiály dále můžeme určit elektrickou indukci, dle vztahu

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (1.4)$$

přičemž \vec{E} je elektrická intenzita a ϵ permitivita materiálu². U piezokeramických materiálů dojde k propojení těchto dvou zákonů pomocí tenzoru piezoelektrické nábojové konstanty d a tedy pro piezokeramický materiál platí

$$e = s^E \tau + d \vec{E}, \quad (1.5)$$

kde s^E je poddajnost při konstantním elektrickém poli určeném elektrickou intenzitou \vec{E} . Pokud nedochází k velkým mechanickým zátěžím lze předchozí vztah zjednodušit na

$$e = d \vec{E}. \quad (1.6)$$

Pro elektrickou indukci v piezokeramickém materiálu platí

$$\vec{D} = d\tau + \epsilon^T \vec{E}, \quad (1.7)$$

přičemž ϵ^T je tenzor permitivity při konstantním napětí τ .

1.3.1 Deformační směry

Z předcházejícího obecného popisu přejdeme k popisu jednotlivých, pro pohyb používaných, směrů deformace. Směr deformace piezokeramického materiálu je určen směrem intenzity připojeného elektrického pole vůči směru polarizace. Všechny udávané vztahy platí s omezením pro oblasti lineárního chování.

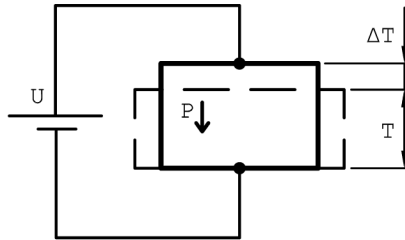
²Permitivita materiálu je určena jako $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, kde ϵ_0 je permitivita vakua a ϵ_r relativní permitivita.

Podélný

Směr polarizace piezokeramického segmentu odpovídá směru vektoru intenzity přiloženého elektrického pole. Velikost prodloužení ΔT se řídí vztahem

$$\Delta T = U d_{33}, \quad (1.8)$$

kde d_{33} je piezoelektrická nábojová konstanta pro podélný směr polarizace a U je přiložené napětí.



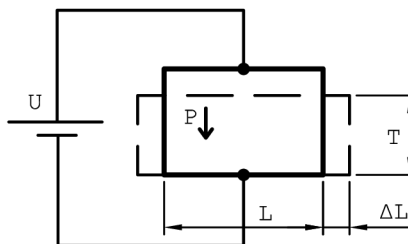
Obrázek 1.2: Podélná deformace piezokeramického segmentu.

Příčný

Z hlediska směru polarizace k elektrickému poli je to stejné, jako v případě podélné deformace, ale nyní se zajíme o příčnou deformaci, která je závislá na rozměrech piezokeramického segmentu. Tento jev si lze vysvětlit tím, že příčinou prodloužení je elektrické pole uvnitř materiálu. Jelikož v příčném směru pole nepůsobí deformace je závislá na podélném prodloužení. Velikost příčného prodloužení ΔL se řídí vztahem

$$\Delta L = \frac{U d_{31} L}{T}, \quad (1.9)$$

kde d_{31} je piezoelektrická nábojová konstanta pro příčný směr.



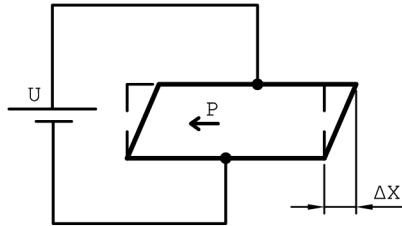
Obrázek 1.3: Příčná deformace piezokeramického segmentu.

Střihový

Aby bylo možno dosáhnout střihové deformace piezokeramického segmentu připojíme elektrické pole kolmo ke směru polarizace. Pro střih platí vztah

$$\Delta X = U d_{15}, \quad (1.10)$$

kde d_{15} je piezoelektrická nábojová konstanta pro střih.



Obrázek 1.4: Střihová deformace piezokeramického segmentu.

1.3.2 Souhrn vlastností piezokeramických materiálů

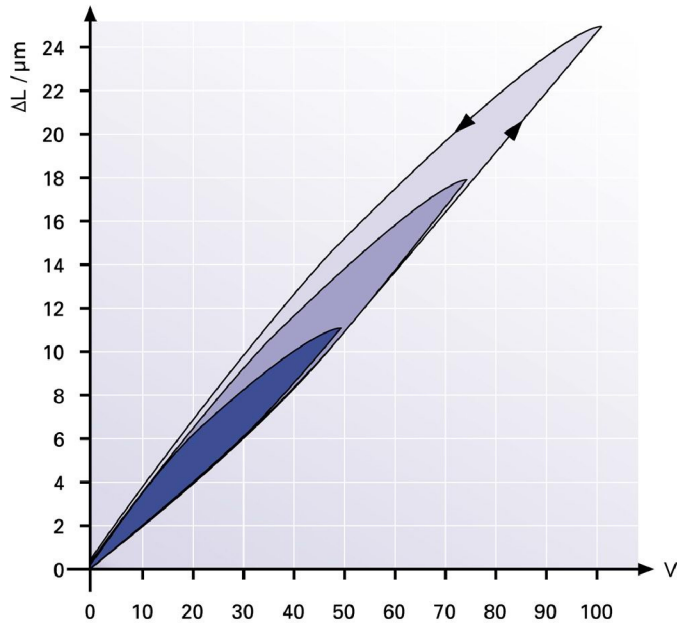
Podrobnější popis vlastností piezokeramických materiálů lze získat na stránkách výrobců [15], [16], [17] a [9], nebo také v literatuře [5], [8] a [19]. V bodech jmenujme další důležité vlastnosti:

- Rychlost reakce piezokeramiky jako zhruba třetina periody hlavní rezonanční frekvence piezokeramického segmentu, záleží na stabilitě napájecího zdroje.
- Piezokeramický materiál podléhá tečení při pomalé statické deformaci.
- Materiálové charakteristiky jsou závislé na teplotě.
- Existují rezonanční frekvence při kterých dochází k nejefektivnějšímu přenosu výkonu z piezokeramického prvku do prostředí, jak při vytváření zvuku, tak v oblasti mechanických pohybů.
- Závislost deformace na napětí se řídí hysterezní smyčkou, jež se pro jednoduchost nahrazuje přímkou, viz obrázek 1.5.

1.4 Teorie tření

Popis styku dvou těles a jejich vzájemné interakce je složitý nelineární problém, který je popisován teoriemi tření na různých úrovních složitosti. Jejich přehled najdeme např. v [7]. Na tomto místě bude popsán pouze jednodušší z modelů, označovaný jako Coulombův. Podle něho pro statickou třecí sílu platí

$$\vec{F}_s = -\vec{F}_{ap}, \quad (1.11)$$



Obrázek 1.5: Hysterezní křivka piezokeramického materiálu, převzato z [15].

kde \vec{F}_{ap} je síla působící v rovině případného kluzu. Je zřejmé, že \vec{F}_s působí proti této síle. Vztah (1.11) platí pouze s podmínkou

$$F_{ap} < \mu_s F_N, \quad (1.12)$$

přičemž μ_s je statický koeficient tření a F_N velikost normálové síly působící na těleso. Podmínku je třeba doplnit počáteční nulovou rychlostí mezi povrchem a tělesem. Při nastoupení pohybu, kdy přestane platit podmínka (1.12), uvažujeme dynamickou třecí sílu, která působí proti směru pohybu tělesa a její velikost je určena jako

$$F_d = \mu_d F_N. \quad (1.13)$$

Podmínku jejího trvání lze vyjádřit jako

$$v > 0, \quad (1.14)$$

kde v je okamžitá rychlost tělesa.

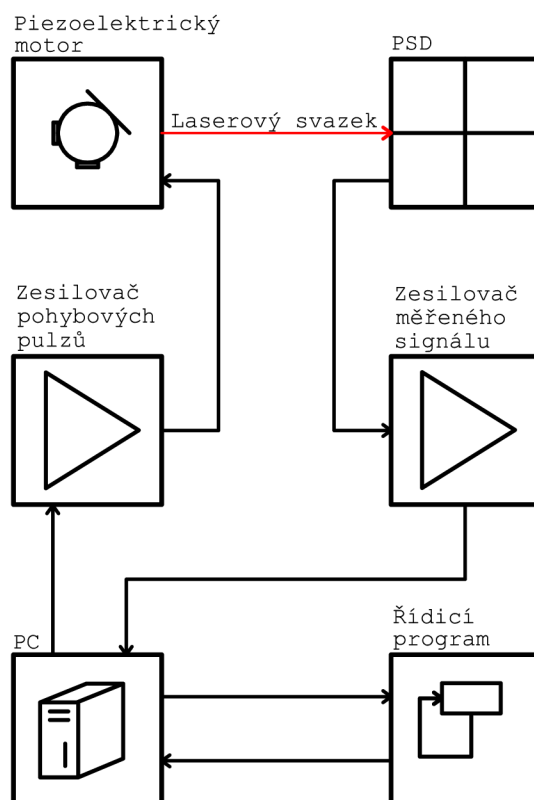
1.4.1 Vliv UHV na koeficient tření

Dle [18] ve vakuu chybí na povrchu vrstvička oxidů a vody, což vede ke zvýšení statického i dynamického koeficientu tření. V [6] se uvádí, že třecí koeficienty ve vakuu závisí na přítláčné síle, s větší velikostí této síly klesá koeficient tření a přibližuje se koeficientu tření za atmosférického tlaku. Dalším možným vlivem je drsnost povrchů stykových ploch, více viz [6].

Kapitola 2

Optimalizace a měření piezoelektrických posuvů

Tato kapitola se zabývá hlavně zjištěním parametrů pohybu piezoelektrického motoru určeného k natáčení zrcátek a v další fázi optimalizací řídicích pulzů. Byl navržen postup, provést nejprve optimalizaci za normálního atmosférického tlaku a v dalších krocích v UHV. Bylo třeba určit, které aspekty nejvíce ovlivňují rychlost pohybu piezoelektrického motoru. Na obrázku 2.1 je ukázáno blokové schéma měření. Dále budou vyobrazené bloky popsány jednotlivě spolu s dílčími měřeními.



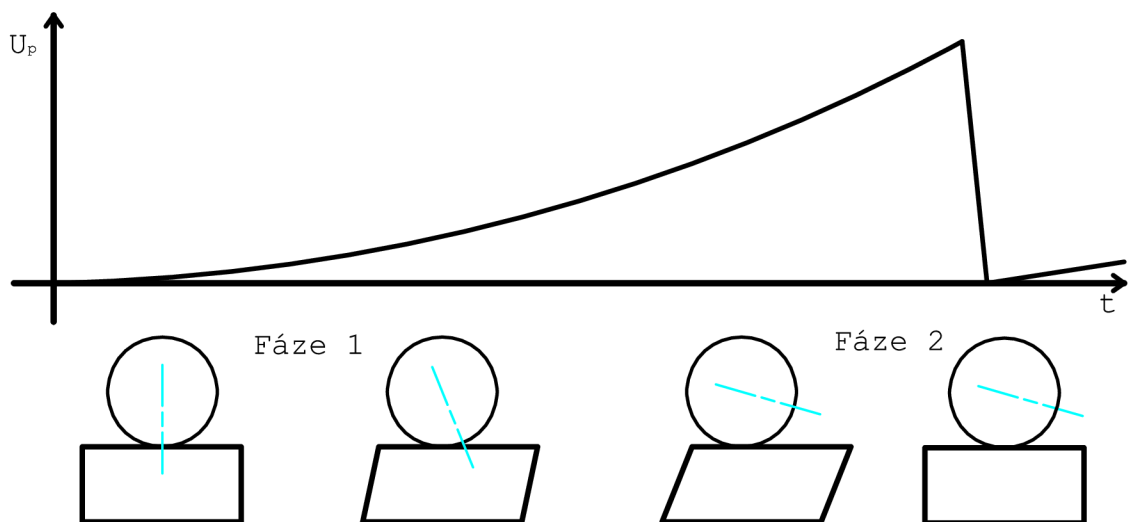
Obrázek 2.1: Blokové schéma měření.

2.1 Piezoelektrický motor

Jak již bylo zmiňováno, vychýlení hrotu mikroskopu atomárními silami je sledováno pomocí PSD. Při každé výměně hrotu nebo měřeného vzorku je třeba zaměřit svazek laseru znovu na raménko hrotu mikroskopu a tento odražený svazek je třeba dále směřovat na PSD. To se provádí mechanismem natáčení zrcátek pomocí piezoelektrických motorů na principu označovaném jako slip-stick.

2.1.1 Slip-stick pohyb

Tento mechanismus je založen na principu tlačení tělesa třecí silou a při překročení její maximální hodnoty, jak je popsáno v kapitole 1.4, dojde k proklouznutí a těleso se pohybuje po povrchu díky své setrvačnosti a je bržděno dynamickou třecí silou. Tento druh pohybu je využit pro piezoelektrický motor, který dokáže otáčet zrcátkem ve všech prostorových směrech. Akčním členem pro vytváření pohybu je segment vyrobený z piezokeramického materiálu PIC131 zapojený ve stříhovém módu. Stříhová deformace piezokeramického segmentu je popsána v kapitole 1.3.1 vztahem (1.10). Na obrázku 2.2 je vyobrazen průběh pohybu, který je generován napěťovým pulzem během jedné periody. V první fázi roste

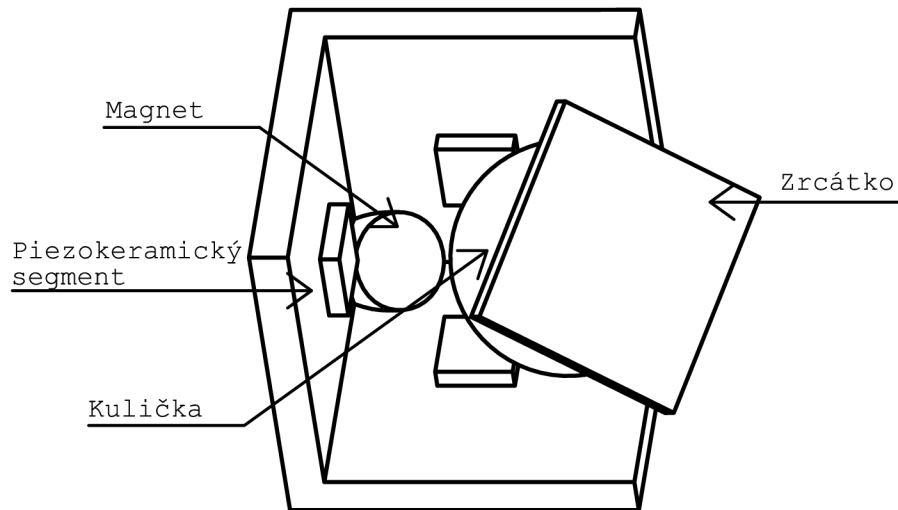


Obrázek 2.2: Slip-stick pohyb.

napětí mezi elektrodami piezokeramického segmentu, dochází k jeho stříhu a těleso, v našem případě kulička, se začíná pomalu otáčet díky statické třecí síle. Druhá fáze pohybu nastane v okamžiku, kdy napětí U_p dosáhne maxima, v našem případě $U_{pMAX} = 200 \text{ V}$, a rychle klesne k nule. Hrana rychlé změny napětí způsobí velké zrychlení piezokeramického segmentu proti směru pohybu kuličky. Ta proklouzne a piezokeramický segment se rychle vrátí do svého původního tvaru. Kulička se otáčí, dokud není její pohybová energie vyčerpána třecí silou. Periodickým vytvářením pulzů dochází ke kontinuální rotaci kuličky.

2.1.2 Mechanismus motoru

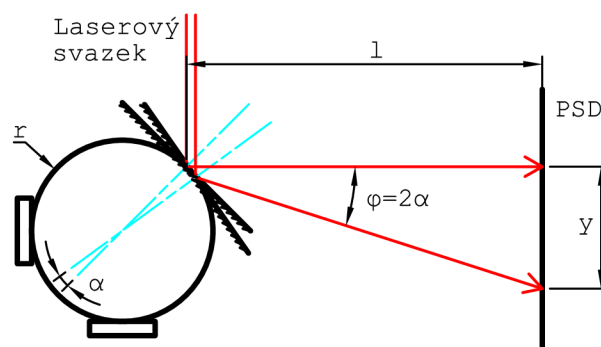
Na obrázku 2.3 je znázorněn náčrt piezoelektrického motoru. Piezokeramické segmenty, umístěné ve stykových bodech kuličky a rohového rámu, zajišťují slip-stick pohyb ve třech prostorových osách. Kulička je tlačena do rohu pomocí magnetu, jenž zajišťuje vznik třecích sil. Vyrobní výkresovou dokumentaci lze nalézt v [4].



Obrázek 2.3: Náčrt rozloženého piezoelektrického motoru.

2.1.3 Určení vychýlení svazku

Pro změření pohybu piezoelektrického motoru bylo využito stejného principu jako při proměření povrchu vzorku mikroskopem AFM, ale namísto vlastního vzorku byla do držáku upnuta odrazná plocha, která odrážela svazek. Během běžného měření se laserový svazek odráží od raménka měřicího hrotu, jenž byl vyjmut. Při zjišťování vlastností pohybu motoru putuje svazek přes první zrcátko od odrazné plochy až ke druhému zrcátku a odtud do PSD. Odraz svazku na druhém zrcátku je vyobrazen na obrázku 2.4. Zrcátko



Obrázek 2.4: Odraz paprsků na zrcátku.

je připevněno na kuličce, kterou je otáčeno slip-stick mechanismem, jak již bylo uvedeno. Při natočení se svazek posouvá po PSD a ten tento posuv detekuje. Na obrázku jsou také naznačeny úhly v trojúhelnících sloužících pro odvození přepočtu smykového posunu piezokeramiky projevujícího se posunem svazku po PSD. Pro X , jako smykový posun piezokeramického segmentu, což je totéž jako posun okrajového bodu kuličky, z geometrie uspořádání platí

$$\frac{X}{r} = \tan \alpha, \quad (2.1)$$

kde r je poloměr kuličky o hodnotě 6 mm. Dále z geometrie plyne

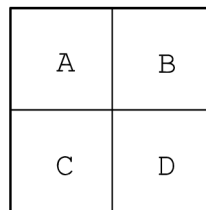
$$\frac{y}{l} = \tan 2\alpha, \quad (2.2)$$

kde y je posun svazku na PSD a $l = 35$ mm vzdálenost mezi zrcátkem a PSD. Pokud je použita aproximace předpokladu malých úhlů, tedy $\tan \alpha \doteq \alpha$, vztah 2.2 lze zjednodušit výrazem

$$X \doteq \frac{ry}{2l}. \quad (2.3)$$

2.2 PSD

Position Sensitive Detector¹ segmentového typu je fotodioda rozdělená na čtyři části označené dle obrázku 2.5. Jednotlivé segmenty lze použít pro měření intenzity dopadajícího světla, pomocí výstupu na každém z nich. Pro zjišťování polohy laserového svazku bylo



Obrázek 2.5: Značení segmentů PSD.

použito diferenciálního měření intenzity mezi jednotlivými segmenty. Intenzita je u fotodiody přímo úměrná její vodivosti, respektive úbytku napětí mezi jejími elektrodami. Odečtením úbytku napětí mezi jednotlivými segmenty dle vztahu (2.4) získáme diferenciální napětí vyjadřující rozdíl v intenzitě mezi pravou a levou polovinou PSD.

$$U_{dH} = (U_A + U_C) - (U_B + U_D), \quad (2.4)$$

kde U_A, U_B, U_C a U_D jsou jednotlivá napětí elektrod segmentů A, B, C, a D proti zemi. Vertikální směr pohybu svazku byl měřen pomocí diferenciálního napětí určeného vztahem

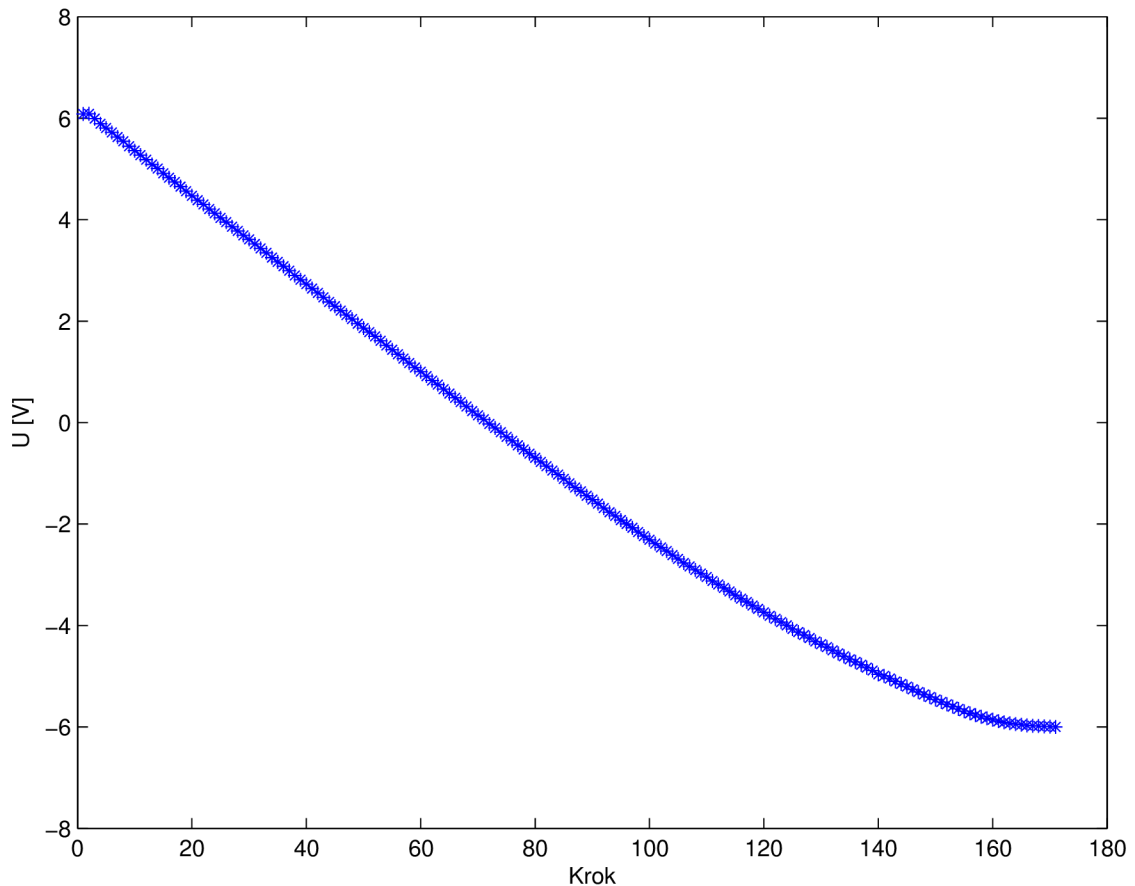
$$U_{dV} = (U_A + U_B) - (U_C + U_D). \quad (2.5)$$

Více viz výrobcce [14].

¹Někdy bývá specifikován pomocí zkratky PSPD z Position Sensitive Photo-Detector

2.2.1 Určení vzdálenosti pomocí PSD

Aby mohla být změřena závislost rychlosti pohybu piezoelektrického motoru na tvaru pulzů a jejich frekvenci, bylo třeba užít přepočtu diferenciálního napětí na vzdálenost, kterou urazil laserový svazek na PSD. Pro tento přepočet bylo předpokládáno, že diferenciální napětí je lineárně závislé na vychýlení laserového svazku. Při celkovém měření nebylo třeba vždy přepočítávat diferenciální napětí na vzdálenost a to tehdy pokud svazek laseru urazil celou vzdálenosti v rozmezí $U_d = -6\text{ V}$ do $U_d = 6\text{ V}$ do stanoveného časového limitu. Graf na obrázku 2.6 popisuje závislost mezi U_d a posunem svazku na PSD.



Obrázek 2.6: Diferenciální napětí na PSD v průběhu posunu laserového svazku.

Tento záznam byl proveden při pohybu² zrcátkem pro frekvenci pulzů 100 Hz. Každý bod na grafu znázorňuje hranu periody napěťového pulzu. Přejezd svazku přes PSD probíhal kontinuálně, tudíž každému pulzu odpovídá konstantní dráha svazku. Toto bylo ověřeno projížděním svazku přes celý rozměr PSD s detekcí jejích krajních hran, kde nastal pokles diferenciálního napětí. Při nízkých frekvencích byl počet pulzů potřebných na přejetí celé oblasti PSD konstantní. Pomocí tohoto měření byla určena délka, o kterou se laserový svazek posunul na PSD za jeden napěťový pulz. Je určena vztahem

$$a' = \frac{a}{N}, \quad (2.6)$$

²Pohyb byl ve směru vpřed, vysvětleno dále.

kde $a = 3 \text{ mm}$ je rozměr PSD a N počet pulzů puštěných do piezokeramického segmentu. Kombinací se vztahem (2.3) získáme vzdálenost X' , o kterou se bod na obvodu kuličky posune vůči piezokeramice za jeden napěťový pulz.

$$X' = \frac{ra}{2Nl}. \quad (2.7)$$

V tabulce 2.1 jsou vyobrazeny naměřené počty pulzů, které byly potřeba k přejetí PSD přes celou její délku pro odlišné směry a několik nízkých frekvencí. Bylo ověřeno, že je možné

Tabulka 2.1: Počty pulzů a výpočet ujeté vzdálenosti X' .

směr	f Hz	N	X' nm
vpřed	10	4555	56,5
vzad	10	4880	52,7
vpřed	50	4532	56,7
vzad	50	5306	48,5
vpřed	100	4497	57,2
vzad	100	5284	48,7
vpřed	100	4616	55,7
vzad	100	4994	51,5

provést velmi přesně linearizaci závislosti posunu laserového svazku po PSD pokud se pohybujeme kolem $U_d = 0 \text{ V}$ (viz graf 2.6). Jelikož je znám posun bodu na obvodu kuličky za jeden pulz X' , lze určit závislost mezi U_d a délkou dráhy bodu na obvodu kuličky X . Ta se řídí vztahem

$$X = \frac{X' N_0}{U_{d0}} U_d, \quad (2.8)$$

kde N_0 je počet pulzů na vzdálenosti odpovídající diferenciálnímu napětí U_{d0} .

2.2.2 Určení nábojové konstanty d_{15}

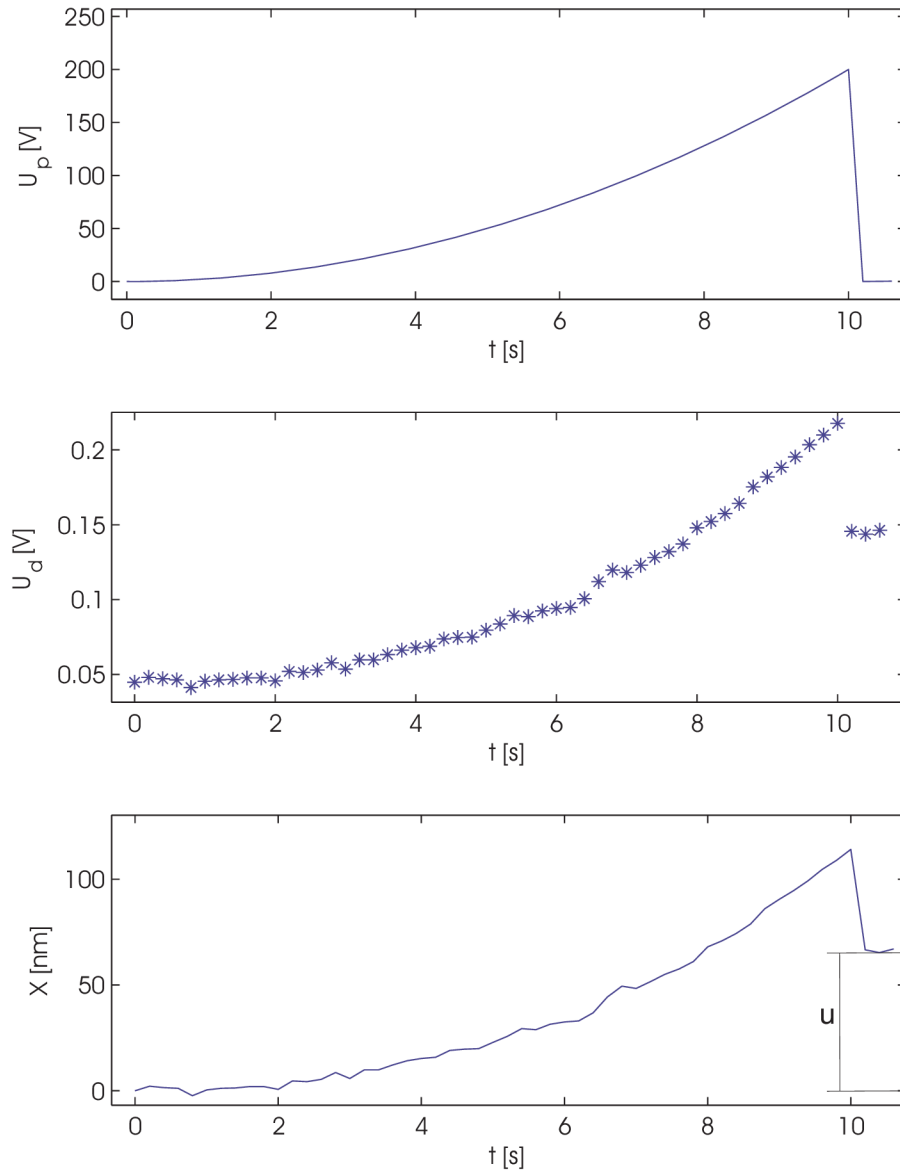
Bylo provedeno měření závislosti U_d na stříhové deformaci piezokeramického segmentu v rámci jednoho pulzu. Tento pulz trval $T = 10 \text{ s}$ a jeho tvar odpovídal parabolické funkci napětí na piezokeramickém segmentu

$$U_p = U_{pMAX} \left(\frac{t}{T} \right)^2, \quad (2.9)$$

kde t je čas. Na PSD bylo v průběhu měřeno U_d , zobrazené v závislosti na čase v grafu na obrázku 2.7 spolu s napětím na piezokeramickém segmentu U_p a posunem obvodového bodu kuličky X . V tomto grafu je také možné pozorovat účinný posuv na jeden pulz, kde přibližně $u = 65 \text{ nm}$. Nedojde k úplnému proklouznutí kuličky, jelikož je z technických důvodů nemožné provést ideální skokovou změnu napětí. Pro výpočet nábojové konstanty d_{15} dle vztahu (1.10) platí

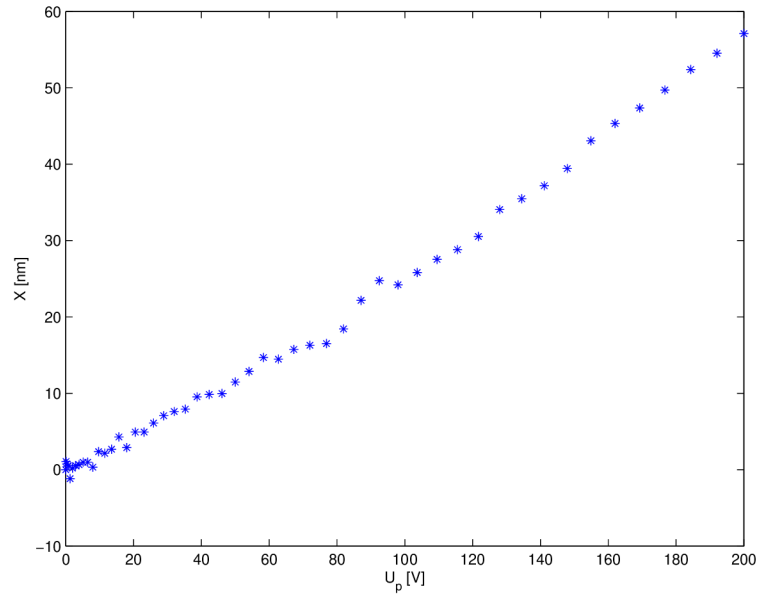
$$d_{15} = \frac{X}{pU_p}, \quad (2.10)$$

kde parametr $p = 2$ vyjadřuje počet piezokeramických segmentů nezávisle nalepených a elektricky oddělených v jediném pohyblivém bloku. V grafu na obrázku 2.8 je vynesena



Obrázek 2.7: Průběh pomalé změny piezokeramiky.

závislost $\frac{X}{U_p}$ na U_p . Pokud body proložíme přímkou, tak její směrnice vyjadřuje právě nábojovou konstantu d_{15} . V našem případě byla naměřena nábojová konstanta o hodnotě $d_{15} = 0.279 \text{ nm V}^{-1}$. Výrobce určená hodnota této konstanty, pro použitý piezokeramický materiál v piezoelektrickém motoru, je $d_{15} = 0.440 \text{ nm V}^{-1}$. Rozdíl mezi naměřenou hodnotou a výrobcem udávanou hodnotou mohl vzniknout stárnutím piezokeramického materiálu.



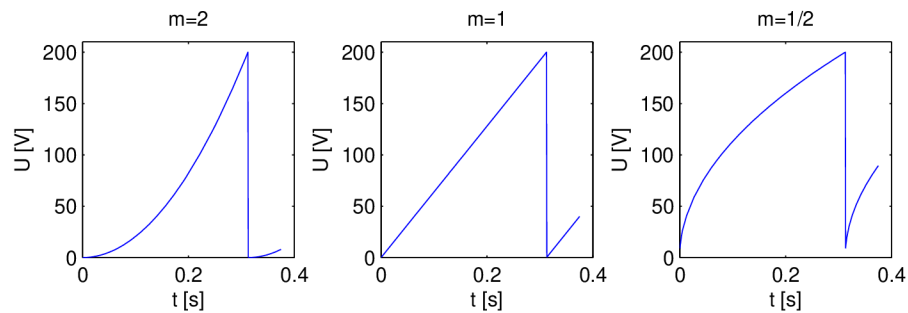
Obrázek 2.8: Průběh pomalé smykové deformace piezokeramického segmentu.

2.3 Tvary pulzů

Tvar napěťového napájecího pulzu byl určen mocninou funkcí, přičemž probíhala změna mocniny určené parametrem m ve vztahu

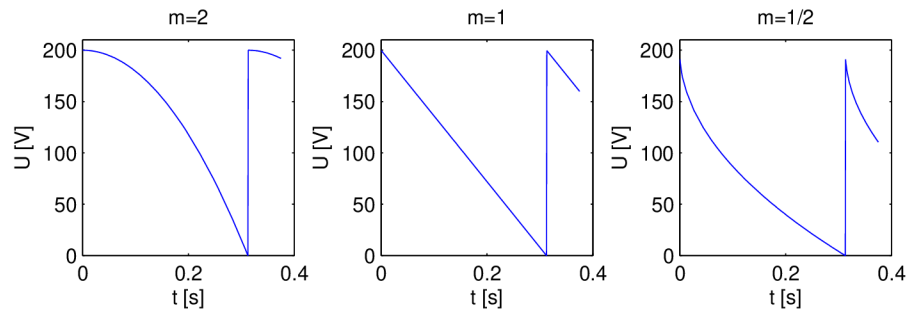
$$U_p = U_{pMAX} (tf)^m, \quad (2.11)$$

kde $U_{pMAX} = 200$ V je amplituda, f frekvence pulzů a t čas od počátku jednotlivého pulzu.



Obrázek 2.9: Pulzy ve směru vpřed pro $m = 2$, $m = 1$ a $m = \frac{1}{2}$.

Tvar pulzu také určuje směr pohybu. Pro pohyb vpřed platí definice (2.11). Aby bylo dosaženo pohybu vzad, je třeba jednotlivé pulzy zrcadlově otočit podél horizontální osy. Vzorke pulzu pro různé mocniny při $f = 1\,600$ Hz je možné shlédnout na prvním obrázku 2.9 pro pohyb vpřed a na obrázku 2.10 pro pohyb vzad.



Obrázek 2.10: Pulzy ve směru vzad pro $m = 2$, $m = 1$ a $m = \frac{1}{2}$.

2.4 Použitý hardware

Generování signálu utvářejícího tvar napájecích napět'ových pulzů smýkajících piezokeramickými segmenty, tak i měření signálu z PSD určující polohu svazku, bylo zajištěno signálovými AD/DA³ převodníky firmy National Instruments, parametry viz [13]. Zesílení napájecího signálu zajišťoval zesilovač sestavený kolegou ing. Nováčkem. Výstupní signál z DA převodníku byl v rozsahu od 0 V do 4 V a po zesílení zesilovačem napájel piezokeramické segmenty pulzy v rozsahu od 0 V do 200 V. Zesílení a zapojení měřeného signálu na PSD bylo realizováno pomocí zesilovače, který je běžně používán při měření s laboratorním přístrojem AFM/STM.

2.5 Popis měřicího programu

Měřicí program byl napsán v programovacím jazyce C++, který dovoluje ovládání převodníků National Instruments pomocí knihoven k tomu určených. Program se skládá z několika oddělených tříd:

`NiDeviceDrv`

Třída zapouzdřující ovládání signálových převodníků NI. Ze začátku nebylo úplně jisté, zda se budou používat přímo typy těchto převodníků, proto bylo nejlepším řešením zapouzdření standardního ovladače National Instruments. Navíc tato třída dovoluje záměnnost převodníků NI.

`measureObject`

Třída zajišťující vlastní měření při jednom průjezdu svazku po PSD. Převodník generující signál vyvolává při každém novém pulzu událost, při které je měřeno napětí na PSD a toto dále vyhodnocováno.

`motionObject`

Tato třída má společného rodiče s třídou `measureObject`, zajišťuje pohyb svazku před měřením a také kalibraci svazku. Tato situace nastane v případě najetí na určitou hodnotu rozdílového napětí PSD nebo na hranu PSD.

`sample`

Třída pro práci s polem hodnot typu `double` určeného pro uchovávání vzorků dat

³Analog Digital/Digital Analog převodník slouží ke konverzi analogového signálu na číslicový a naopak.

pro převodníkovou kartu. Dokáže načtením pulzu ze souboru nebo vytvořením mocninného pulzu vložit data do tohoto pole. Při vytváření pulzů zohledňuje nastavenou frekvenci pulzu. Obsahuje funkci umožňující převod pulzu pro pohyb vpřed na pulz pro pohyb vzad či naopak.

`TeFiSe`

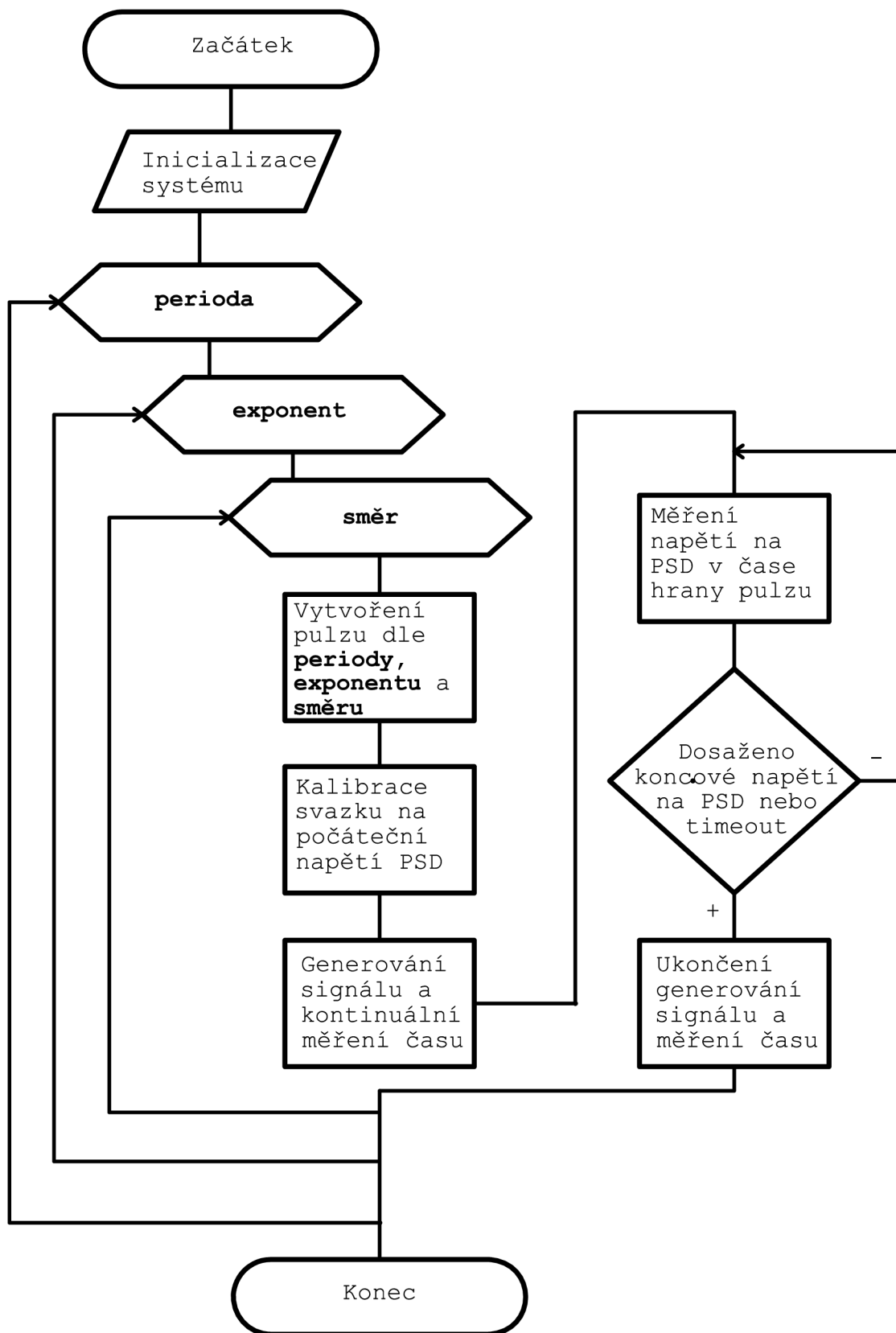
Třída určená pro načtení nastavení experimentu ze souboru a uchování tohoto nastavení v průběhu měření.

`measureRecord`

Třída vytvářející záznamy naměřených dat a zapisuje tyto data do souboru.

Dále byla použita knihovna FoxToolkit⁴ [11] pro práci s poli, textovými řetězci a dalšími běžnými datovými strukturami. Na obrázku 2.11 je znázorněno jádro algoritmického řešení.

⁴Knihovna FoxToolkit je zveřejněna pod licencí General Public Licence [10].



Obrázek 2.11: Vývojový diagram pro algoritmičké řešení experimentu.

2.6 Mechanismus měření

Již v předchozí kapitole byl uveden algoritmus měření. Nyní se budeme zabývat detailnějším popisem vlastního měření rychlosti pohybu piezoelektrického motoru v závislosti na tvaru pulzů a jejich frekvenci. V průběhu měření byl zaznamenáván čas, než piezoelektrický motor natočí zrcátko tak, že laserový svazek urazí na PSD dráhovou výchylku odpovídající diferenciálnímu napětí od $U_d = -6\text{ V}$ do $U_d = 6\text{ V}$. Jelikož U_d se pohybovalo na PSD v maximálních mezích $-10\text{ V} \div 10\text{ V}$, bylo vytvořeno ochranné pásmo v rozsahu $-8\text{ V} \div 8\text{ V}$. Pokud se svazek dostal za ochranné pásmo, tak došlo k zastavení měření a svazek byl zkalibrovan na počáteční hodnotu U_d následujícího měření. Pohyb mezi měřeními byl zajištěn tvarem a frekvencí pulzu, při kterém byl již dříve ověřen pohyb. Jednotlivá měření byla vždy prováděna pro tvar pulzu předpokládající pohyb vpřed a vzad. Postupně byly proměřeny rychlosti pohybu pro pulzy různých frekvencí od 800 Hz až do 16 000 Hz a různých tvarů. Je třeba uvést, že frekvence byly skenovány postupným růstem počtu vnitřních tiků⁵ převodníku na jeden pulz. To vede k nerovnoměrnému kroku frekvence.

Pro případ, že některé tvary či frekvence pulzu způsobí velmi pomalý pohyb, byl stanoven časový limit, respektive maximální počet period pulzů na jedno měření. Pokud byl tento limit překročen, byla provedena kalibrace svazku do počáteční polohy následujícího měření.

2.6.1 Zpracování naměřených dat

Pro jednotlivá měření byla na základě počtu pulzů dopočítána průměrná rychlost. Pro lepší možnost srovnání je podělena dvěma, aby rychlost odpovídala jednomu piezokeramickému segmentu. Ve skutečnosti jsou totiž na sobě nalepeny dva oddělené segmenty. Vzdálenost byla určena v kapitole 2.2.1 (viz tabulku 2.1). Pokud pulz nebyl vyhovující a svazek neurazil vzdálenost do stanoveného limitu, byla vzdálenost dopočítána dle vztahu (2.8).

2.7 Zobrazení výsledků měření

Naměřené průměrné rychlosti v závislosti na frekvenci pulzů a exponentu mocninné funkce jsou vyobrazeny pomocí barvených map na obr. 2.12, 2.13, 2.14 a 2.15. Vždy připadají dvě mapy pro pohyb vpřed a vzad jednomu vyobrazení v rozsahu $f = 800\text{ Hz} \div 16\,000\text{ Hz}$ a druhému vyobrazení v detailu $f = 800\text{ Hz} \div 2\,000\text{ Hz}$. Můžeme si všimnout, že v oblasti do cca $f = 2\,000\text{ Hz}$ je silný vliv exponentu mocninné funkce, kdežto od 2 000 Hz, kde nastává zlom, je vliv minimální. Oblast do $f = 2\,000\text{ Hz}$ můžeme nazvat oblastí *statickou*. Pásmo blízké 2 000 Hz označme *kritickým bodem* a při frekvencích nad 2 000 Hz mluvíme o *dynamické* oblasti. Je možné domnívat se, že ve statické oblasti po proklouznutí kuličky dochází k jejímu rychlému zastavení, viz část 2.1.1. Pokud je zaveden tento předpoklad a vycházíme-li z 2. Newtonova pohybového zákona v jednorozměrném případě

$$F = m\ddot{x}, \quad (2.12)$$

dále se lze domnívat, aby bylo dosaženo nejrychlejšího pohybu, pro urychlující sílu platí zřejmě $F = F_{sMax}$ a dle podmínky (1.13) vyplývá

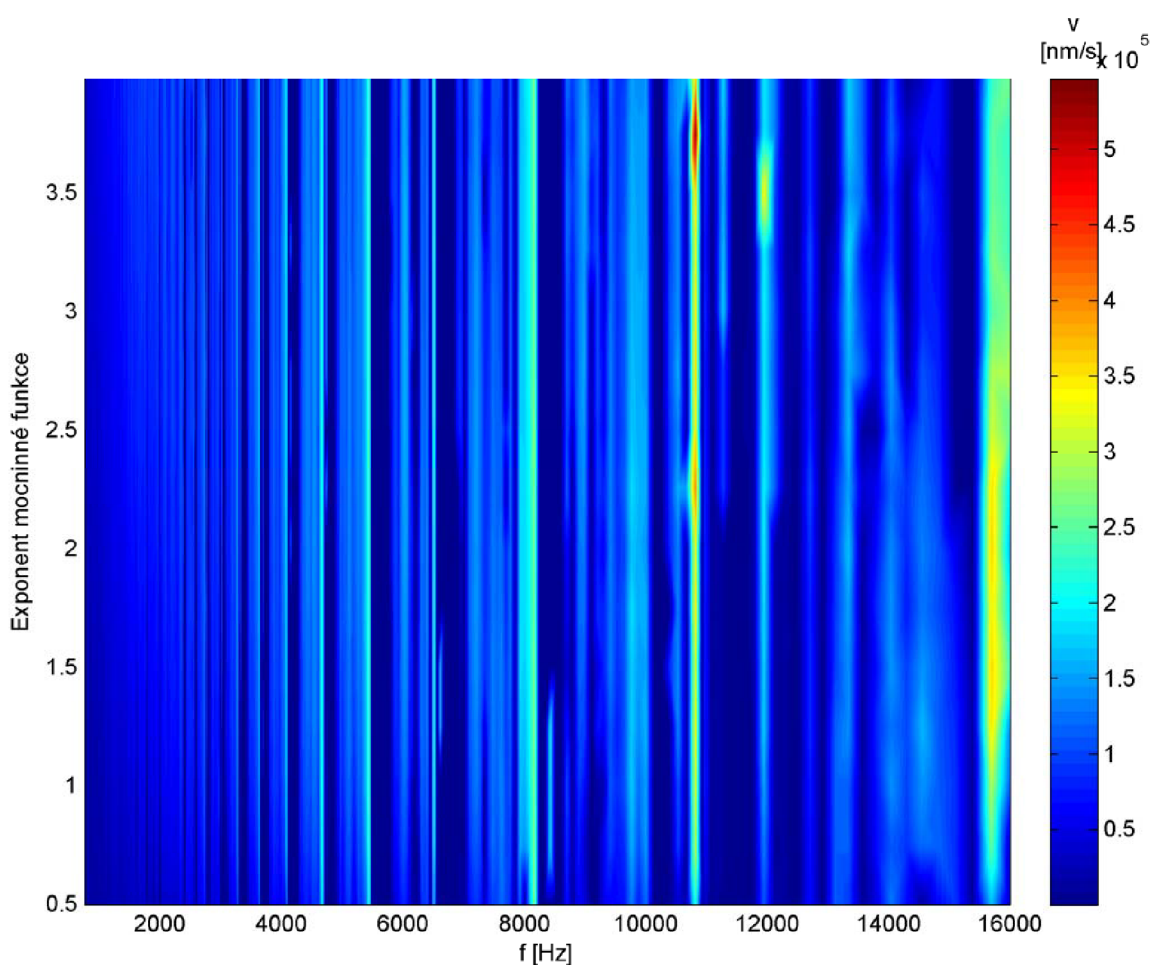
$$F_{sMax} = \mu_d |F_N|, \quad (2.13)$$

⁵Tím je myšlena perioda vzorkovací frekvence tohoto DA převodníku.

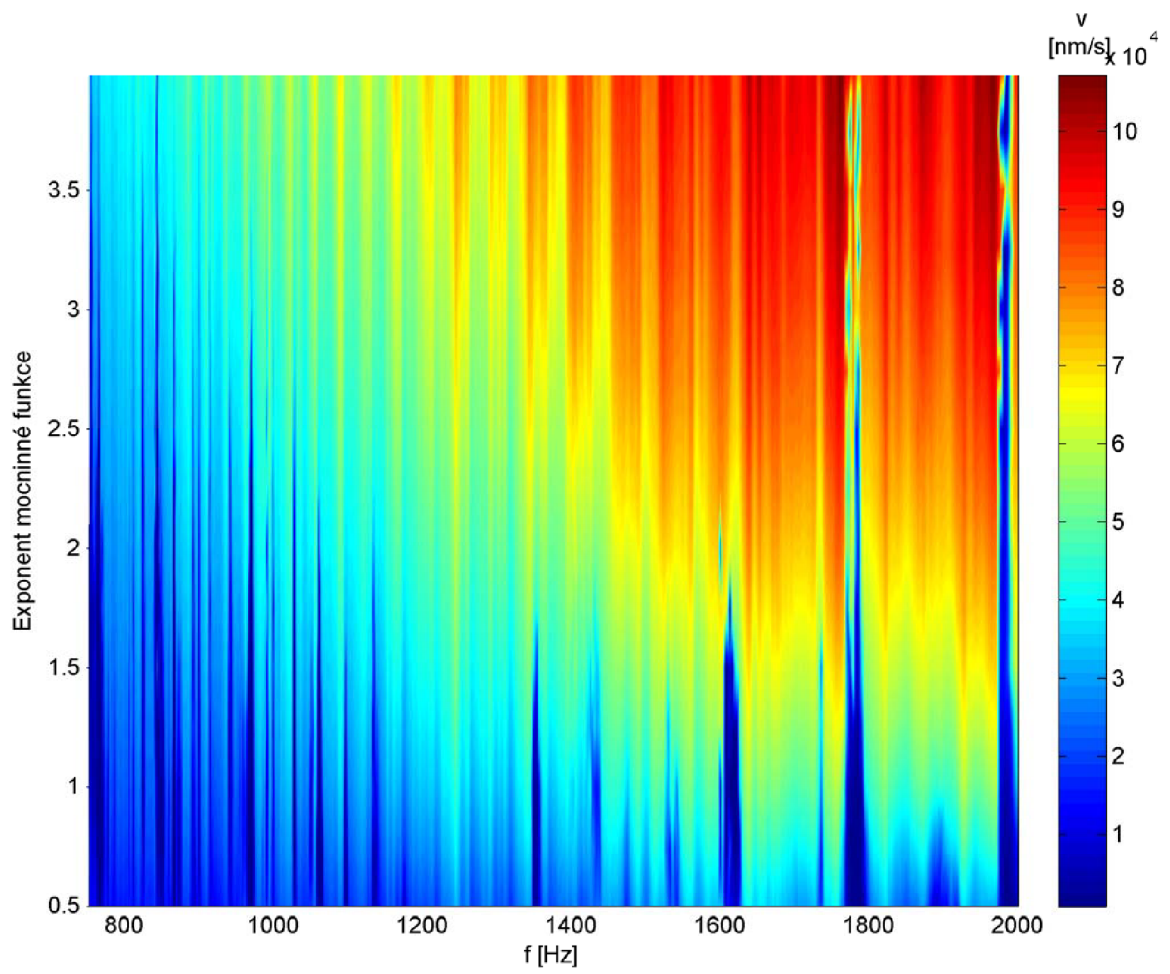
následně dojdeme k vyjádření

$$\ddot{x} = \frac{\mu_d |F_N|}{m}. \quad (2.14)$$

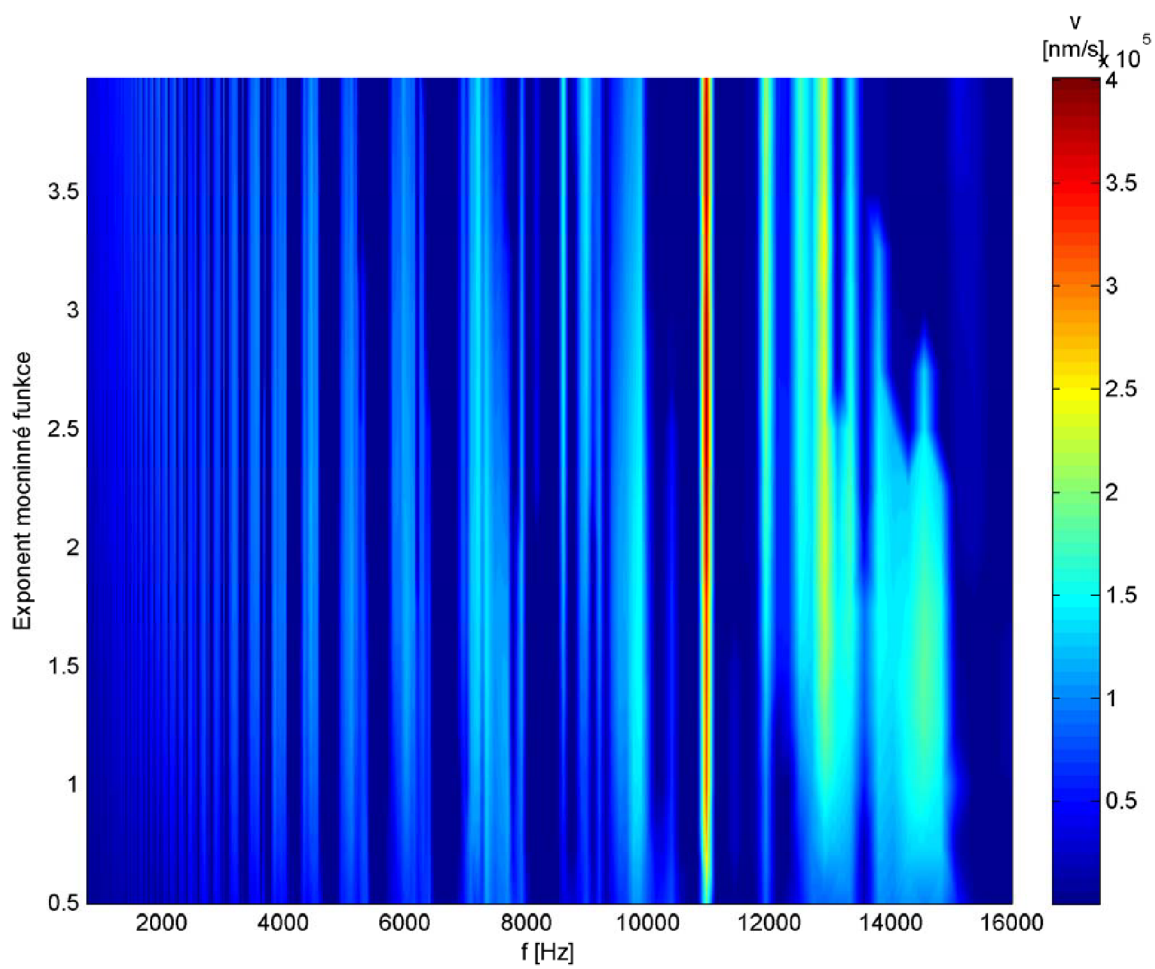
Z tohoto výsledku lze vyvodit, že pravděpodobně nejvyšší rychlost bude dosažena při rovnoměrném zrychlení na povrchu piezokeramického segmentu. Tomu odpovídá pulz určený vztahem (2.11) s exponentem $m = 2$. Je zřejmé, že další přímý vliv na rychlost má frekvence. Z předcházejících vztahů by bylo možné odvodit μ_s , ale pouze pro jednodušší mechanismus piezoelektrického motoru. Jelikož kulička má dva body styku s pohonnými piezokeramickými segmenty, není triviálním problémem určit rozložení sil ve styku. Z map se lze domnívat, že do $f=2000$ Hz je rychlost piezokeramického motoru úměrná frekvenci. Nejvýraznějším prvkem na vyobrazených závislostech jsou podélné pruhy. Lze se domnívat, že odpovídají vlastním frekvencím systému. Výskyt těchto vlastních frekvencí přibližně recipročně závisí na frekvenci f .



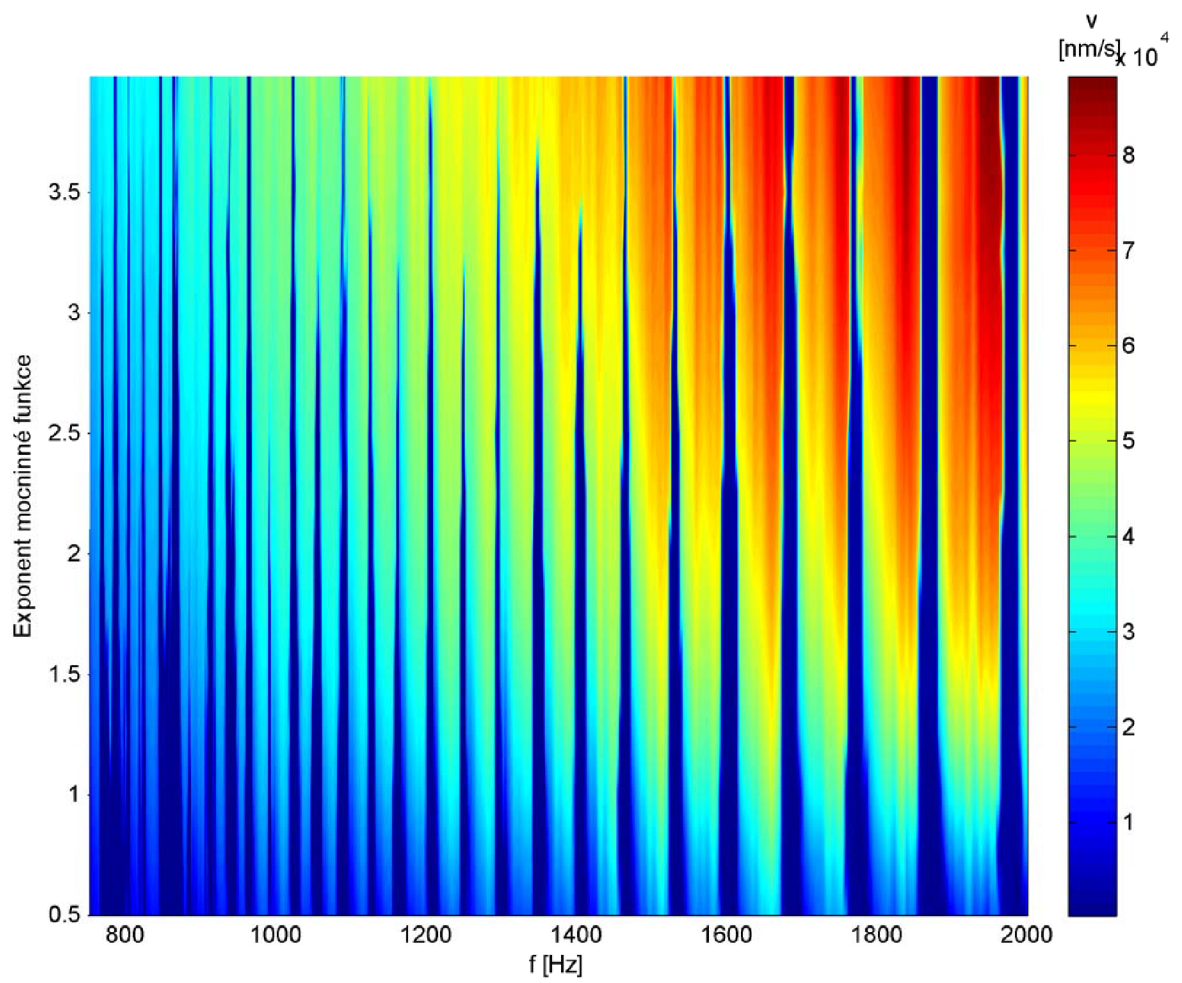
Obrázek 2.12: Mapa rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vpřed.



Obrázek 2.13: Detail statické oblasti mapy rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vpřed.



Obrázek 2.14: Mapa rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vzad.

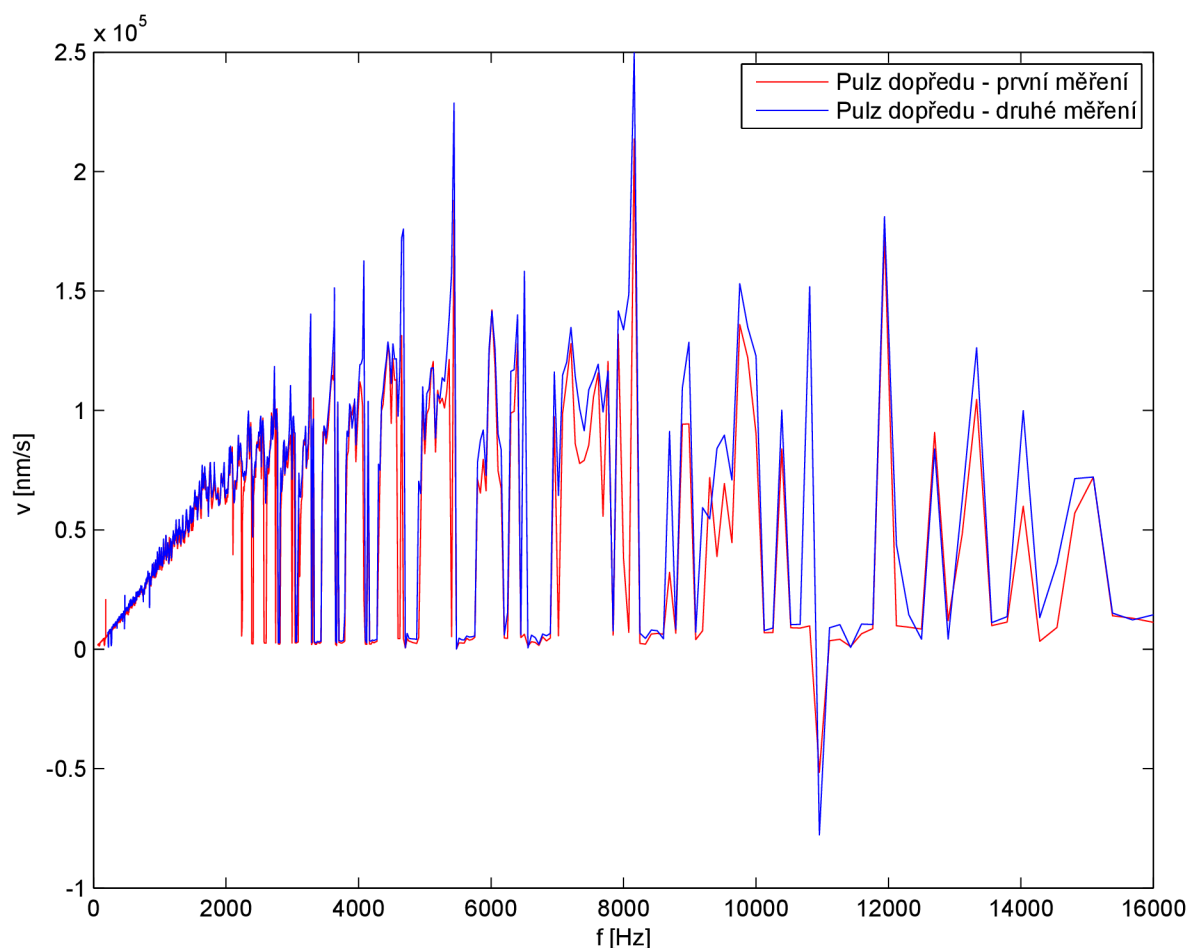


Obrázek 2.15: Detail statické oblasti mapy rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vzad.

Kvůli větší přehlednosti a zjednodušení, budou další sledované jevy a závislosti popisovány na měřeních bez změny exponentu, který určuje tvar pulzu. Na následujících grafech jsou vyobrazeny závislosti rychlosti v smyku povrchu jednoho piezokeramického segmentu na frekvenci f .

2.7.1 Ověření přesnosti měření

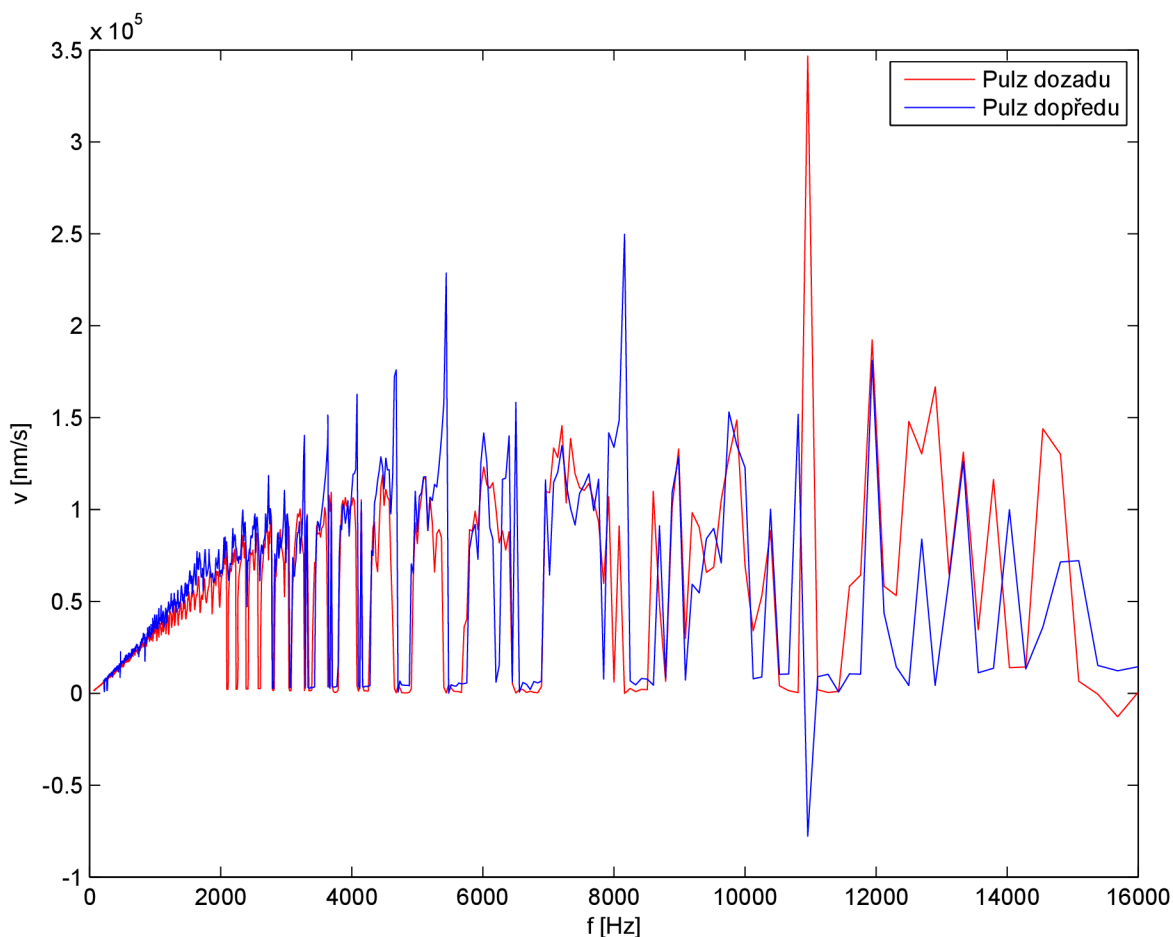
Při měření všech závislostí bylo třeba udržovat zrcátka stále ve stejném nastavení, aby bylo možné tyto závislosti porovnávat. Toto bylo dodrženo po celou dobu provádění následujících měření. K větší věrohodnosti naměřených hodnot byla provedena dvě naprosto identická měření. V grafu na obrázku 2.16 je předkládán jejich záznam. Ten ukazuje, že se měření shodují i v jemnějších detailech. S přiblížením oblastí v nižších frekvencích do 2000 Hz lze konstatovat, že jemné rozkolísání v této oblasti není šum, ale možný projev vlastních frekvencí.



Obrázek 2.16: Srovnání dvou měření za stejných podmínek.

2.7.2 Vliv tvaru pulzu z hlediska směru

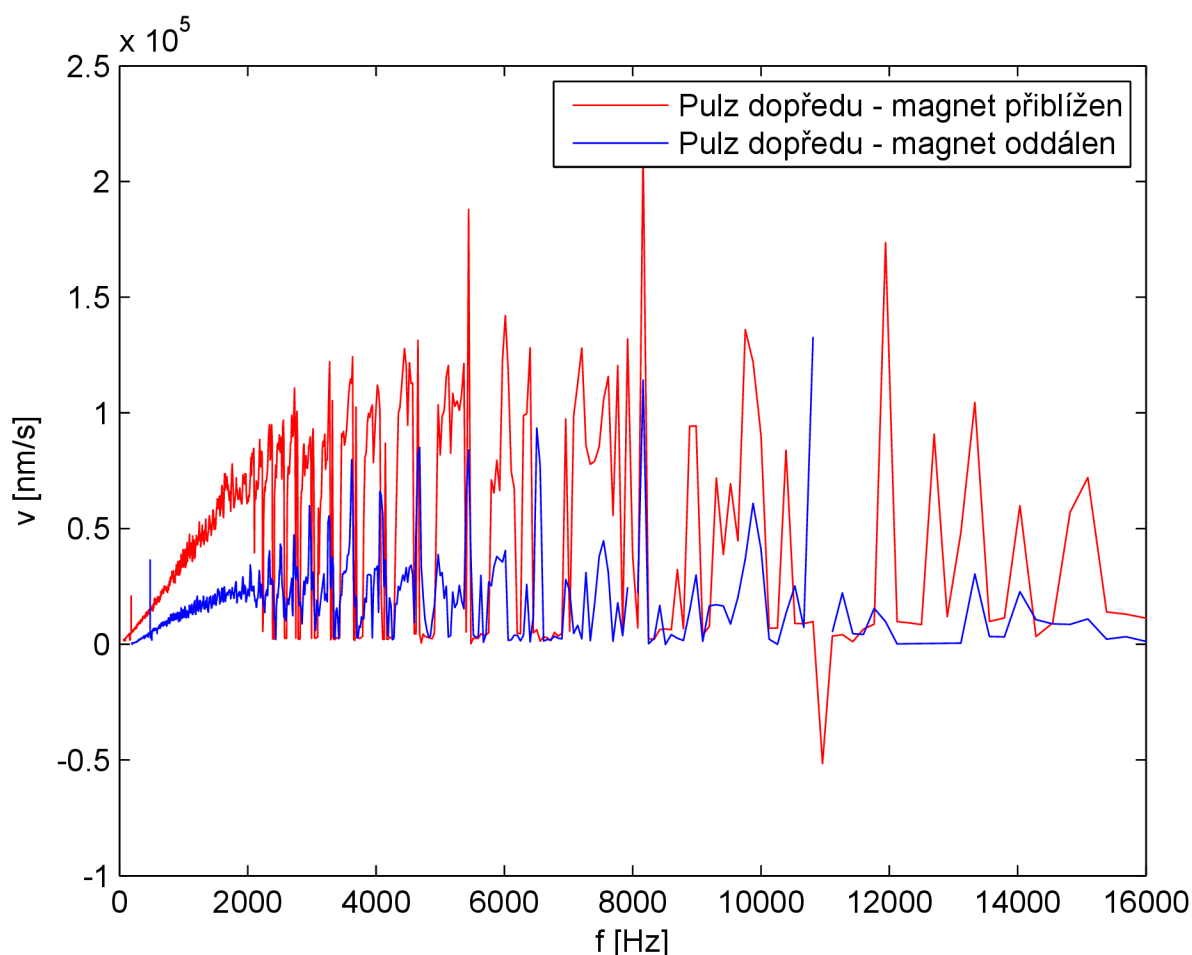
Odlišnost tvaru pulzu z hlediska směru pohybu byla již popsána v části 2.3. Mohli bychom předpokládat, že závislost rychlosti pro směr pohybu vpřed i vzad bude totožná. Z grafu na obrázku 2.17 ovšem plyne, že tomu tak ve skutečnosti není. Z hlediska projevu předpokládaných vlastních frekvencí, lze říci, že jsou přibližně stejné pro oba směry. Největší odlišnost nastává ve statické oblasti frekvencí do 2 000 Hz. Tento jev si lze zřejmě vysvětlit omezením zesílení napájecího signálu. Jelikož piezokeramický segment se chová i jako kondenzátor, který lze rychleji vybit než nabít, což pravděpodobně způsobuje horší prokluz, a proto menší rychlost při použití pulzu pro směr vzad. Celkově pomalejší pohyb vzad je též možno pozorovat z barvených rychlostních map. Tento problém lze vyřešit symetrickým zesilovačem, který dovoluje zesílit napájecí signál i do záporných napětí. Další možností je oddělení uzemnění piezokeramických segmentů od společné země mikroskopu, jenž umožní komutací signálu měnit směr pohybu.



Obrázek 2.17: Porovnání z hlediska tvaru pulzu pro různé směry pohybu.

2.7.3 Změna přitlačné síly

Další parametr, který silně ovlivňuje pohyb piezoelektrického motoru je použitá přitlačná síla, viz vztah (2.14), vytvářená působením magnetu. Velikost přitlačné magnetické síly byla ovlivněna posunem magnetu (cca 2-4 mm) tak, že došlo ke změně vzdálenosti magnetického pole působícího na kuličku. Magnetická síla se vzdáleností klesá s šestou mocninou. Účinek této síly je naznačen grafem na obrázku 2.18. Je patrné, že větší přitlačná síla vede k vyšší rychlosti piezoelektrického motoru. Zřejmě by existovala taková přitlačná síla, respektive vzdálenost magnet - kulička, která by maximálně využívala možností soustavy složené z generátoru a zesilovače napájecího signálu. S velkou přitlačnou silou totiž hrozí, že piezokeramický segment neproklouzne ve 2. fázi pohybu (viz kapitolu 2.1.1) a kulička zůstane stát na místě. Nalezení vhodné přitlačné síly by bylo možné provést nahrazením přírodního magnetu elektromagnetem. Řízením toku elektrického proudu vnitřním elektromagnetem, bychom podobně získali závislost přitlačné síly na rychlosti. Tento proud je úměrný intenzitě elektrického pole, které je původcem přitlačné síly. Návrh elektromagnetu již byl částečně specifikován, ale prozatím nebyl dokončen.



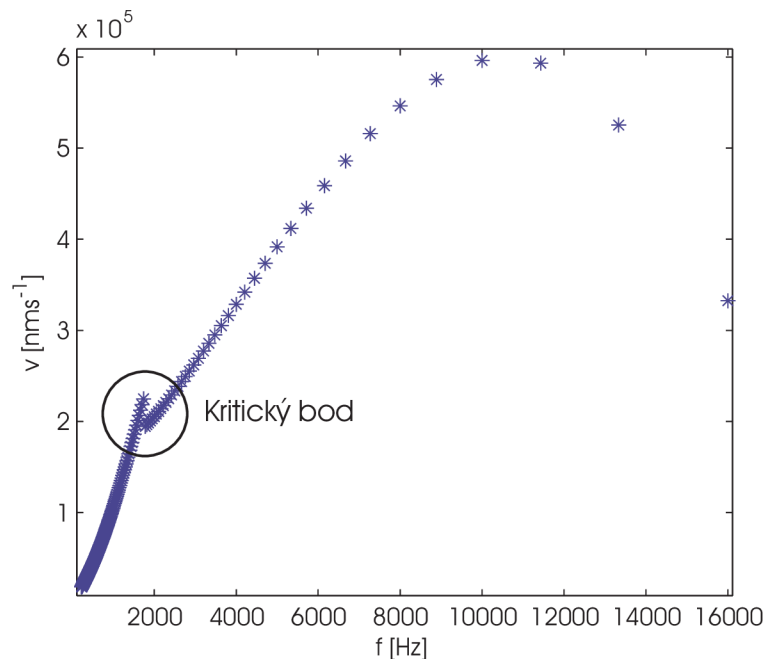
Obrázek 2.18: Změna přitlačné síly posunutím magnetu.

2.8 Simulace

Aby bylo možno objasnit některé další vlastnosti, byla vypracována simulace v programu Matlab. Pro simulaci byl zvolen zjednodušený model, kdy se piezokeramický segment dotýká kuličky pouze v jediném bodě. Fixace byla zajištěna dalším dotykem bez vlivu tření. Těleso bylo považováno za dokonale tuhé. Simulační program zde nebude popisován, pouze budou shrnuty výsledky simulace.

Je důležité uvést, že do simulace byly dosazovány parametry určené přesně (hmotnost kuličky, rozměry), ale také parametry, které nám nejsou přesně známy (statický koeficient tření μ_s , dynamický koeficient tření μ_d a přitlačná síla). Nejen z těchto důvodů, ale také z důvodů nahrazení skutečného tělesa velmi přibližným modelem, je třeba brát výsledky simulace jako orientační.

Simulace víceméně kopírovala průběh experimentu, jak z hlediska tvaru napájecích pulzů, tak frekvenčně. Bylo vytvořeno několik simulací, které se svým chováním blížily experimentálně naměřeným závislostem, hlavně ve statické části. Ve vytvořených závislostech rychlosti na frekvenci se vždy vyskytoval *kritický bod* vyznačený v grafu na obrázku 2.19. Jeho poloha je určena koeficienty tření, přitlačnou silou a tvarem pulzu.



Obrázek 2.19: Simulace závislosti rychlosti povrchu piezokeramického segmentu na frekvenci při tvaru pulzu o mocnině $m=2$ a koeficientech tření $\mu_s=0.21$, $\mu_d=0.15$.

Zde jsou souhrnně uvedeny možné výsledky vyjevené simulací.

- Vliv přitlačné síly přibližně odpovídal experimentu.
- Ukázalo se, že velikost rozdílu $|\mu_s - \mu_d|$ zřejmě není pro rychlost pohybu podstatná, dle simulací ovlivňuje chování v oblasti kolem kritického bodu.
- S rostoucími velikostmi μ se kritický bod posouvá do vyšších rychlostí i frekvencí.

- Největší vliv má zřejmě tvar sestupné hrany pulzu, která určuje, jestli kulička na piezokeramickém segmentu vůbec proklouzne.

2.8.1 Shrnutí simulace

Simulace neodhalila domnělé vlastní frekvence, jelikož těleso bylo považováno za absolutně tuhé. Vlastní frekvence by pravděpodobně bylo možné zjistit modální analýzou, nebo simulací celého experimentu FEM⁶ programem (např. ANSYS).

2.9 Návrh vhodného tvaru pulzu a frekvenčních pásem

Z měření bylo možno určit několik frekvencí, které by mohly být použitelné pro pohyb piezoelektrického motoru. Je možné předpokládat, že vhodnost těchto frekvencí bude přibližně stejná, obzvláště mimo statickou oblast, při atmosférickém tlaku, tak i v podmínkách UHV.

Statická oblast frekvencí se vyznačuje mnohem menším projevem domnělých vlastních frekvencí, proto se zde nenacházejí frekvence, při kterých kulička úplně stojí. Na úkor této vhodné vlastnosti je menší velikost rychlosti. Jelikož frekvence (viz tabulku 2.2) jsou raději navrženy dále od kritického bodu, tak vhodný tvar pulzu by měl odpovídat mocnině funkci s exponentem $m > 2$ např. $m = 3, 5$.

Tabulka 2.2: Navržené frekvence pro statickou oblast.

$\frac{f_s}{\text{Hz}}$	$\frac{v}{\text{mms}^{-1}}$
1747	$0,6 \div 0,8 \cdot 10^5$
1559	$0,5 \div 0,7 \cdot 10^5$
1333	$0,4 \div 0,6 \cdot 10^5$

Vhodná frekvenční pásma plynoucí z měření pro dynamickou oblast dovolují dosáhnout větších rychlostí. Zde je dobré použít tvar pulzu s $m = 2$. V tabulce 2.3 je uveden jejich přehled i s přibližnou šířkou použitelného pásma, které by mělo zajišťovat výskyt frekvencí s nenulovou rychlostí pohybu.

Tabulka 2.3: Navržené frekvence pro dynamickou oblast.

$\frac{f_d}{\text{Hz}}$	$\frac{f_{dmin}}{\text{Hz}}$	$\frac{f_{dmax}}{\text{Hz}}$	$\frac{v}{\text{mms}^{-1}}$
7207	7080	7619	$1,0 \div 1,5 \cdot 10^5$
9639	9412	9877	$0,8 \div 1,5 \cdot 10^5$
12900	12600	13100	$1,0 \div 2,5 \cdot 10^5$

⁶Metoda konečných prvků (ang. Finite Element Method).

Závěr

Měření a optimalizace byly provedeny za atmosférického tlaku, ale program je připraven na optimalizaci pulzů v podmínkách ultravysokého vakua. Je možné, že nebude potřeba tuto optimalizaci provádět, jelikož ultravysoké vakuum by nemělo mít vliv na domnělé vlastní frekvence.

Hledání vhodných materiálů do ultravysokého vakua se zatím jeví jako nepodstatné, protože v ultravysokém vakuu rostou koeficienty smykového tření, což by mělo vést ke zvýšení rychlosti natáčení kuličky v piezoelektrickém motoru. Pokud by bylo zjištěno, že tyto koeficienty jsou tak velké, a proto by nedocházelo k prokluzu kuličky na hraně napájecího pulzu, je možné posunout magnet a tím snížit přitlačnou sílu.

Jako další faktor ovlivňující rychlost pohybu se jeví skutečný tvar sestupné hrany napájecích pulzů, jenž závisí na zesilovači a vzorkovací frekvenci generátoru signálu. Bylo zaznamenáno, že jako nejvhodnější tvar pulzu vyhovuje mocninná funkce s exponentem $m=2$, případně vyšším. Na základě všech naměřených závislostí byly navrženy vhodné frekvence pulzů včetně šířky pásma.

Další vývoj by se mohl ubírat směrem k ověření optimalizace v ultravysokém vakuu, odhalení podstaty předpokládaných vlastních frekvencí metodou konečných prvků, návrhem říditelného elektromagnetu, následnou optimalizací přitlačné síly a v poslední řadě vhodnějším konstrukčním návrhem piezoelektrického motoru.

Seznam obrázků

1.1	Princip AFM s detekcí odrazu laserového svazku pomocí PSD.	5
1.2	Podélná deformace piezokeramického segmentu.	7
1.3	Příčná deformace piezokeramického segmentu.	7
1.4	Střihová deformace piezokeramického segmentu.	8
1.5	Hysterezní křivka piezokeramického materiálu, převzato z [15].	9
2.1	Blokové schéma měření.	10
2.2	Slip-stick pohyb.	11
2.3	Nákres rozloženého piezoelektrického motoru.	12
2.4	Odraz paprsků na zrcátku.	12
2.5	Značení segmentů PSD.	13
2.6	Diferenciální napětí na PSD v průběhu posunu laserového svazku.	14
2.7	Průběh pomalé změny piezokeramiky.	16
2.8	Průběh pomalé smykové deformace piezokeramického segmentu.	17
2.9	Pulzy ve směru vpřed pro $m = 2$, $m = 1$ a $m = \frac{1}{2}$	17
2.10	Pulzy ve směru vzad pro $m = 2$, $m = 1$ a $m = \frac{1}{2}$	18
2.11	Vývojový diagram pro algoritmické řešení experimentu.	20
2.12	Mapa rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vpřed.	22
2.13	Detail statické oblasti mapy rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vpřed.	23
2.14	Mapa rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vzad.	24
2.15	Detail statické oblasti mapy rychlosti na povrchu piezokeramického segmentu při pulzech předpokládající pohyb vzad.	25
2.16	Srovnání dvou měření za stejných podmínek.	26
2.17	Porovnání z hlediska tvaru pulzu pro různé směry pohybu.	27
2.18	Změna přítláčné síly posunutím magnetu.	28
2.19	Simulace závislosti rychlosti povrchu piezokeramického segmentu na frekvenci při tvaru pulzu o mocnině $m=2$ a koeficientech tření $\mu_s=0.21$, $\mu_d=0.15$	29

Literatura

- [1] Ch. Kittel: *Úvod do fyziky pevných látek*. Academia, 1985, str. 96.
- [2] E. Meyer: *The Lab on a Tip*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003, ISBN 3-540-43180-2.
- [3] Filip Lopour: *Návrh zařízení pro sledování povrchů pevných látek v podmínkách ultravakua metodou STM/SFM*. Diplomová práce, VUT v Brně, 1997, vedoucí práce: Tomáš Šíkola.
- [4] Filip Lopour: *Development and application of an UHV SPM microscope*. Dizertační práce, VUT v Brně, 2005, vedoucí práce: Tomáš Šíkola.
- [5] Jolien Dendooven a Ezio Iacocca a Nicolas Innocenti a Filip Vanlerberghe: *Nanopiezotronics for Sensor and Generator Applications*. Royal Institute Of Technology, 2007-2008.
- [6] Kasahara Akira a Goto Masahiro a Tosa Masahiro a Yoshihara Kazuhiro: Measurement of friction force electrochemical buffing and chemical polishing to decrease sliding friction in high vacuum with control of surface nano roughness. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, ročník 559, 2003/11/15: s. 45–48.
- [7] Olsson, H. a Astrom, K. J. a de Wit, C. C. a Gafvert, M. a Lischinsky, P.: Friction models and friction compensation. *Eur. J. Control*, ročník 4, č. 3, 1998: s. 176–195.
- [8] Pedram Birounvand a Magnus H. Berntsen a Johan Penttilä a Solmaz Shokatloo a Malin Wahlqvist: *Biosensors based on piezoelectric materials: Indoor air monitoring and detection of bacterial spores*. Royal Institute Of Technology, October 2005.
- [9] Americanpiezo: Piezo Theory. http://www.americanpiezo.com/piezo_theory, 2008/19/05, [online].
- [10] GNU: General Public Licence. <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>, 2008/19/05, [online].
- [11] Jeroen van der Zijp: FoxToolkit. <http://www.fox-toolkit.org>, 2008/19/05, [online dokumentace].
- [12] MatNet: MatNet Piezoelektrické Materiály. <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=347>, 2008/19/05, [online].
- [13] National Instruments: NI 622x Specifications. Specifikace převodníkové karty zdroj: <http://www.ni.com>, 2008/19/05, [online katalog].

- [14] OSI Optoelectronics: PSD Characteristics.
udt.com/application-notes/AN-Position-Sensing-Photodiodes.pdf,
2008/19/05, [online katalog].
- [15] Physikinstrumente: Piezo tutorial.
http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_tutorial.php,
2008/19/05, [online].
- [16] Piezo: <http://www.piezo.com>, 2008/19/05, [online].
- [17] Piezojena: <http://www.piezojena.com>, 2008/19/05, [online].
- [18] Poeton: <http://www.poeton.co.uk/w1/space/tribology.htm>, 2008/19/05,
[online].
- [19] Wikipedia: Piezoelectricity.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>, 2008/19/05, [online].