



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

SKENER RASTROVACÍ SONDOVÉ MIKROSKOPIE S VYSOKOU REZONANČNÍ FREKVENCÍ

SCANNING PROBE MICROSCOPY SCANNER WITH HIGH RESONANT FREQUENCY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matyáš Krupa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Pavera, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Matyáš Krupa**
Studijní program: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Michal Pavera, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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 bakalářské práce:

Skener rastrovací sondové mikroskopie s vysokou rezonanční frekvencí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nezbytným pohybovým prvkem technik mikroskopie rastrovací sondou (SPM) je skener jehož hlavním úkolem je realizace jemného pohybu během měření zkoumaných vzorků. Skenery jsou dnes téměř výhradně realizovány pomocí piezokeramik, díky kterým lze zaručit dostatečně přesné a opakovatelné nastavení polohy. V komerčně dostupných skenerech se navíc využívá pákových systémů, díky kterým lze rozsahy pohybů piezokeramiky výrazně navýšit. Kromě rozlišení a rozsahu jsou skenery zatíženy i dalšími konstrukčními požadavky, přičemž jedním z hlavních se jeví jejich rezonanční frekvence. Rezananční frekvence vypovídá o celkové tuhosti konstrukce, která může mít vliv na kvalitu snímaného obrázku, a také na rychlost skenování. Zaměřením této práce je návrh skeneru dosahující vyšších rezonančních frekvencí.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedte rešeršní studii skenerů využívající piezokeramiky a pákové systémy.
- 2) Na vybraných typech skenerů provedte mechanickou simulaci a vyberte vhodnou konstrukci.
- 3) Navrhněte konstrukci skeneru s vyšší rezonanční frekvencí.

Seznam doporučené literatury:

MEYER, Ernst, Hans Josef HUG a Roland BENNEWITZ. Scanning probe microscopy: the lab on a tip. Berlin: Springer, c2004. Advanced texts in physics. ISBN 35-404-3180-2.

VŮJTEK, Milan, Roman KUBÍNEK a Miroslav MAŠLÁŇ. Nanoskopie. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3102-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce skeneru rastrovací sondové mikroskopie s vysokou rezonanční frekvencí. První část práce je zaměřena na teorii jako princip mikroskopie atomárních sil, charakteristiku funkce skeneru a jeho vlastností. V druhé části je popsán postupný vývoj nového mikroskopu. Nejdříve jsou představeny mechanické simulace používané k určení vlastností skenerů. Dále se práce věnuje samotnému návrhu nejdříve pro osy x, y a následně i pro osu z. Na závěr je představen výsledný návrh trojosého skeneru s vyšší rezonanční frekvencí.

Summary

The thesis deals with the design of the scanning probe microscopy scanner with a higher resonant frequency. The first part of the thesis is focused on theory as the principle of atomic force microscopy, function of the scanner and its properties. The second part describes the gradual development of a new microscope. The mechanical simulations used to determine the properties of scanners are introduced first. Furthermore, the thesis deals with the design for the x, y axis and then also for the z axis. In conclusion, the final design of a three-axis scanner with a higher resonant frequency is presented.

Klíčová slova

SPM, AFM, piezokeramika, piezo skener

Keywords

SPM, AFM, piezoceramics, piezo scanner

KRUPA, M. *Skener rastrovací sondové mikroskopie s vysokou rezonanční frekvencí.*

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 31 s.

Vedoucí práce Ing. Michal Pavera, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Skener rastrovací sondové mikroskopie s vysokou rezonanční frekvencí* vypracoval sám s odborným vedením mého vedoucího, a že veškerá použitá literatura je uvedena v seznamu citací.

Matyáš Krupa

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce Ing. Michalu Paverovi Ph.D. za skvělé vedení, nespočet cenných rad, trpělivost a korektury v průběhu psaní této práce. Děkuji také celému kolektivu firmy Nenovision s.r.o, který mi poskytl zázemí a zejména pak Ing. Ondřeji Novotnému za odborné konzultace. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině, přítelkyni a přátelům za podporu během celého studia.

Matyáš Krupa

Obsah

Úvod	3
1 1. Mikroskopie atomárních sil	5
1.1 Působící síly	5
1.2 Režimy měření	6
2 2. Skenery	9
2.1 Piezoelektrické vlastnosti	9
2.2 Parametry	10
2.3 Typy skenerů	12
3 3. Návrh skeneru	15
3.1 Modelování a simulace	15
3.2 Mechanická simulace skeneru PXY 38	17
3.3 Návrh konstrukce pro osy x a y	18
3.4 Návrh konstrukce pro osu z	23
3.5 Výsledná konstrukce	25
4 Závěr	27
Seznam použité literatury	29

Úvod

S rychlým technologickým pokrokem v elektrotechnickém průmyslu dochází k neustálému zmenšování součástek. Jsou kladeny stále větší nároky na dosažení co nejefektivnější výroby a kontroly jejich vlastností. Proto jsou vyvíjeny multifunkční zařízení kombinující více technik pro zvyšování efektivity a rychlosti analýzy vlastností. Příkladem takového zařízení je mikroskop s rastrovací sondou, který využívá soubor technik rastrovací sondové mikroskopie (*Scanning Probe Microscopy*, SPM). Mezi hlavní techniky se řadí rastrovací tunelovací mikroskopie (*Scanning Tunneling Microscopy*, STM) a mikroskopie atomárních sil (*Atomic Force Microscopy*, AFM) [1].

Techniky SPM jsou určeny k zobrazování povrchů a vrstev ve velmi vysokém rozlišení. Součástí sondy je ostrý hrot, který interaguje s povrchem vzorku. K této interakci dochází při řádkovém rastrování bodů zvolené oblasti povrchu vzorku. Rastrování je uskutečněno pohybem sondy, nebo pohybem vzorku. K pohybu vzorku jsou určeny speciální zařízení, které jsou součástí mikroskopu a souhrnně se nazývají skenery.

Skenery slouží k velmi přesnému pohybu se vzorky (v řádu nanometrů) a jsou tedy základem a nezbytným prvkem technik SPM. Jejich pohyb je téměř výhradně umožněn díky využití piezokeramik a jejich roztahování a smršťování v závislosti na přiloženém napětí. Skenery podle potřeb měření existují s různou možností pohybu v osách, tedy jednoosé, dvouosé, trojosé i víceosé skenery. Důležitá je také nezávislost těchto os pohybu, tedy jestli se navzájem neovlivňují. Mezi základní parametry skeneru patří jeho nejnížší rezonanční frekvence a rozsah pohybu, tyto parametry mohou být pro každou osu pohybu různé. Rezonanční frekvence vypovídá o celkové tuhosti konstrukce a přímo ovlivňuje maximální rychlost, se kterou je možno rastrovat. Rozsah pohybu skeneru udává nejvyšší možnou vzdálenost pohybu se vzorkem pro každou osu, a tedy maximální oblast rastrování. Dle konstrukce a základních vlastností lze skenery rozdělit na základní typy: tripod, trubkový skener, pákový skener a ohybový skener.

Nejvíce používaným typem je dnes ohybový skener, ve kterém jsou osy pohybu oddělené a neovlivňují se. Existující skenery tohoto typu se liší výslednými parametry, některé se soustředí na velký rozsah pomocí pákových systému, ale mají menší rezonanční frekvenci. Naopak vysokofrekvenční skenery jsou často omezovány velmi malým rozsahem pohybu. Náplní této práce je návrh konstrukce skeneru s odděleným pohybem os a vyšší rezonanční frekvencí při zachování rozsahu pohybu v řádu desítek mikrometrů.

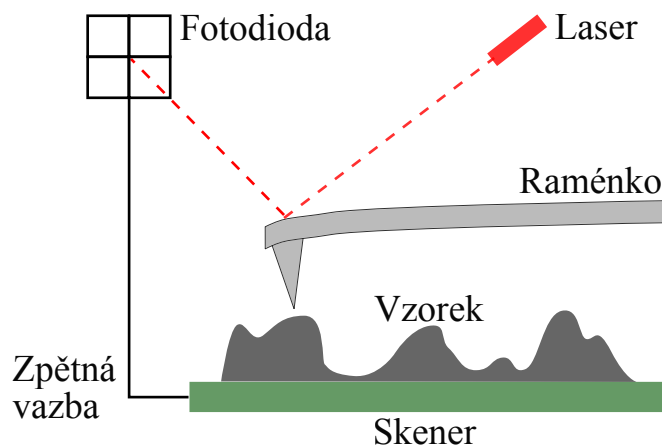
1. Mikroskopie atomárních sil

Mikroskopie atomárních sil je technika představená v roce 1986 vědci Gerdem Binnigem a Heinrichem Rohrerem [2]. Přelomová byla v možnosti studia povrchů v atomárním rozlišení u nevodivých vzorků. Možnost měření vlastností povrchů téměř jakéhokoli typu materiálu včetně biologických je zásadní výhoda oproti dříve známé metodě STM [3].

Její princip je založen na detekci působících sil mezi povrchem vzorku a sondou. Používaná sonda se skládá z pružného raménka (*cantilever*) s vlastní tuhostí, na jehož konci je ostrý hrot. Rozlišení měření závisí z velké části právě na rozměru tohoto hrotu. Hrot je podle měřicího režimu přiveden do kontaktu či velmi blízké vzdálenosti se vzorkem. Síla mezi hrotem a povrchem způsobuje průhyb raménka. Tento průhyb je nejčastěji snímán pomocí laserového svazku namířeného na konec raménka. Po dopadu se svazek odráží na světelný detektor, kterým bývá nejčastěji čtyřkvadrantová fotodioda přeměňující dopadající světlo laserového svazku na fotoproud. Průhyb raménka je poté určen porovnáním hodnot z jednotlivých kvadrantů fotodiody. Získaný signál z fotodiody je pomocí okruhu zpětné vazby přenesen do skeneru, který realizuje pohyb vzorku. Snímáním pohybu skeneru v každém bodě rastru je vytvořen 3D obraz topografie povrchu vzorku (obrázek 1.1).

1.1 Působící síly

Interakce mezi atomy hrotu a povrchem zkoumaného vzorku je ovlivněna mnoha silami. Tyto síly jsou závislé na vzdálenosti mezi hrotem a povrchem vzorku (obrázek



Obrázek 1.1: Schéma měření AFM. Převzato a upraveno z [x].

1.2). Některé síly jsou dominantnější než jiné, a proto jsou popsány ty nejcharakterističtější.

Van der Waalsova síla

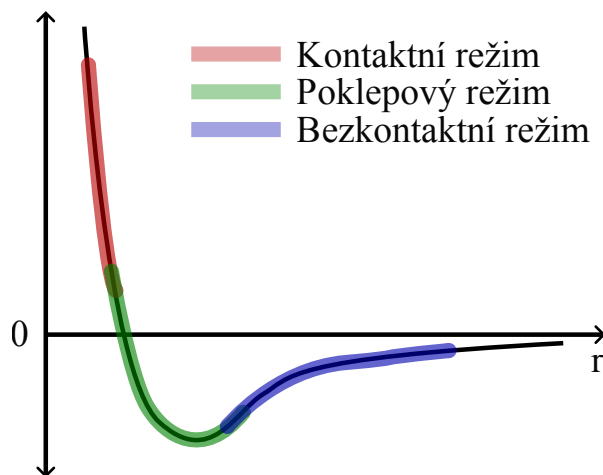
Při přibližování hrotu k povrchu dochází k přitahování hrotu vlivem van der Waalsových sil. Tyto interakce můžeme chápat jako slabé přitažlivé síly působící mezi atomy, které jsou založené na existenci dipólového momentu. Van der Waalsova síla je tedy součet všech sil vzniklých interakcemi všech atomů hrotu a vzorku [4].

Odpudivá síla

Postupným přibližováním hrotu k povrchu se jejich atomy dostanou do stavu, kdy jsou tak blízko sebe, že jsou dále odpuzovány vlivem Pauliho vylučovacího principu. Tato odpudivá síla se dále zvětšuje se snižující se vzdáleností hrotu a povrchu vzorku [5]. Celkovou interakci můžeme vyjádřit součtem těchto sil a dostáváme

$$F(r) = -\frac{6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}}, \quad (1.1)$$

kde A a B jsou empiricky určené konstanty [6]. Tato závislost je graficky zobrazena na obr. 1.2.



Obrázek 1.2: Silové působení v závislosti na vzdálenosti hrotu od vzorku a rozdělení režimů AFM.

1.2 Režimy měření

Pro AFM existují tři primární režimy měření podle oblastí působících sil. Tyto oblasti jsou znázorněny na obr 1.2.

Kontaktní režim

V kontaktním režimu se pracuje převážně v oblasti odpudivých sil, kdy je hrot odpuzován od povrchu vzorku silou řádově 10^{-7} N. Nevýhodou tohoto způsobu měření

je rychlé opotřebení hrotu a s tím související možnost kontaminace vzorku. Proto je toto měření lepší pro zkoumání tvrdých povrchů s tuhostí meziatomárních vazeb výrazně převyšující tuhost raménka. Tento režim můžeme dále rozdělit na mód konstantní výšky a konstantní síly. V prvním zmíněném je nastavena vzdálenost mezi hrotem a rovinou povrchu vzorku, která se po zbytek měření nemění. Zaznamenávána je tedy pouze změna síly působící na hrot. Při měření módem konstantní síly na hrot působí síla, která je udržována konstantní po celou dobu měření. Je tedy udržováno stále stejné prohnutí raménka a zaznamenává se pouze výchylka skeneru. Tato výchylka vypovídá o topografii povrchu vzorku a dají se měřit i další povrchové charakteristiky. Spojením výše zmíněných módů se používá také, tzv. kombinovaný mód. V tomto módu jsou dány meze působící síly mezi hrotem a povrchem. Při překročení těchto mezí dojde k úpravě vzdálenosti mezi povrchem a hrotem tak, aby působící síla byla opět ve stanovených mezích. Výsledkem je větší rozsah než v módu konstantní výšky a zároveň rychlejší měření oproti módu konstantní síly [7].

Bezkontaktní režim

U Bezkontaktního režimu nedochází k dotyku hrotu a povrchu vzorku, ale hrot osciluje v oblasti van der Waalových sil nad vzorkem (v řádu 10^{-12} N). Výhodou oproti kontaktnímu režimu je delší životnost hrotu a snížená pravděpodobnost kontaminace povrchu vzorku. Proto je tato metoda vhodná k měření měkkých a organických vzorků. Mezi nevýhody patří horší rozlišení a nutnost použití raménka s nižší tuhostí, kvůli slabším silovým působením.

Pokleповý režim

Tento režim kombinuje vlastnosti kontaktního a bezkontaktního režimu. Raménko je nad vzorkem rozkmitáváno tak, aby se při dosáhnutí nejnižšího bodu výchylky dostal do kontaktu s povrchem vzorku. Sonda tak během oscilací přechází mezi oblastmi odpuzivých a přitažlivých sil. Je tak dosaženo vysokého rozlišení v kombinaci s vyšší životností hrotu a sníženým rizikem poškození vzorku.

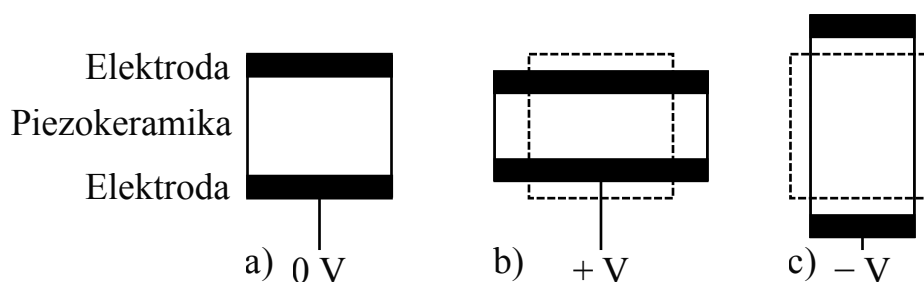
2. Skenery

V mikroskopech SPM jsou k přesnému polohování vzorku vzhledem k hrotu používány skenery, které nejčastěji využívají piezoelektrických vlastností. Konstrukce skenerů se s časem vyvíjely a existují různé základní typy. Tyto konstrukce mají různé parametry, od kterých se odvíjí možnosti měření.

2.1 Piezoelektrické vlastnosti

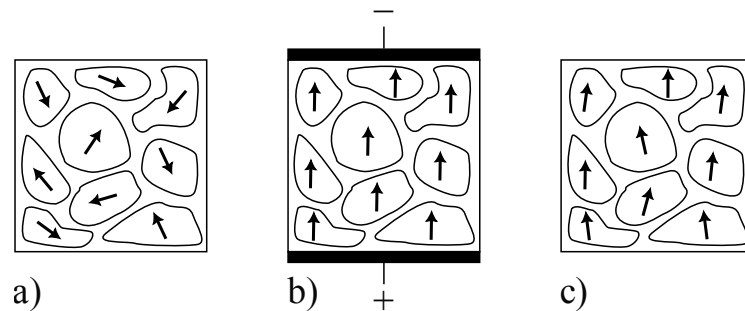
Piezoelektrický jev způsobuje generování elektrického napětí, pokud je materiál silově deformován. Roku 1880 ho poprvé pozorovali bratři Jacques a Pierre Curie na krystalu turmalínu [8]. Tento jev byl pojmenován přímý piezoelektrický jev (obrázek 2.1b). K němu inverzní opačný piezoelektrický jev byl nejprve předpověděn prostřednictvím termodynamických zákonů a následně experimentálně ověřen (obrázek 2.1c) [8]. Právě tohoto jevu využívají skenery k pohybu. Souhrnně materiály s piezoelektrickými vlastnostmi nazýváme piezokeramiky [9].

U krystalů vyskytujících se v přírodě je míra piezoelektrických vlastností poměrně malá. Proto se piezokeramiky používané ve skenerech většinou vyrábějí uměle. K výrobě piezokeramik se používají směsi oxidu, olova, titanu, nebo zirkonu. Ze směsi je poté vyformován požadovaný tvar, který je vytvrzen. V této chvíli se ještě jedná o izotropní polykrytal a natočení jednotlivých dipólů je obecně libovolné, materiál tedy nevykazuje (či vykazuje pouze slabě) piezoelektrické vlastnosti (obrázek 2.2a). Pro polarizaci materiálu se používá polarizační pec, která materiál vystaví silnému elektrickému poli. Současným zahřátím na Curieho teplotu se dipóly nastaví ve směru vnějšího elektrického pole (obrázek 2.2b). Po zchlazení za stálé přítomnosti elektrického pole si jednotlivé dipóly svoji orientaci částečně zachovávají orientaci a výsledný materiál vykazuje piezoelektrické vlastnosti (obrázek 2.2c). Výsledné chování piezokeramiky je ovlivněno směrem polarizace při jejím vytváření. Napětí stejné polarity jako



Obrázek 2.1: Schematické znázornění a) piezokeramiky, b) přímého elektrického jevu a c) opačného piezoelektrického jevu.

při výrobě bude generovat, pokud je stlačena. Naopak roztažení způsobí generování napětí opačné polarity. U opačného piezoelektrického jevu to platí obdobně [10].



Obrázek 2.2: Orientace dipólů v polykrytalickém materiálu a) před zpolarizováním, b) při polarizaci přiložením stejnosměrného elektrického napětí, c) po zpolarizování.

Hlavními výhodami použití piezokeramik pro přesný pohyb skenerů je tedy možnost tvarování a snadná polarizace. Mezi nevýhody naopak patří prodleva mezi skokovou změnou napětí a odezvou piezokeramiky. Dále vyskytující se hystereze, která způsobuje obecně jiné chování při zvyšování a snižování napětí na piezokeramice. K nevýhodám patří také to, že relativní prodloužení piezokeramiky není přímo úměrné budícímu napětí [11].

2.2 Parametry

Použitelnost skeneru při měření udávají jeho základní parametry. Mezi ty nejvíce ovlivňující měření patří počet os pohybu, rozsah pohybu, rozlišení a rezonanční frekvence. Protože je skener s ostatními zařízeními součástí mikroskopu, je důležité také znát jeho rozměry a rozsah potřebného elektrického napětí.

2.2.1 Rezonanční frekvence

Mechanické kmitání

Kmitání patří k nejrozšířenějším jevům v přírodě i ve strojírenství a je jedním ze základních typů pohybu. Při mechanickém kmitání jde zejména o periodický pohyb těles a jejich částí. Základní zařízení, které kmitá volně bez vnějšího působení se nazývá mechanický oscilátor. Jeho kmitavý pohyb je zpravidla založen na působení tíhové či pružné síly, příkladem může být kyvadlo či závaží na zavěšené pružině. Výchylka y mechanického oscilátoru se s časem periodicky mění. Pokud je závislá na čase podle funkce sinus, hovoříme o harmonických kmitech. Největší okamžitá výchylka se označuje jako amplituda výchylky. Jako jeden kmit označujeme projití tělesa celou dráhou a vrácení zpět do původní polohy při stejné orientaci pohybu. Nejkratší doba, za kterou se celý tento pohyb opět periodicky opakuje se nazývá perioda T . Veličinou udávající počet opakování periodického děje je frekvence f , jejíž jednotkou je Hertz (Hz) a je definována vztahem

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.1)$$

Na těleso mechanického oscilátoru působí proměnlivá síla stále směřující do jeho rovnovážné polohy. Tuto sílu lze vyjádřit jako

$$F = -ky, \quad (2.2)$$

kde k je tuhost tělesa. Závisí na materiálu tělesa a jeho geometrických vlastnostech. A při pružné deformaci udává míru změny jeho délky vzhledem k velikosti působící síly. Pružnou deformaci u materiálu popisuje Hookův zákon v tahu a tlaku, který lze vyjádřit ve tvaru

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.3)$$

kde ϵ je poměrná deformace, σ je mechanické napětí a E Youngův modul [12].

Rezonance

Z důvodů působení sil v samotném oscilátoru či při styku s prostředím se amplituda reálného oscilátoru vždy postupně zmenšuje a kmitání postupně zaniká. Takovýto jev se nazývá tlumené kmitání. Aby bylo kmitání udrženo je potřeba zvnějšku dodávat energii, tímto docílíme nuceného kmitání. Pro dosažení netlumeného harmonického kmitání oscilátoru je tedy potřeba vnější harmonické síly. Stav, při němž amplituda nucených kmitů oscilátoru dosahuje působením vnější síly maximální hodnoty se nazývá rezonance oscilátoru. Při rezonanci dochází k největšímu přenosu mechanické energie na oscilátor, a proto lze i relativně malou vnější silou vyvolat velké amplitudy. To má dopad i v praxi, kdy se velké stavby a stroje konstruují tak, aby se rezonanční frekvence jejich částí lišily a tím nedocházelo k rozkmitávání velkých celků. Nežádoucím kmitům se dá částečně zabránit pomocí změny konstrukce nebo tlumiči kmitů [13].

Rychlost skenování

Rychlost skenování je jiná pro různé režimy měření a odvíjí se od mnoha faktorů. Závisí na vlastnostech katileveru, skeneru a ovládací elektroniky [14]. Co se týče skeneru, je rychlost skenování po ose ovlivňována především jeho nejnižší rezonanční frekvencí v dané ose. Pro trubkový skener je rychlost udávána jako přibližně setina jeho rezonanční frekvence, pro skener ohybový je to desetina [15, 16]. Je nutné rozlišovat pohyby v osách x , y a z . Vzhledem k tomu, že pohyby všech os jsou u moderních skenerů nezávislé, je snaha dosáhnout co největší rychlosti pohybu v ose z . To je dáno charakteristikou měření a neustálým pohybem vzorku v této ose. Na rychlost pohybu v osách x a y proto nejsou kladeny takové nároky a jejich rezonanční frekvence může být nižší.

2.2.2 Rozsah pohybu

Rozsah pohybu udává maximální oblast, ve které je mikroskop schopný rastrovat. Je zpravidla jiný v osách x, y a v ose z . V ose z se jedná pouze o pohyb v rámci členitosti vzorku, zatímco ve zbylých záleží na oblasti rastrování, které chceme dosáhnout. Rozsah pohybuje je ve skenerech ovlivňován zejména použitím pákových systémů a rozměrem piezokeramik, který ovlivňuje jejich maximální protažení.

2.3 Typy skenerů

Tripod

Jako první byl pro SPM použit skener typu tripod. Představili ho roku 1982 vědci G. Binning a H. Rohrer [17]. Je založen na principu jednoduchého uložení navzájem ortogonálních piezokeramik (obrázek 2.3a). Vzorek je umístěn na roh tripodu, ve kterém se všechny piezokeramiky spojují. Rozsah pohybu je ovlivněn pouze rozsahem piezokeramik. Pro dosažení dostatečného rozsahu je tedy nutné použít velké piezokeramiky a celý skener je pak velmi rozměrný. Z tohoto důvodu se v moderních přístrojích téměř nevyužívá.

Trubkový skener

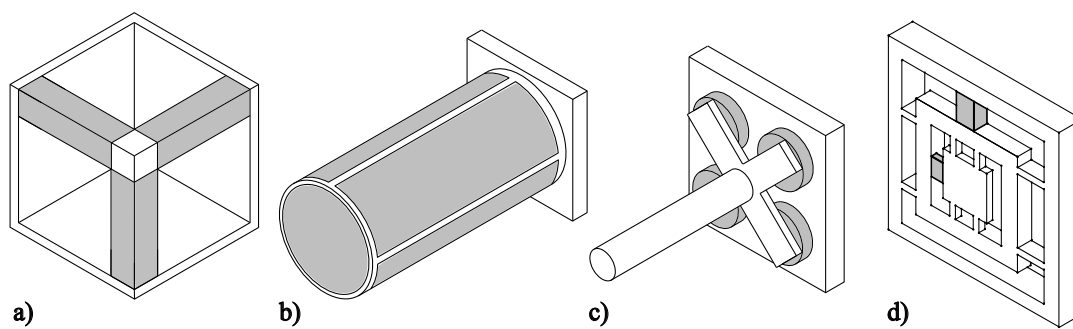
Dalším typem skeneru je trubkový skener. Navrhnutý byl původně pro řádkovací tunelovací mikroskop (STM) a představil ho opět G. Binning společně s D. P.E. Smithem roku 1986 [18]. Oválná konstrukce skeneru je tvořena piezokeramikou, která je z vnitřní i vnější strany opatřena elektrodami (obrázek 2.3b). Vnitřní elektroda bývá jednodílná, naopak vnější je zpravidla složena ze čtyř částí. Přivedením napětí na všechny elektrody zároveň dojde k protažení v ose z . Při přiložení napětí na vnitřní a jednu vnější elektrodu se některé části smršťují a jiné protahují. Tímto docílíme ohybu oválné konstrukce a pohybu skeneru v ose x a y . Pokud chceme docílit pohybu v ose x , nebo y , nelze se vyhnout pohybu v ose z . Nevýhodou je tedy závislost os pohybu skeneru a jeho menší rozsahy. K výhodám patří jednoduchá konstrukce a s tím související vysoká tuhost, která umožňuje vyšší rastrovací rychlosti [19].

Pákový skener

Pákový skener vznikl roku 1997 jako levnější a jednodušší varianta trubkového skeneru [20]. Zakládá se na použití čtyř konvenčních piezokeramik, které jsou položeny vedle sebe. Tyto piezokeramiky jsou dále spojeny ploškou, na kterou je umístěna další část, na kterou se umísťuje vzorek (obrázek 2.3c). Pohyb je uskutečňován přivedením opačné fáze napětí na proti ležící piezokeramiky, což má za následek naklonění skeneru. Nevýhodou je tedy obdobně jako u trubkového skeneru vzájemné ovlivňování os.

Ohybový skener

Do skupiny ohybových skenerů lze dnes označit velké množství skenerů s různými konstrukcemi. Jejich společnou vlastností je vzájemné neovlivňování os pohybu a jejich oddělení. Navíc mají větší rozsah pohybu pomocí využití různých pákových systémů (obrázek 2.3d). Hlavní výhodou by tedy měla být kombinace velkého rozsahu pohybu skeneru a jeho vysoká tuhost. K dosažení těchto parametrů je z pravidla nutná poměrně složitá konstrukce.



Obrázek 2.3: Základní typy skenerů: a) tripod, b) trubkový, c) pákový, d) ohybový.
 Převzato a upraveno z [21].

3. Návrh skeneru

Tato bakalářská práce obsahuje chronologický popis vývoje návrhu nové konstrukce skeneru využívajícího piezokeramiky. Vývoj byl rozdělen na dvě části, návrh pro osy x , y a návrh pro osu z , tyto dvě části byly později spojeny. Všechny modely a simulace byly prováděny v programech Inventor a Ansys.

Většina komerčně dostupných ohybových skenerů má velký rozsah pohybu (až do 100 μm), ale nízkou rezonanční frekvenci (většinou okolo 400 Hz) [22]. Vysokofrekvenční skenery se naopak vyznačují velmi malým rozsahem pohybu, který často v rámci zachování vysoké rezonanční frekvence ani nezvyšují pomocí pákových systémů.

Nově navržená konstrukce skeneru má kombinovat vysokou rezonanční frekvenci a velký rozsah pohybu. Bylo nutné dodržet základní konstrukční rozměry, které zaručují kompatibilitu s SPM mikroskopem LiteScopeTM firmy NenoVision s.r.o pro nějž byl skener navržen [23]. Maximální rozměry skenery tedy mohou být 4 centimetry v osách x , y a 2,5 centimetru v ose z . Jako základní materiál pro výpočty byl zvolen titan pro svoji vysokou pevnost, tuhost a odolnost vůči korozi.

3.1 Modelování a simulace

Simulační modely jsou nástrojem, jenž poskytuje výhodnou alternativu ke klasickému postupu výroby fyzických prototypů či měření fyzikálních veličin. Umožňují dělat jednoduché a rychlé analýzy vhodné k optimalizaci parametrů strojní součásti či odstranění možných nežádoucích jevů. Technický pokrok vyžaduje neustálé inovace i v oblasti modelování dynamických soustav. Vznikají tak nové požadavky na komplexnější a integrovanější software schopný simulovat složitější konstrukce a stroje.

3.1.1 Modální analýza

Při návrhu konstrukce je snaha zjistit modální vlastnosti navrhovaného objektu a dále s nimi pracovat. Modální analýzu lze provádět experimentálně na existujícím objektu anebo teoreticky pomocí softwaru. Při analýze je snaha popsat odezvu a vlastnosti soustavy po použití známého buzení. Podstatou je dále rozložení dynamického chování objektu na jednotlivé nezávislé pohyby, které se nazývají vibrační módy. Každý mód lze popsat pomocí několika parametrů mezi které patří vlastní frekvence a tvar kmitu [24].

3.1.2 Metoda konečných prvků

Jednou z numerických metod hojně využívaných ve strojírenství je metoda konečných prvků (MKP) využívaná pro různé fyzikální úlohy. V této práci se jedná o pevnostní a deformační analýzy těles, jež mají příliš složitou geometrii pro klasický analytický výpočet.

Metoda je založena na řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic. Těleso je rozděleno na konečný počet podoblastí jednoduchého tvaru, např. krychle nebo čtyřstěny. Tímto vznikne numerická oblast (tzv. síť) pro řešení s konečným počtem bodů. Vzhledem k jednoduché geometrii podoblastí lze jejich fyzikální chování vypočítat pomocí známých postupů. Spojením fyzikálního chování všech podoblastí sítě je možné získat model fyzikálního chování celého tělesa [25].

3.1.3 Software pro mechanické simulace

Simulační software je základním prvkem ve vývoji strojních součástí. Pomocí různých matematických metod se snaží přiblížit chování mechanické součásti či soustavy. Lze v něm vytvářet a upravovat nejrůznější modely a dále vyhodnocovat jejich výsledky. V této bakalářské práci budou využívány konkrétně dva softwary, Ansys Mechanical a Autodesk Inventor. Důvodem je jejich rozšířenost na trhu a v akademickém prostředí. V dalších podkapitolách budou oba softwary podrobněji popsány, a to jak z hlediska funkce, tak i využití.

Autodesk Inventor

Autodesk Inventor je jedním z mnoha programů od společnosti Autodesk. Program slouží převážně pro strojírenské navrhování 3D digitálních prototypů, z nichž lze dále v tomtéž programu vytvořit výkresovou dokumentaci. Základem je vždy 3D součást, která je odvozena z 2D náčrtu. Hodnoty veličin můžeme zadávat přímo či parametricky. Vytvořené součásti lze poté kombinovat a spojovat do sestav. Inventor dále disponuje funkcí pevnostní analýza, která se dále dělí na statickou a modální analýzu. V nich lze při znalosti pevných vazeb, sil působících na těleso a materiál simulovat posunutí v osách, napětí v tělese, modální frekvence a jiné. V této bakalářské práci je program využíván především pro modelování a modální analýzu, tedy zjištění modálních frekvencí pro různé osy [26].

Ansys

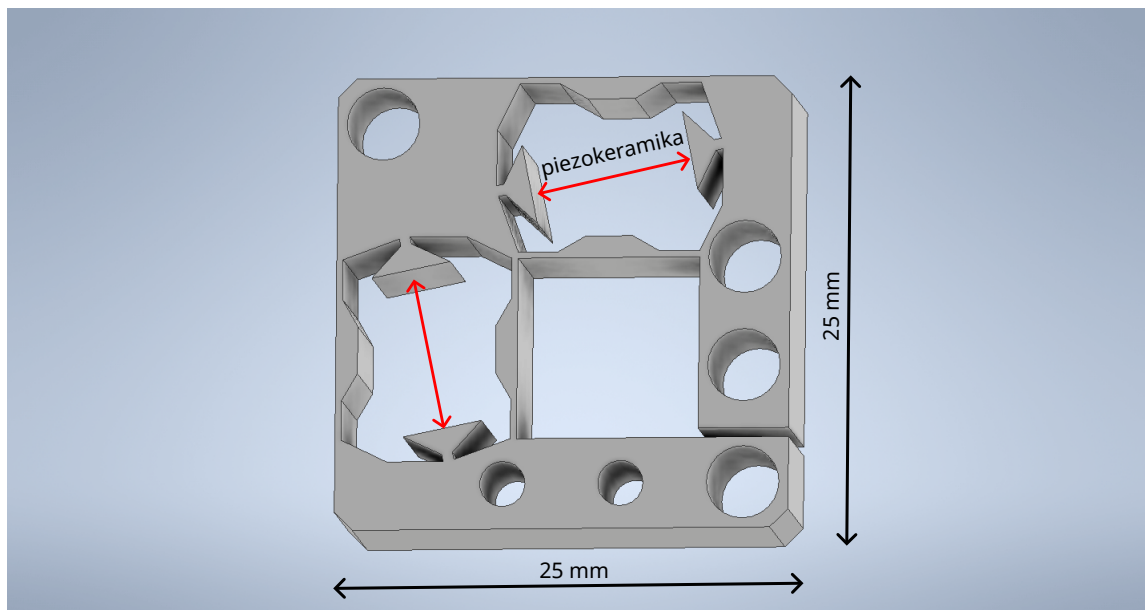
Ansys (Analysis System) je softwarová sada, jež pokrývá celou škálu fyzikálních oborů a poskytuje přístup prakticky ke všem oblastem inženýrských simulací potřebných k procesu návrhu. Užívá se například v oblastech statické a modální analýzy, elektromagnetismu, optiky, vedení tepla a mechaniky tekutin.

Z hlediska pevnostních výpočtů strojních součástí je nejpodstatnější *Ansys Mechanical* používaný strukturální analýze. Pomocí metody konečných prvků umí řešit jak lineární, tak i nelineární úlohy včetně dynamické analýzy. Je k dispozici široká škála knihoven s vlastnostmi materiálů a řešení rovnic pro různé strojírenské problémy. Umožňuje tak řešit úlohy pomocí komplexních modelů a brát v úvahu vlivy více veličin. V této bakalářské práci je Ansys Mechanical využíván především pro statickou

mechanickou analýzu. A to zejména kvůli možnosti zadávat přemístění bodu a toho simulovat deformaci skeneru. Touto funkcí Inventor nedisponuje, v něm lze zadávat pouze síly působící na bod. Můžeme tedy zjistit posun různých částí skeneru v závislosti na protažení piezokeramiky [27].

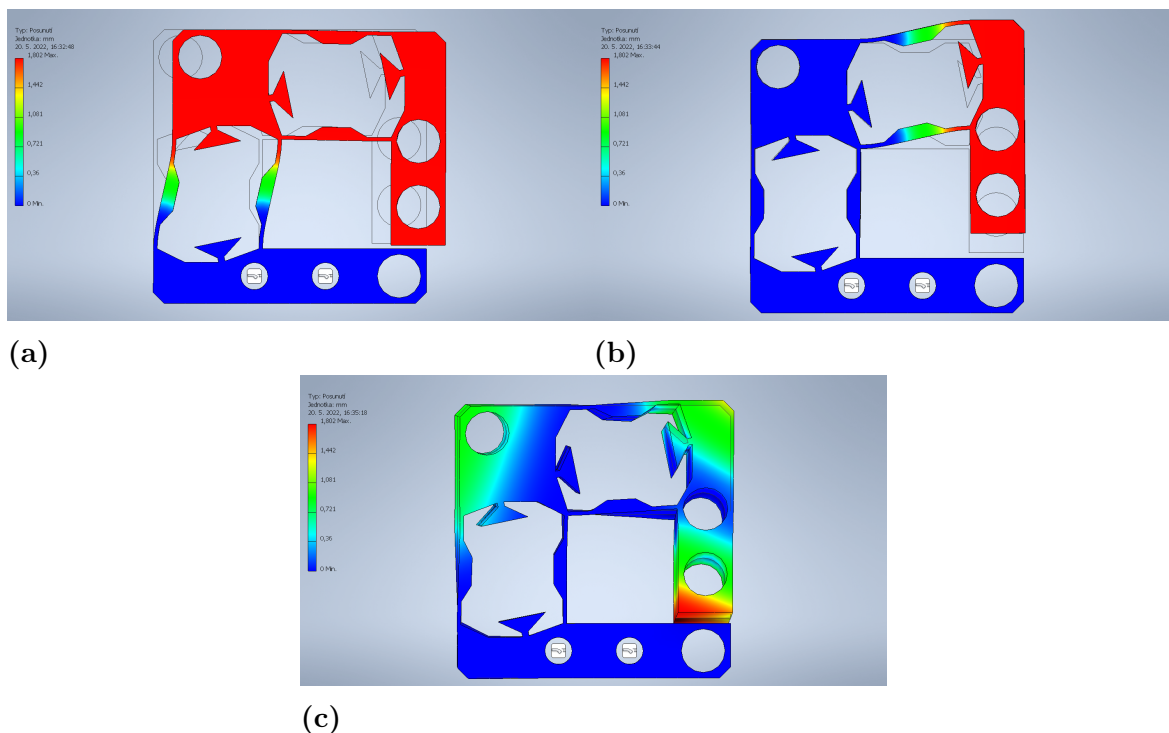
3.2 Mechanická simulace skeneru PXY 38

Mechanická simulace existujícího skeneru byla provedena z důvodu ověření si možnosti správného použití programů pro potřeby modelování a simulací. Výsledkem mechanické simulace modelu byly parametry rozsah pohybu a rezonanční frekvence. Tyto výsledné parametry jsou porovnávány s parametry uváděnými výrobcem. Pro mechanickou simulaci byl vybrán skener PXY 38 společnosti PiezoSystem Jena GmbH [28]. Nejdříve byl v programu Inventor vytvořen přesný model tohoto skeneru v programu Inventor (obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Model skeneru PXY 38

Dalším krokem bylo zjištění jeho rezonančních frekvencí pomocí modální analýzy (obrázek 3.2). Ta byla provedena opět v programu Inventor s použitím pevné vazby v místě přichycení skeneru k mikroskopu.



Obrázek 3.2: Výsledky modální analýzy: a) mód v ose x , b) mód v ose y , c) mód s namáháním krutem.

Rozsah pohybu je zjišťován pomocí statické analýzy. Ta nemohla být provedena v programu Inventor z důvodu možnosti zadávání deformace modelu pouze pomocí síly. Byl tedy využit program Ansys, kde je možnost zadávat deformaci pomocí posunutí stěny modelu, které simuluje největší protažení piezokeramiky (obrázek 3.3).

Výsledné parametry byly vyneseny do tabulky 3.1 a porovnány s parametry výrobce.

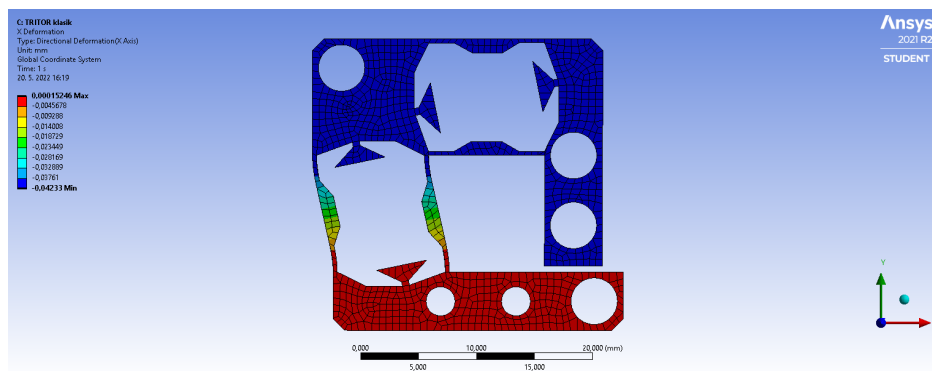
Tabulka 3.1: Porovnání parametrů modelu s parametry udávanými výrobcem.

	rozsah [um]		frekvence [Hz]	
	X	Y	X	Y
PXY 38	38.0	38.0	730	1090
model	36.2	35.5	697	1044

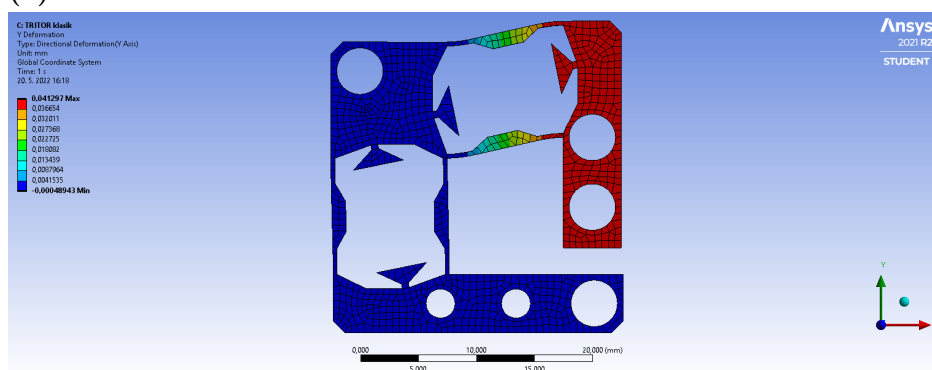
Parametry modelu jsou velmi blízké udávaným parametrům výrobce. Odchyly mohou být způsobeny malými nepřesnostmi v modelu, nebo nemožností znalosti přesného složení materiálu. Celkově tyto mechanické simulace splňují účely této bakalářské práce, a proto je možné je využít v dalším navrhování.

3.3 Návrh konstrukce pro osy x a y

Při návrhu skeneru byla práce rozdělena na část zabývající se osami x , y a zvlášť část zabývající se osou z . Rezonanční frekvence v osách x , y totiž ovlivňuje výslednou rychlost skeneru minimálně oproti rezonanční frekvenci v ose z . Při návrhu pro osy x , y



(a)



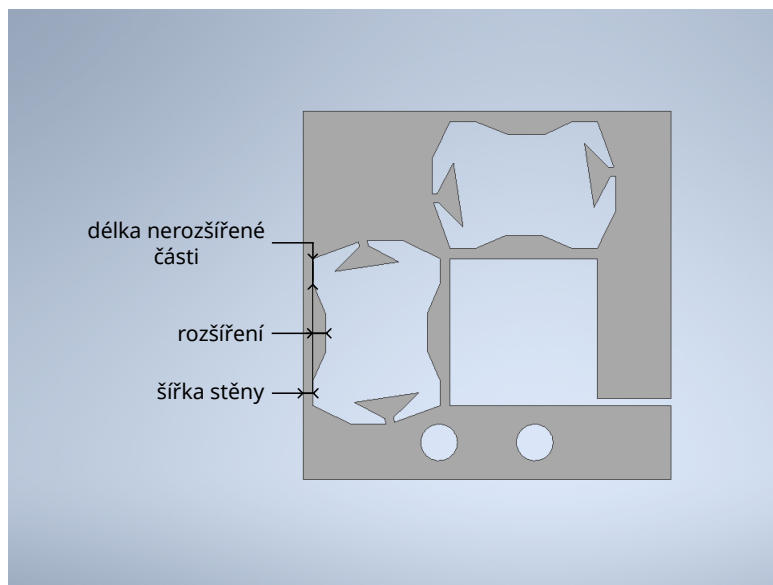
(b)

Obrázek 3.3: Výsledky statické analýzy určující rozsah pohybu v ose a) x , b) y .

je kladen větší důraz na rozsah pohybu, a tedy celkovou oblast rastrování. Proto byla jako základ návrhu konstrukce skeneru pro osy x , y vybrána konstrukce skeneru PXY 38. Zejména z důvodu kombinace poměrně velkého rozsahu pohybu i frekvence. Snahou je dále nalézt prvky konstrukce skeneru, které nejvíce ovlivňují výsledné parametry skeneru a pomocí jejich úprav tyto parametry zlepšit.

V modelu byla původní konstrukce zjednodušena o prvky zajišťující montáž skeneru ke zbytku přístroje. Ponechány byly pouze díry zaručující připevnění skeneru k podložce. Poté byly zkoumány vlivy jednotlivých konstrukčních prvků na rozsah pohybu a rezonanční frekvence. Z konstrukčních prvků se jako nejlepší nástroj pro zvyšování rezonanční frekvence ukázaly šířka stěny, její rozšíření, délka nerozšířené části a výška modelu (obrázek 3.4). Pro jednodušší změny těchto prvků a postupnou optimalizaci návrhu byl v programu Inventor vytvořen parametrický model konstrukce skeneru.

Nejprve byla zjišťována závislost rozsahu pohybu a rezonanční frekvence na šířce stěny. Zjištěné hodnoty byly vyneseny do tabulky 3.2.



Obrázek 3.4: Zjednodušený model skeneru pro osy x , y s vyznačenými důležitými konstrukčními prvky.

Tabulka 3.2: Rozsah pohybu a rezonanční frekvence pro různé osy při změnách šířky stěny.

šířka stěny [mm]	rozsah [μm]		frekvence [Hz]		
	X	Y	X	Y	Z
0.34	42.5	41.8	588	823	1234
0.56	42.7	41.2	1019	1441	1813
1.04	-	21.4	2004	2895	2260

Z výše uvedené tabulky lze vyčíst, že při rozšiřování stěny dochází k rapidnímu zvyšování rezonanční frekvence, ale u větších hodnot i k velkému omezení rozsahu. Šířka stěny byla postupně nastavována tak, aby byla zjištěna hodnota, při které dosáhneme rezonanční frekvence v ose x 1 kHz a 2 kHz. Pro dosažení rezonanční frekvence 2 kHz už je třeba taková šířka stěny, že při protažení piezokeramiky se konstrukce deformuje nahodile. Souvislý pohyb pouze v jedné ose by byl tedy nemožný a skener by nemohl být použit.

Vzhledem k maximálním možným rozměrům pro použití v mikroskopu LiteScope může být celý model zvětšen pro dosažení většího rozsahu pohybu. Je ovšem nutné brát v potaz velikosti vyráběných piezokeramik. Nejvhodnější pro tento model byla vybrána piezokeramika o délce 10,5 mm s maximálním protažením o 11,2 μm od firmy Thorlabs [29]. Celý model byl tedy v měřítku poměru délek piezokeramik zvětšen a opět byla zjišťována závislost rozsahu pohybu a rezonanční frekvence na šířce stěny. Vše bylo vyneseno do tabulky 3.3.

V rámci snahy udržet rezonanční frekvenci v ose x nad 1 kHz byla vybrána šířka stěny 0,8 mm, která má stále poměrně velký rozsah pohybu. Bylo také zjištěno, že při větší šířce stěny se celá konstrukce naklání a nezávislost os pohybu tak není stoprocentní (obrázek 3.5). Dalším krokem bylo zjištění závislosti rozsahu pohybu a rezonanční frekvence na výšce modelu zobrazené v tabulce 3.4.

Tabulka 3.3: Rozsah pohybu a rezonanční frekvence pro různé osy při změnách šířky stěny zvětšeného modelu.

šířka stěny [mm]	rozsah [μm]		frekvence [Hz]		
	X	Y	X	Y	Z
0.4	53.0	52.1	528	745	1221
0.5	53.9	52.6	657	930	1316
0.6	53.8	52.3	804	1117	1397
0.7	52.1	50.5	961	1342	1469
0.8	49.0	47.4	1118	1563	1543
0.9	44.5	43.6	1268	1789	1604
1.0	38.7	38.6	1422	2009	1673

Tabulka 3.4: Rozsah pohybu a rezonanční frekvence modelu pro různé osy při změnách výšky modelu.

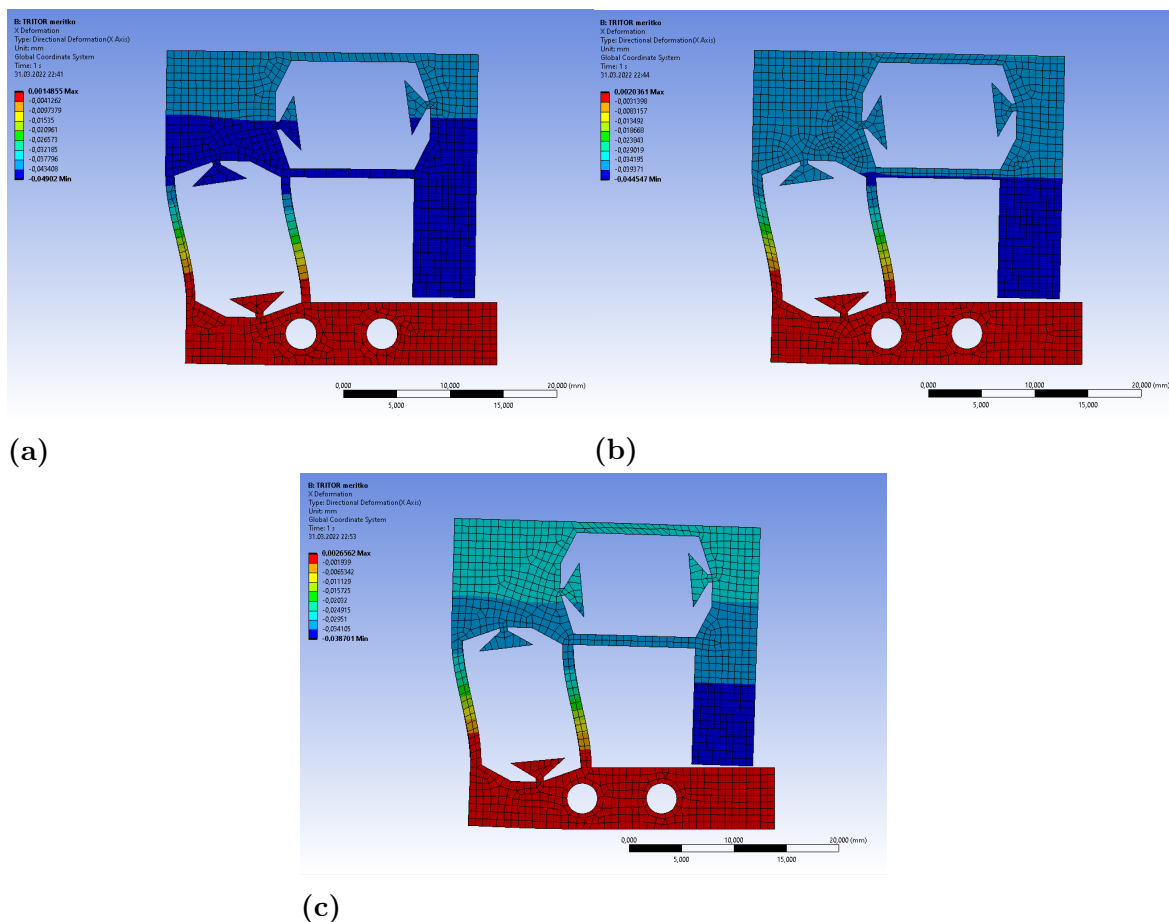
výška [mm]	šířka stěny [mm]	rozsah [μm]		frekvence [Hz]		
		X	Y	X	Y	Z
5.0	0.8	49.1	47.6	1106	1556	1248
7.5	0.8	48.8	47.4	1117	1563	1601
9.0	0.8	48.8	47.4	1116	1572	1753
10.0	0.8	48.8	47.4	1122	1574	1844
12.5	0.8	48.8	47.4	1124	1580	2020
15.0	0.8	48.8	47.4	1127	1582	2148

Ukázalo se, že výška modelu téměř nemá vliv na rozsah pohybu. Pouze nepatrně zvyšuje rezonanční frekvence v osách x , y , ale poměrně výrazně v ose z . Vzhledem k parametrům a snaze o menší rozměry (kvůli budoucímu připojení modelu skeneru pro osu z) byla vybrána výška modelu 9 mm. V následujícím kroku je snaha získat ideální délku nerozšířené části stěny a poté i velikost daného rozšíření (tabulka 3.5).

Tabulka 3.5: Rozsah pohybu a rezonanční frekvence pro různé osy při změnách délky nerozšířené části a rozšíření stěny.

výška [mm]	šířka s. [mm]	rozšíření [mm]	nerozšířená část [mm]	rozsah [μm]		frekvence [Hz]		
				X	Y	X	Y	Z
9	0.8	1.0	0.5	43.7	42.5	1338	1913	1847
9	0.8	1.0	1.0	45.4	44.2	1310	1856	1836
9	0.8	1.0	1.5	46.7	45.3	1238	1771	1814
9	0.8	1.0	2.0	47.5	46.2	1188	1694	1814
9	0.8	1.0	2.5	48.4	46.7	1157	1655	1801
9	0.8	0.5	2.0	48.1	46.7	1169	1658	1785
9	0.8	1.0	2.0	47.5	46.2	1188	1694	1814
9	0.8	1.5	2.0	47.1	45.7	1198	1717	1847
9	0.8	2.0	2.0	47.0	45.6	1188	1721	1882

Lze vidět, že rozšíření stěny neovlivňuje parametry modelu nikterak výrazně. Je pouze potřeba zvolit rozšíření tak, aby při pohybu nekolidovalo s prostorem pro ulo-

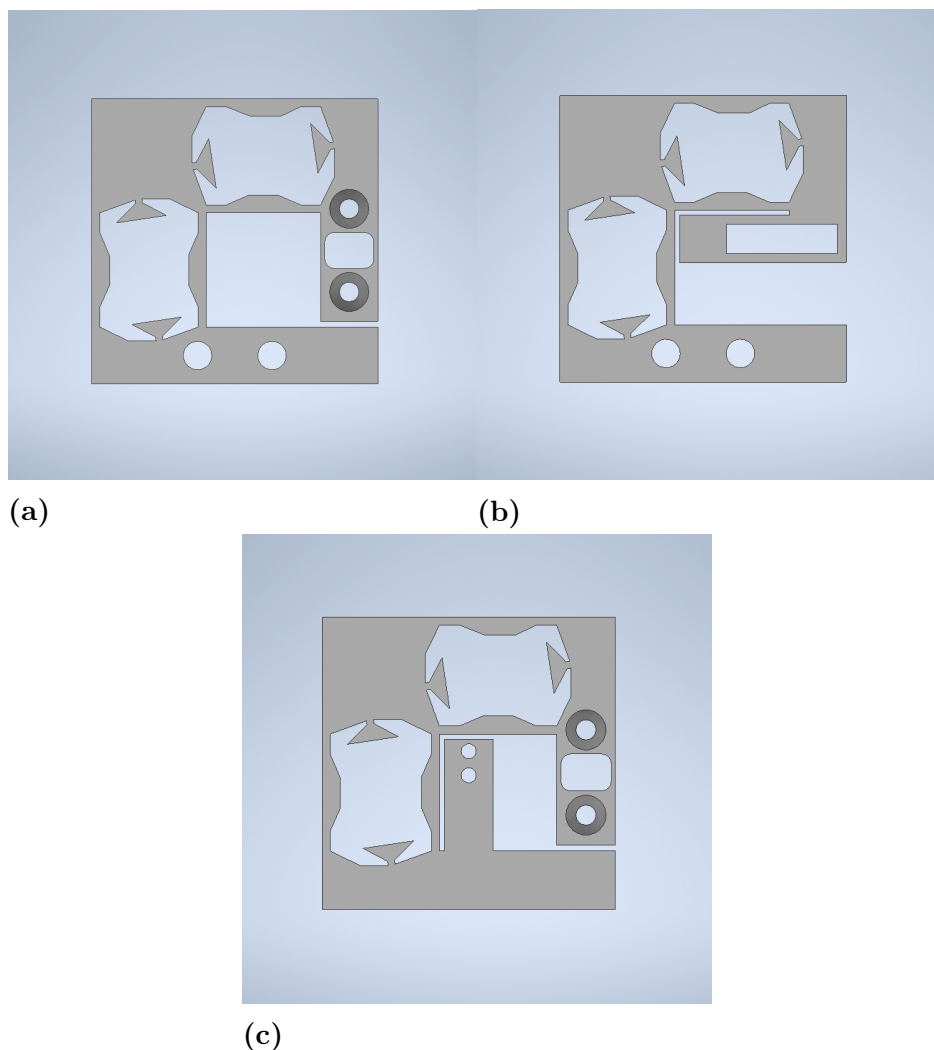


Obrázek 3.5: Pohyb skeneru v ose x při tloušťce stěny a) 0,8 mm, b) 0,9 mm, c) 1,0 mm.

žení piezokeramiky. O něco větší vliv lze vidět u délky úzké části, která ovšem při malých hodnotách opět ovlivňuje nezávislost pohybu os. Z tohoto důvodu byla délka nerozšířené části vybrána 2 mm a rozšíření stěny 1 mm.

Výsledný model konstrukce skeneru po úpravě výše zmíněných konstrukčních prvků má rozsah pohybu 47,5 μm v ose x a 46,2 μm v ose y . Rezananční frekvence je 1188 Hz pro osu x a 1694 Hz pro osu y . Další úpravy byly provedeny pro různé možnosti napojení modelu osy z . Jedná se o celkem tři možnosti. Model pro osu z se může vyskytovat pod, nebo nad modelem os x , y , ale v obou případech bude připojen ve středu modelu (obrázek 3.6c, 3.6b). Dále je možné napojení pomocí ramene na kraji modelu x , y (obrázek 3.6a).

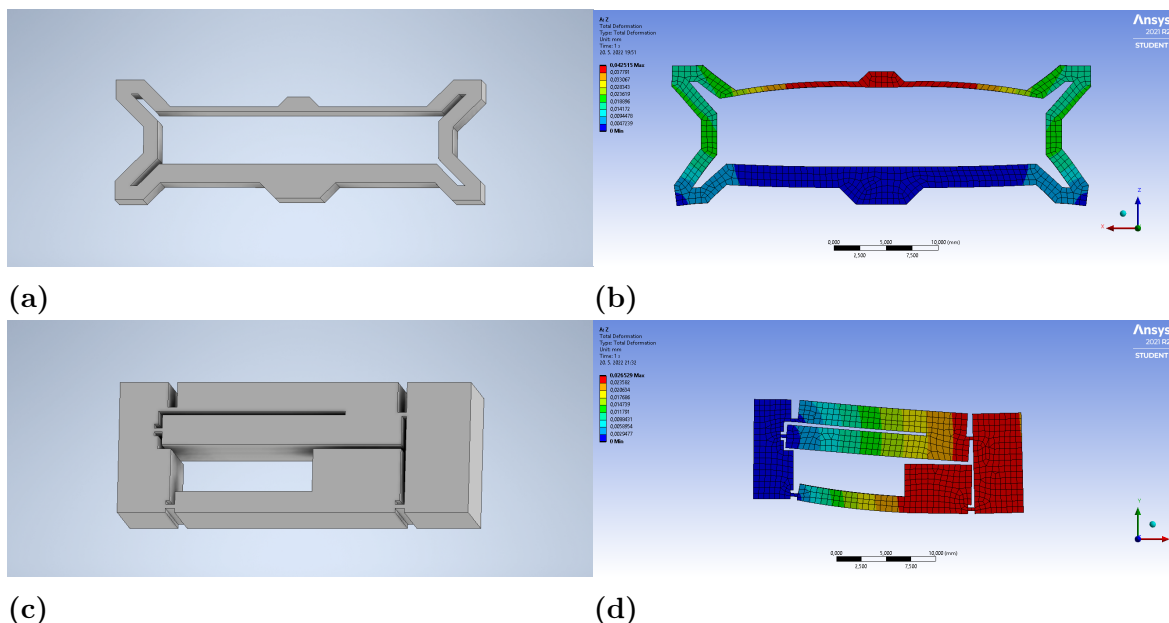
U možnosti připevnění zdola bylo zjištěno, že připevnění na středu je nevhodné. Toto připevnění by při prodloužení piezokeramik způsobovalo náklon celé konstrukce, a proto nebude dále využíváno. Úpravy nijak neovlivnily rozsah pohybu a pouze nepatrně rezonanční frekvence. Model s připevněním na kraji má rezonanční frekvenci 1246 Hz v ose x a 1916 Hz v ose y . Pro připevnění na středu shora 1211 Hz v ose x a 1811 Hz v ose y .



Obrázek 3.6: Úpravy modelu pro připevnění modelu osy z a) na kraji, b) shora uprostřed, c) zdola uprostřed.

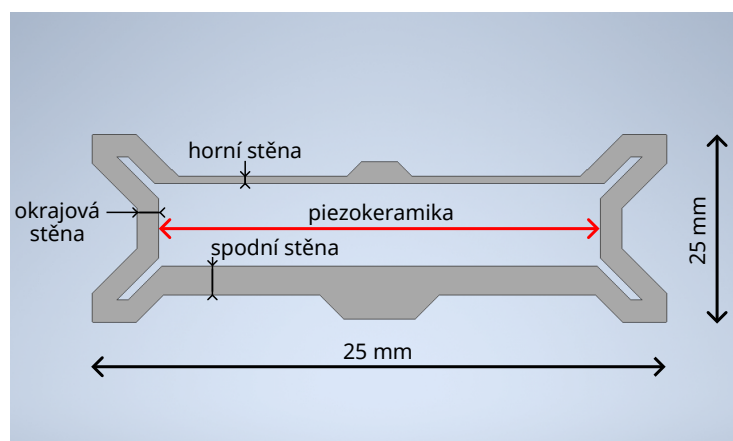
3.4 Návrh konstrukce pro osu z

Konstrukce skeneru pro osu z musí být kvůli omezení prostorem v mikroskopu velmi nízká, maximálně 1,5 mm. Pro dosažení co největšího rozsahu pohybu v ose z je snaha vytvořit návrh konstrukce s upevněním piezokeramiky tak, aby se protahovala v ose x , nebo y . Tímto je možné dosáhnout většího prostoru pro piezokeramiku, tedy větší roztažení a celkový rozsah pohybu. Dále pomocí pákových systémů tento pohyb přenést do osy z . Připevnění modelu může být uprostřed, nebo nakraji. Z toho vychází dva možné modely, které lze vidět na obrázku 3.7. Je také naznačen pohyb těchto modelů.



Obrázek 3.7: Modely skeneru pro osu z s připevněním a) uprostřed, c) na kraji. Pohyb při protažení piezokeramiky skeneru s připevněním b) uprostřed, d) na kraji.

Po mechanických simulacích na těchto modelech byla zvolena konstrukce s upevněním na středě pro její větší rezonanční frekvenci, rozsah pohybu i možnosti použít delší piezokeramiku. Jako nejdelší možná byla zvolena piezokeramika od firmy Thorlabs s délkou 31 mm a maximálním prodloužením 30 μm [29]. Tímto a výškovým omezením byl dán základ modelu konstrukce pro osu z . Hlavními konstrukčními prvky tohoto modelu jsou šířky obvodových stěn, horní stěny a dolní stěny (obrázek 3.8). Tyto prvky jsou dále upravovány s cílem dosáhnout co nejvyšší rezonanční frekvence. Pro rychlejší úpravu byl opět vytvořen parametrický model konstrukce s možností jednodušších změn daných prvků. Výsledky mechanických simulací jsou vyneseny v tabulce 3.6.



Obrázek 3.8: Model skeneru pro osu z s vyznačenými důležitými konstrukčními prvky.

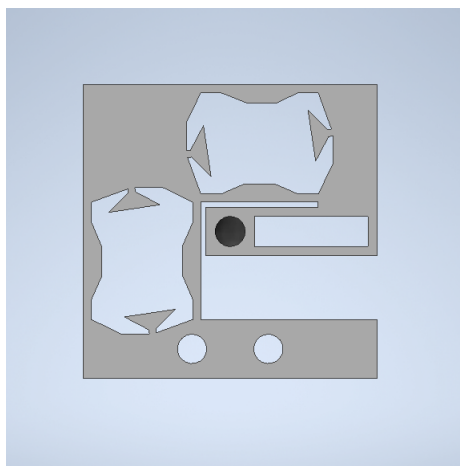
Vzhledem ke snaze o dosažení co nejlepší rezonanční frekvence byla vybrána finální konstrukce se šířkou obvodových stěn 1,5 mm, šířkou horní stěny 0,5 mm a šířkou dolní stěny 2 mm. Výsledný rozsah pohybu je 42,5 μm a rezonanční frekvence 3094 Hz.

Tabulka 3.6: Rozsah pohybu a rezonanční frekvence modelu pro osu z při změnách šířky okrajových stěn a spodní a horní stěny.

okrajové stěny [mm]	spodní s. [mm]	horní s. [mm]	rozsah [μm]	frekvence [Hz]
1.0	1.0	1.0	59.9	1679
1.0	1.0	1.5	49.6	1588
1.0	1.0	0.5	67.3	1812
1.0	1.5	0.5	55.5	2117
1.0	2.0	0.5	48.8	2213
1.0	2.5	0.5	45.7	2257
0.5	2.0	0.5	32.5	1444
1.5	2.0	0.5	42.5	3094

Návrh s využitím piezokeramiky bez pákového systému

Pro nejvyšší možnou rezonanční frekvenci je možné konstrukci pro osu z maximálně zjednodušit, a to vytvořením konstrukce pro tuto osu pouze z piezokeramiky. Pro tento účel je upravena konstrukce os x , y s vytvořeným zapuštěním pro piezokeramiku (obrázek 3.9). K dosažení většího rozsahu pohybu je použita nejdelší možná piezokeramika s délkou 23 mm a protažením 25,2 μm od firmy Thorlabs. Udávaná rezonanční frekvence piezokeramiky je 55 kHz [29].

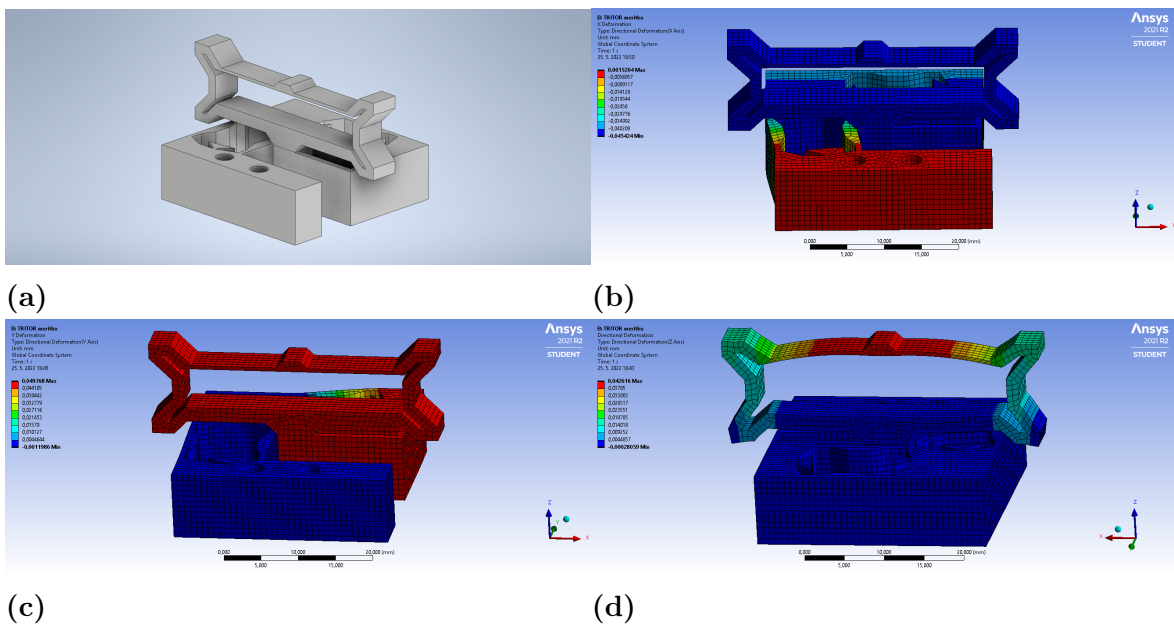


Obrázek 3.9: Model skeneru pro osu z s úpravou pro zapuštění piezokeramiky.

3.5 Výsledná konstrukce

Výsledný návrh konstrukce skeneru je složen z konstrukcí pro osy x , y a osu z . Jejich spojení jen nepatrně ovlivní rozsahy pohybu v jednotlivých osách a zůstanou tedy téměř stejné jako u původních modelů. Vzhledem k celkové větší hmotnosti budou ovlivněny rezonanční frekvence a to zejména v ose z .

Výsledné parametry konstrukce skeneru jsou rozsah pohybu 45,4 μm pro osu x , 49,8 μm pro osu y , 42,6 μm pro osu z a rezonanční frekvence 1040 Hz pro osu x , 1154 Hz pro osu y a 1500 Hz pro osu z (obrázek 3.10).



Obrázek 3.10: Výsledná konstrukce skeneru: a) model, b) deformace v ose x , c) deformace v ose y , d) deformace v ose z .

Závěr

Tato bakalářská práce se věnovala problematice skenerů používaných v technikách mikroskopie rastrovací sondou (*Scanning Probe Microscopy*, SPM), kde jsou nezbytným pohybovým prvkem a realizují jemné pohyby během měření vzorků. Dále se práce zabývala návrhem konstrukce skeneru s vysokou rezonanční frekvencí.

Úvodní částí práce se věnují fyzikálnímu popisu mikroskopie atomárních sil (*Atomic Force Microscopy*, AFM), představení skeneru a popisu jeho vlastností a parametrů. Součástí jsou typy existujících skenerů a vlastnosti piezoelektrických materiálů.

Další část popisuje postupný vývoj návrhu nové konstrukce skeneru s vyšší rezonanční frekvencí, která musí dodržet předem stanovené vnější konstrukční rozměry. Nejprve byla ověřena možnost získání základních parametrů konstrukce skeneru jako rezonanční frekvence a rozsah pohybu v programech Inventor a Ansys. K tomuto účelu byl vytvořen model konstrukce skeneru PXY 38 společnosti PiezoSystem Jena GmbH. Výsledné parametry modelu odpovídají parametrům udávaným výrobcem. Další fází bylo navržení části konstrukce skeneru pro osy x a y . Jako základ byla použita konstrukce výše zmíněného skeneru PXY 38, u které byla zkoumána závislost parametrů na změnách hlavních konstrukčních prvků. Výsledkem bylo upravení daných konstrukčních prvků a následné navýšení rozsahu pohybu i rezonančních frekvencí. Cílem návrhu části konstrukce skeneru pro osu z bylo dosažení co největší rezonanční frekvence. Opět byla zkoumána závislost parametrů na změnách hlavních konstrukčních prvků následovaná úpravou konstrukce.

Po spojení obou částí má výsledný návrh konstrukce skeneru rozsah pohybu 45,4 μm pro osu x , 49,8 μm pro osu y , 42,6 μm pro osu z a rezonanční frekvence 1040 Hz pro osu x , 1154 Hz pro osu y a 1500 Hz pro osu z . Konstrukce skeneru tedy kombinuje poměrně velký rozsah pohybu s vysokou rezonanční frekvencí nad 1000 Hz v každé ose.

Navázáním na tuto práci lze pokračovat ve vývoji skeneru, zabývat se jeho odměřováním a ovládáním pomocí přiloženého elektrického napětí až po následnou výrobu a implementaci do mikroskopu SPM.

Seznam použité literatury

- [1] MEYER, E.; BENNEWITZ, R.; HUG, Hans J. *Scanning Probe Microscopy*. Springer International Publishing, 2021. ISBN 978-3-030-37088-6. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-030-37089-3.
- [2] MEYER, E. Atomic force microscopy. *Progress in Surface Science*. 1992, roč. 41, s. 3–49. ISSN 0079-6816. Dostupné z DOI: 10.1016/0079-6816(92)90009-7.
- [3] GIESSIBL, F. J. Advances in atomic force microscopy. *Reviews of Modern Physics*. 2003, roč. 75, s. 949–983. ISSN 0034-6861. Dostupné z DOI: 10.1103/RevModPhys.75.949.
- [4] HUTTER, J. L. Measurement and manipulation of van der Waals forces in atomic-force microscopy. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 1994, roč. 12, s. 2251. ISSN 0734211X. Dostupné z DOI: 10.1116/1.587752.
- [5] HUGEL, T.; SEITZ, M. The Study of Molecular Interactions by AFM Force Spectroscopy. *Macromolecular Rapid Communications*. 2001, roč. 22, s. 989–1016. ISSN 1022-1336. Dostupné z DOI: 10.1002/1521-3927(20010901)22:13<989::AID-MARC989>3.0.CO;2-D.
- [6] CAPPELLA, B.; DIETLER, G. Force-distance curves by atomic force microscopy. *Surface Science Reports*. 1999, roč. 34, s. 1–104. ISSN 0167-5729. Dostupné z DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00003-5.
- [7] MARTIN, Y.; WILLIAMS, C. C.; WICKRAMASINGHE, H. K. Atomic force microscope–force mapping and profiling on a sub 100-Å scale. *Journal of Applied Physics*. 1987, roč. 61, s. 4723–4729. ISSN 0021-8979. Dostupné z DOI: 10.1063/1.338807.
- [8] KATZIR, S. *The discovery of the piezoelectric effect*. Springer Netherlands, [b.r.]. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-4020-4670-4_2.
- [9] GERHARD, R. *Piezoelectricity and Electrostriction*. Springer International Publishing, 2016. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-31530-0_21.
- [10] YANG, J. *An Introduction to the Theory of Piezoelectricity*. Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-030-03136-7. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-030-03137-4.
- [11] SCHITTER, G. et al. Design and Modeling of a High-Speed AFM-Scanner. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2007, roč. 15, s. 906–915. ISSN 1063-6536. Dostupné z DOI: 10.1109/TCST.2007.902953.
- [12] HARTOG, D.; PIETER, J. *Mechanical vibrations*. Courier Corporation, 1985.

- [13] REICHL, J.; VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online] [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/164-rezonance-mechanickeho-oscilatoru>.
- [14] SHIMIZU, M. et al. An ultrafast piezoelectric Z-scanner with a resonance frequency above 1.1 MHz for high-speed atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*. 2022, roč. 93, s. 013701. ISSN 0034-6748. Dostupné z DOI: 10.1063/5.0072722.
- [15] RANA, Md. S.; POTA, H. R.; PETERSEN, I. R. A Survey of Methods Used to Control Piezoelectric Tube Scanners in High-Speed AFM Imaging. *Asian Journal of Control*. 2018, roč. 20, s. 1379–1399. ISSN 15618625. Dostupné z DOI: 10.1002/asjc.1728.
- [16] *How fast can I scan with your stage?* [Online] [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://npoint.com/how-fast-can-i-scan-with-your-stage/>.
- [17] BINNIG, G. et al. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical review letters*. 1982, roč. 49, č. 1, s. 57.
- [18] BINNIG, G.; SMITH, D. P. E. Single-tube three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy. *Review of Scientific Instruments*. 1986, roč. 57, s. 1688–1689. ISSN 0034-6748. Dostupné z DOI: 10.1063/1.1139196.
- [19] MOHEIMANI, S. O. R. Invited Review Article: Accurate and fast nanopositioning with piezoelectric tube scanners: Emerging trends and future challenges. *Review of Scientific Instruments*. 2008, roč. 79, s. 071101. ISSN 0034-6748. Dostupné z DOI: 10.1063/1.2957649.
- [20] MARIANI, T; FREDIANI, C; ASCOLI, C. Non-conventional, inexpensive 3-D scanners for probe microscopy. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 1998, roč. 66, č. 7.
- [21] PAVERA, M. *Konstrukce nízkoteplotních ultravakuových rastrovacích sondových mikroskopů*. Brno, 2015. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [22] YONG, Y. K.; APHALE, S. S.; MOHEIMANI, S. R. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2008, roč. 8, č. 1, s. 46–54.
- [23] *LitescopeTM* [online] [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.nenovision.com/product-materials/product-lists/>.
- [24] FU, Z.; HE, J. *Modal analysis*. Elsevier, 2001.
- [25] BATHE, K. Finite element method. *Wiley encyclopedia of computer science and engineering*. 2007, s. 1–12.
- [26] *Inventor: Výkonný software pro navrhování těch nejambicióznějších strojírenských nápadů* [online] [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [27] *Ansys, Inc.: Engineering Simulation Products* [online] [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products>.
- [28] *Piezo stage series PXY 38* [online] [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.piezosystem.com/products/piezo_actuators/xy_nanopositioner/pxy_38/.

- [29] *Piezoelectric Stacks* [online] [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8040.