Technická univerzita v Liberci
Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická

Dizertační práce

Piezoelektrické aktuátory se zesíleným posunutím

Piezoelectric actuators with amplified displacement

Piezoelektrische Aktoren mit verstärkten Verlagerung

Dizertační práce

k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

Autor:	Ing. Luboš Rusin
Školitel:	Doc. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
Školící pracoviště:	Katedra fyziky, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická Technická univerzita v Liberci Studentská 2, 461 17 Liberec 1
Název studijního programu:	Aplikované vědy v inženýrství, P 3901
Název studijního oboru:	Fyzikální inženýrství, 3901V012
Rozsah disertační práce:	139 stran 109 obrázků 17 tabulek 19 vzorců
Místo a rok obhajoby:	Liberec 2010

V Liberci dne 10.2. 2010
....
Místo a datum

....
Podpis autora

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou dizertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé dizertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li dizertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Dizertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím dizertační práce.

V Liberci dne 10.2. 2010 ....
Místo a datum Ing. Luboš Rusin

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval a vyslovil uznání všem, kteří mi pomáhali při vzniku této práce. Především vedoucímu dizertační práce Doc. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D. za užitečné připomínky, vstřícnou pomoc při řešení vědeckých problémů a vytvoření optimálních podmínek pro mou experimentální i teoretickou práci. Dále bych rád poděkoval kolegům Doc. Ing. Pavlu Rydlovi, Ph.D. za vytvoření budícího obvodu a technikovi Miroslavu Lustikovi za dílenské zpracování. Za finanční podporu děkuji firmě Rieter CZ s.r.o. a v neposlení řadě i Fakultě přírodovědně-humanitní a pedagogické.

Abstrakt

Piezoelektrické aktuátory se zesíleným posunutím

Práce pojednává o frekvenčně zesílených piezoelektrických aktuátorech - motorech. V rešeršní části jsou piezoelektrické aktuátory rozděleny do několika kategorií, jak podle funkce tak podle použitého principu. U motorků se využívá vybuzení postupné nebo stojaté elastické vlny piezoelektrickými elementy umístěnými na kovové části statoru a následného přenesení generovaných výchylek pomocí třecích sil na rotor. Motorky byly jednak vytvořeny pro lineární posun na kterých byly změřeny výchylky a tvary výsledných elastických vln včetně závislostí elektrického buzení na rychlosti rotoru a mechanickém zatížení. U motorků rotačních byla taktéž změřena závislost rychlosti otáčení a velikosti kroutících momentů na způsobu buzení. Z naměřených dat a jejich následného vyhodnocení tak lze určit optimální konfiguraci pro dané konkrétní použití motorků těchto zkoumaných principů.

Klíčová slova: Piezoelektrický ultrazvukový motor, Stojaté vlnění, Postupné vlnění, Lineární aktuátor, Rotační aktuátor

Abstract

Piezoelectric actuators with amplified displacement

The work deals with frequency-amplified piezoelectric actuators – motor. The literature review section divides piezoelectric actuators into several categories both by function and operating principle. The motors use excitation of a travelling or standing elastic wave by means of piezoelectric elements situated on the metal part of the stator, and the subsequent transfer of the generated displacement to the rotor via friction forces. Some of the motors have been made for linear travel: the displacement and shapes of the resulting elastic waves have been measured, including the dependencies of the electrical excitation on the rotor speed and mechanical load. In addition, the dependency of the rotation speed and torque on the method of excitation has been measured in the rotary motors. The optimum or the most convenient configuration for a given specific application of motors operating using the studied principles can thus be determined from the measured data and their interpretation.

Keywords: Piezoelectric ultrasonic motor, Standing wave, Travelling wave, Linear actuator, Rotational actuator

Zusammenfassung

Piezoelektrische Aktoren mit verstärkten Verlagerung

Die Arbeit behandelt die durch die Frequenz verstärkten piezoelektrischen Aktuatoren - Motoren. Im Recherchenteil sind die piezoelektrischen Aktuatore in mehrere Kategorien, sowohl nach der Funktion, als auch nach dem benutzten Prinzip aufgeteilt. Bei den Motoren wird die Erregung der fortschreitenden oder stehenden elastischen Welle mit den auf dem metallischen Statorteil eingebauten Elementen und die nachfolgende Übertragung der generierten Ausschlägen mittels der Reibungskräfte auf den Rotor genutzt. Die Motoren wurden für die lineare Bewegung gebaut. Auf den Motoren sind die Ausschläge und Formen der elastischen Ergebniswellen inklusive Abhängigkeit der elektrischen Erregung von der Rotorgeschwindigkeit und mechanischen Belastung gemessen worden. Bei den Rotationsmotoren wurde auch die Abhängigkeit der Drehgeschwindigkeit und Drehmomentgröße von der Erregungsart gemessen. Aus den gemessenen Daten und deren folgenden Auswertung kann die optimale oder die beste Konfiguration für die gegebene konkrete Anwendung von Motoren nach diesen untersuchten Prinzipien ermittelt werden.

Schlüsselwörter: Piezoelektrische Ultraschall Motor, Stehende Welle, Fortschreitende Welle, Linear Aktoren, Rotierende Aktoren

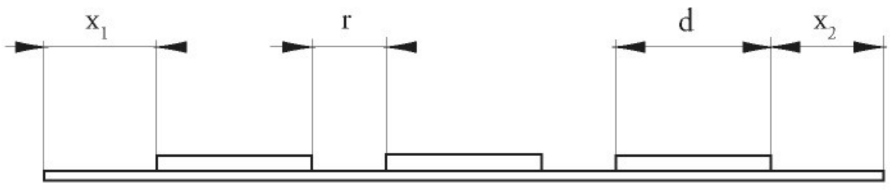
Příloha A

Výchylky na povrchu statorů

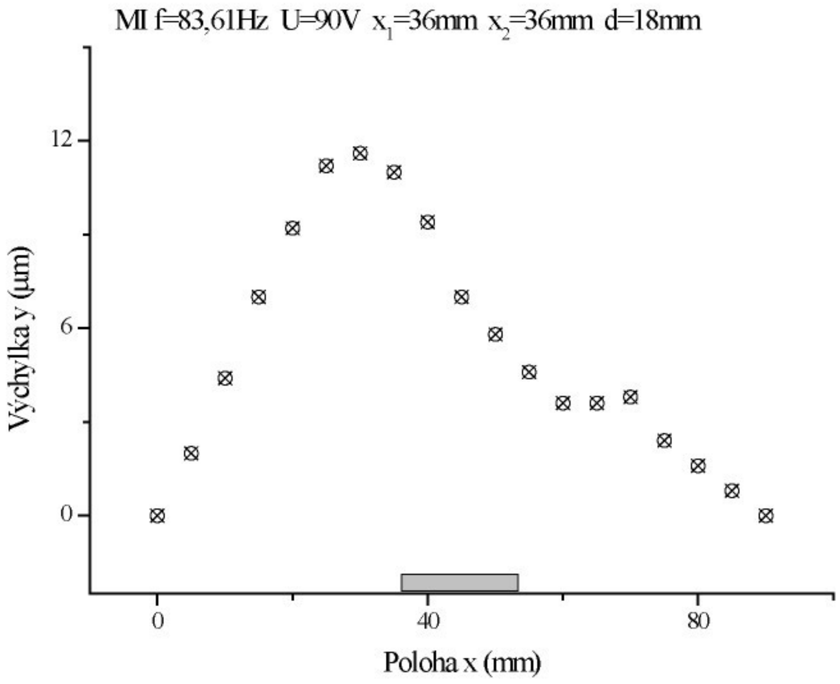
MI - 1 element, (14x7x1)mm
MII - 1 element, (18x13x0,25)mm
MIIx - 2 elementy (17x3,5x1)mm
MIIIA - 3 elementy, (17x3,5x1)mm
MVI - 4 elementy, (17x3,5x1)mm
MV - 3x2 elementy, (17x3,5x1)mm, uspořádané paralelně
MVI - 4 elementy, (17x3,5x1)mm, těsné uspořádání
MVII - 3 elementy, (17x3,5x1)mm, pro potlačení vibrací

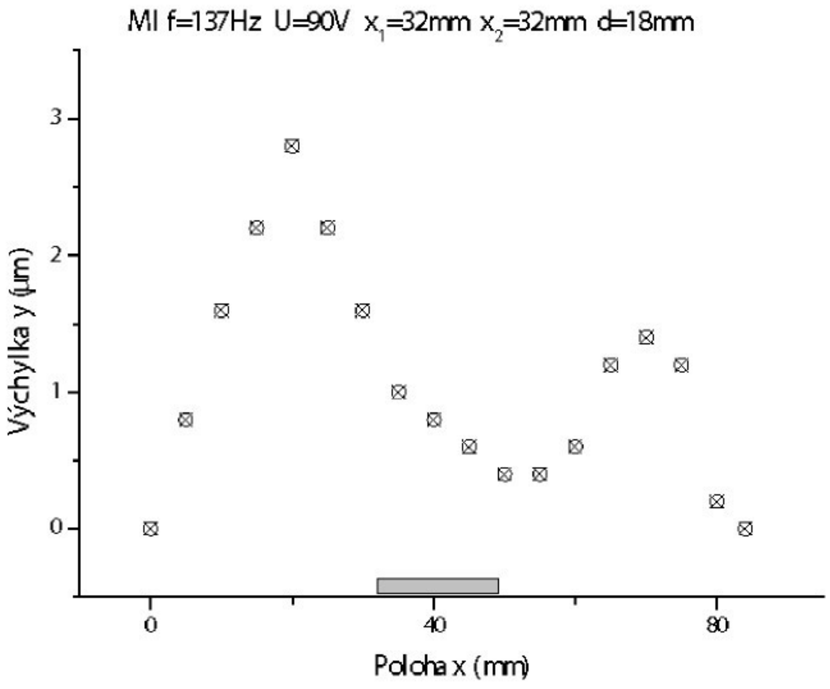
Označení grafů: T, f, U, r, d, x_1, x_2

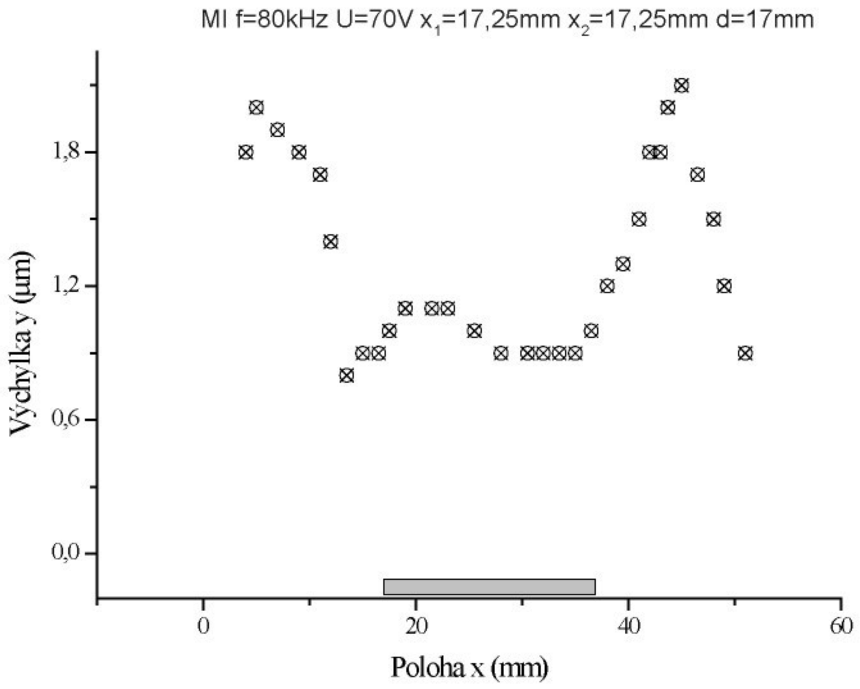
T - Označení motorku, f - Frekvence budícího napětí, U - Amplituda budícího napětí, r - Rozestup jednotlivých PZT elementů, d - Délka PZT elementů, x_1 - Vzdálenost prvního elementu od levého konce statoru, x_2 - Vzdálenost posledního elementu od pravého konce statoru

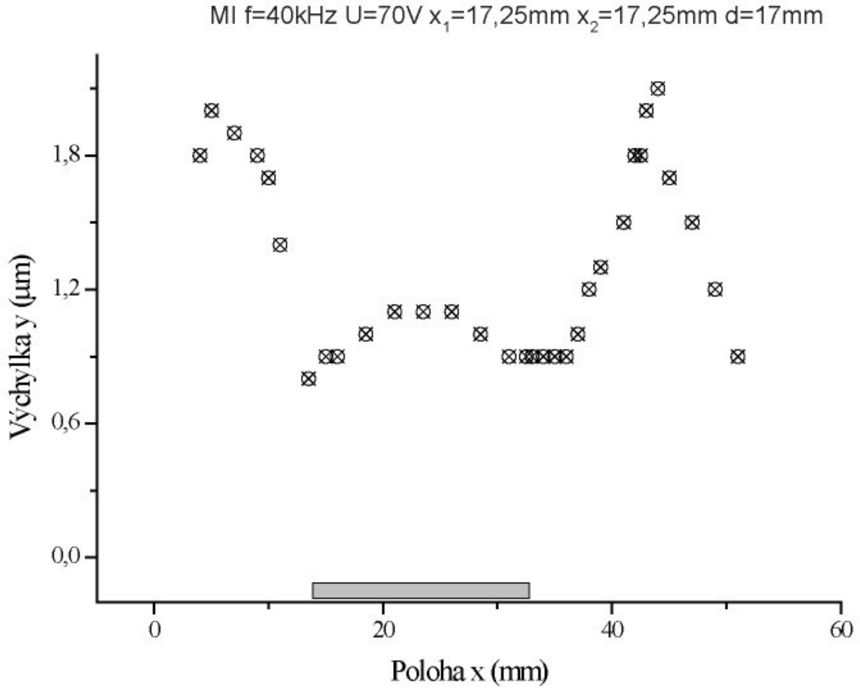


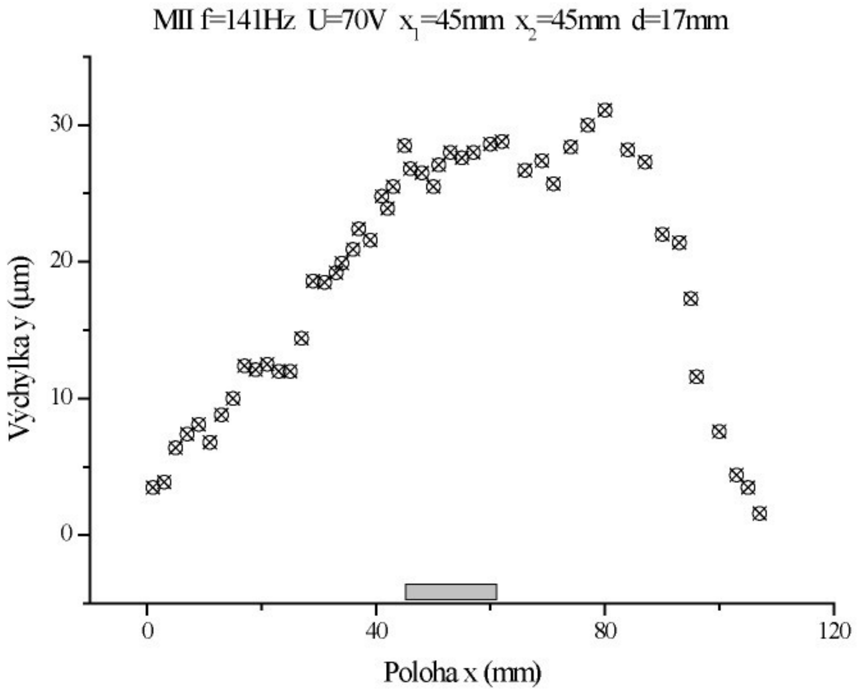
Jedno-segmentové statory



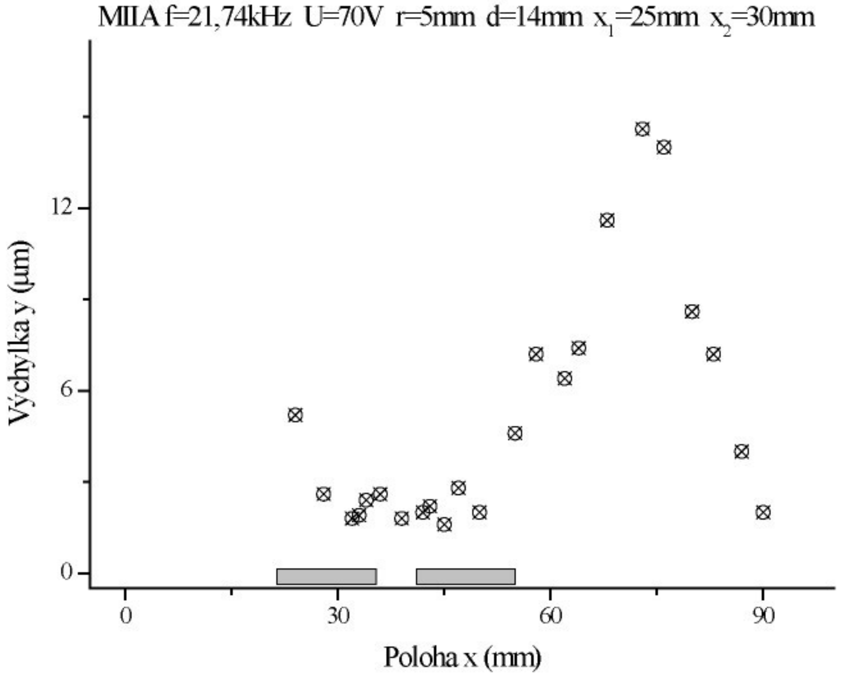


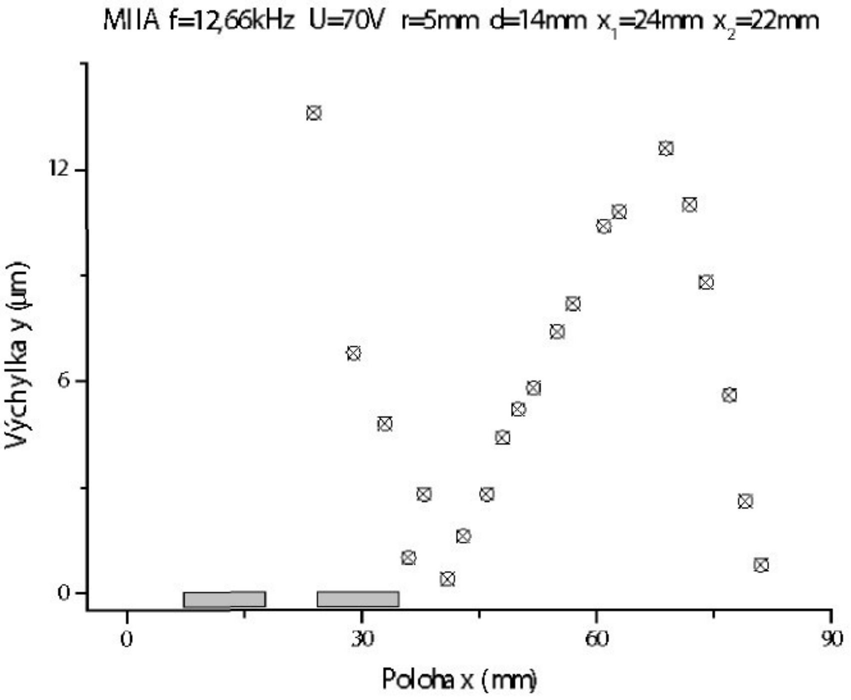

MI f=80kHz U=70V x1=17,25mm x2=17,25mm d=17mm
Výchylka y (µm)
1,8
1,2
0,6
0,0
0
20
40
60
Poloha x (mm)

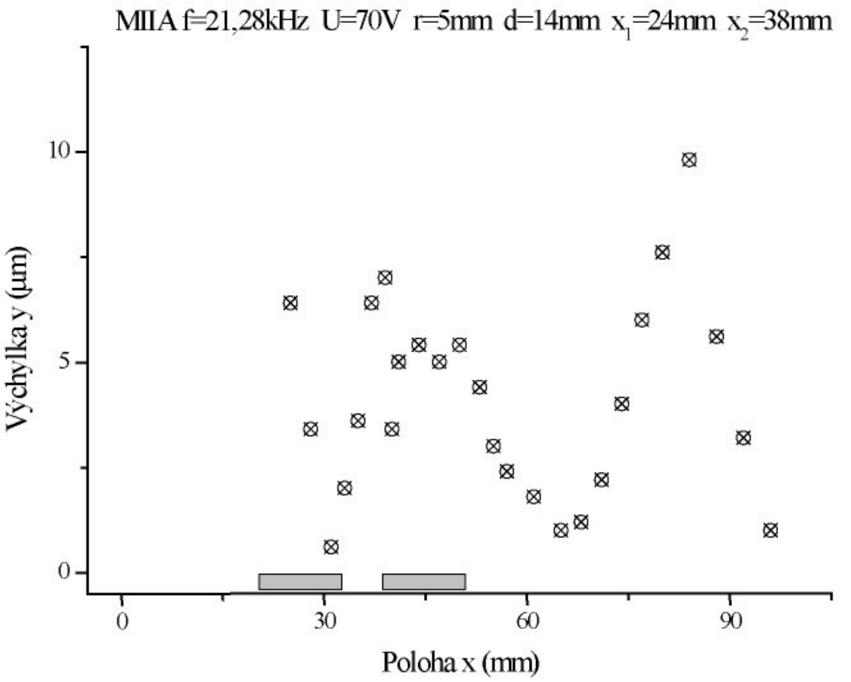

MI f=40kHz U=70V x1=17,25mm x2=17,25mm d=17mm
Výchylka y (µm)
1,8
1,2
0,6
0,0
0
20
40
60
Poloha x (mm)

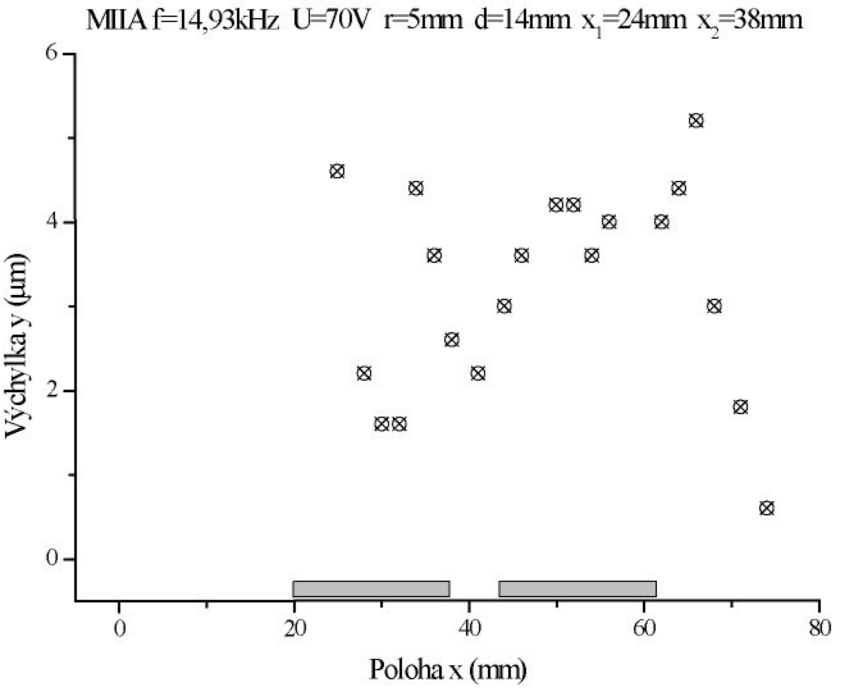


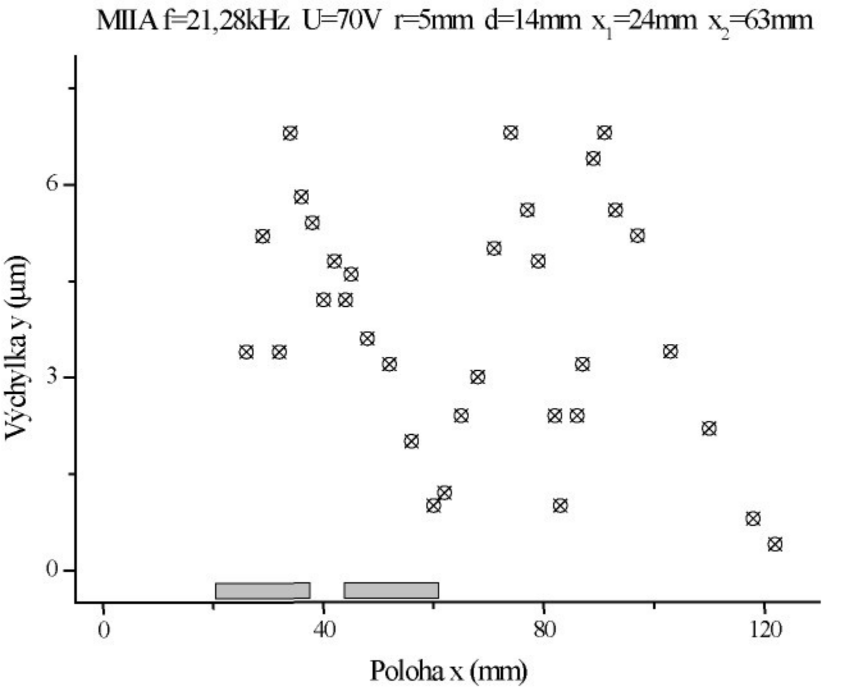
Dvou-segmentové statory



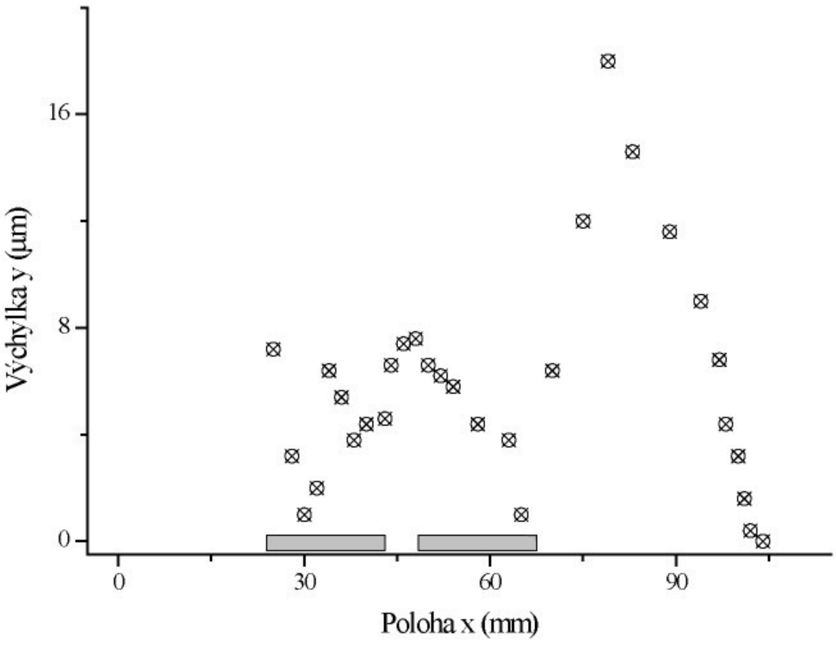

MIIA f=12,66kHz U=70V r=5mm d=14mm x_1=24mm x_2=22mm
Výchylka y (µm)
Poloha x (mm)
0
6
12
0
30
60
90


MIIA f=21,28kHz U=70V r=5mm d=14mm x_1=24mm x_2=38mm
Výchylka y (µm)
Poloha x (mm)
0
5
10
0
30
60
90

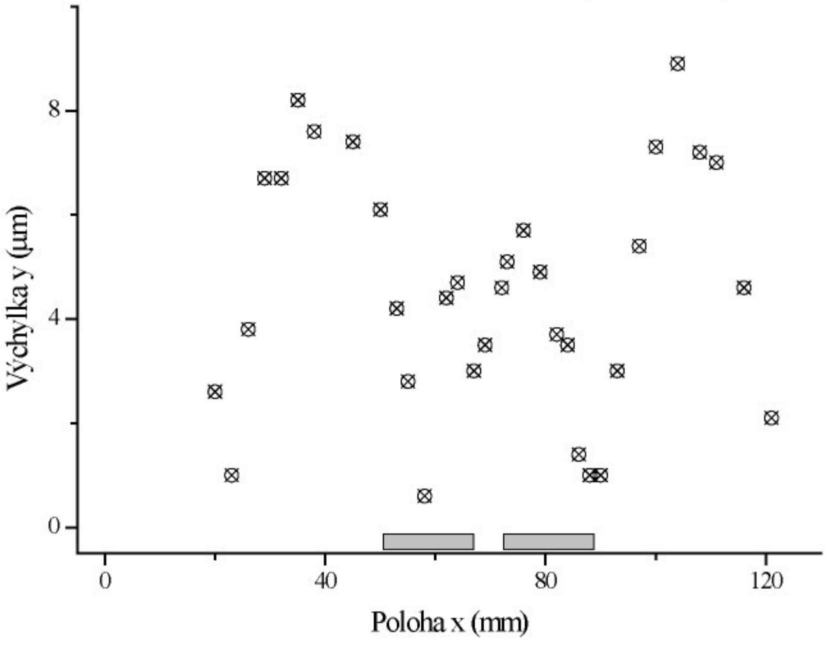

MIIA f=14,93kHz U=70V r=5mm d=14mm x1=24mm x2=38mm
Výchylka y (μm)
Poloha x (mm)
0
2
4
6
0
20
40
60
80

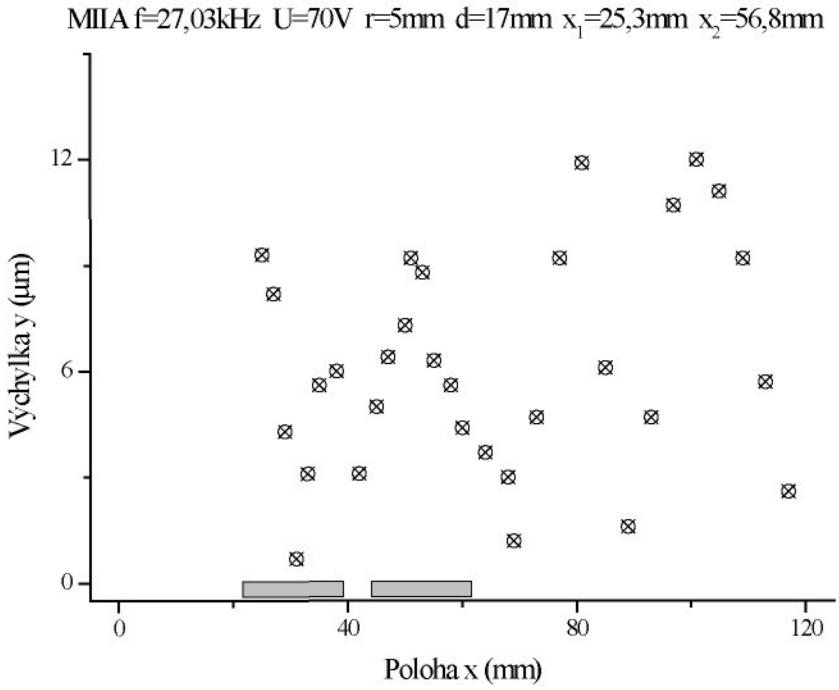

MIIA f=21,28kHz U=70V r=5mm d=14mm x1=24mm x2=63mm
Výchylka y (μm)
Poloha x (mm)
0
3
6
0
40
80
120

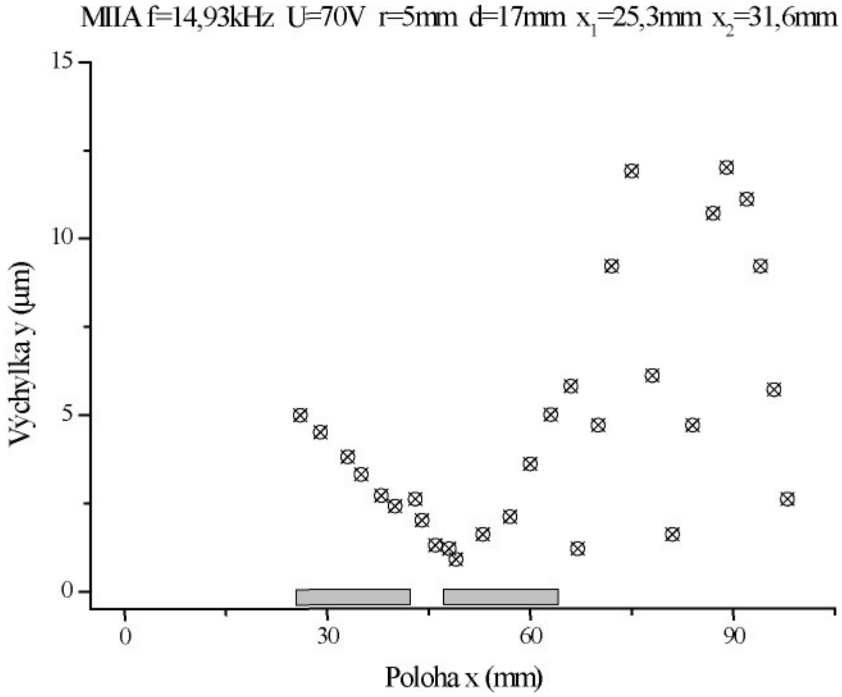
MIIA f=18,52kHz U=70V r=5mm d=14mm x_1=24mm x_2=63mm

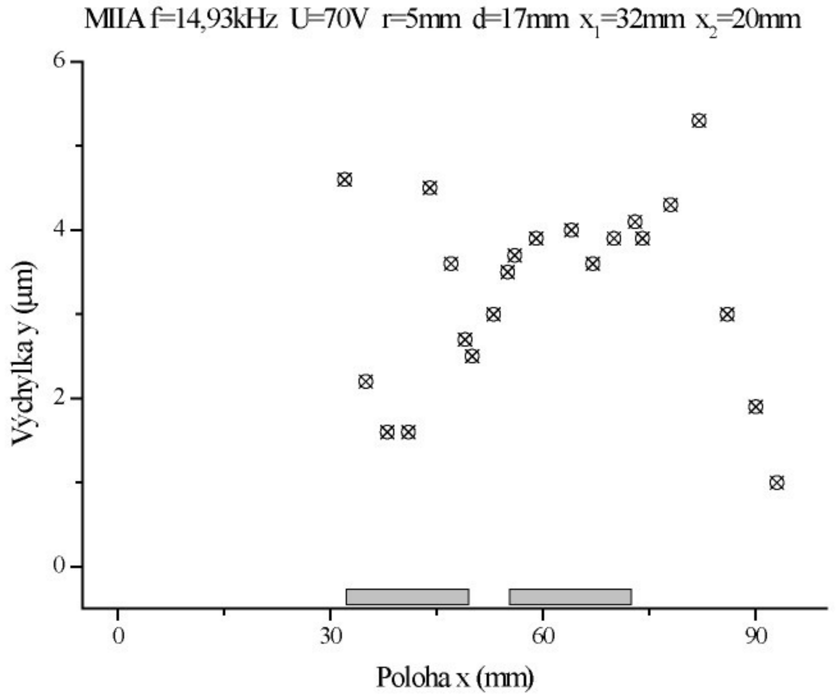


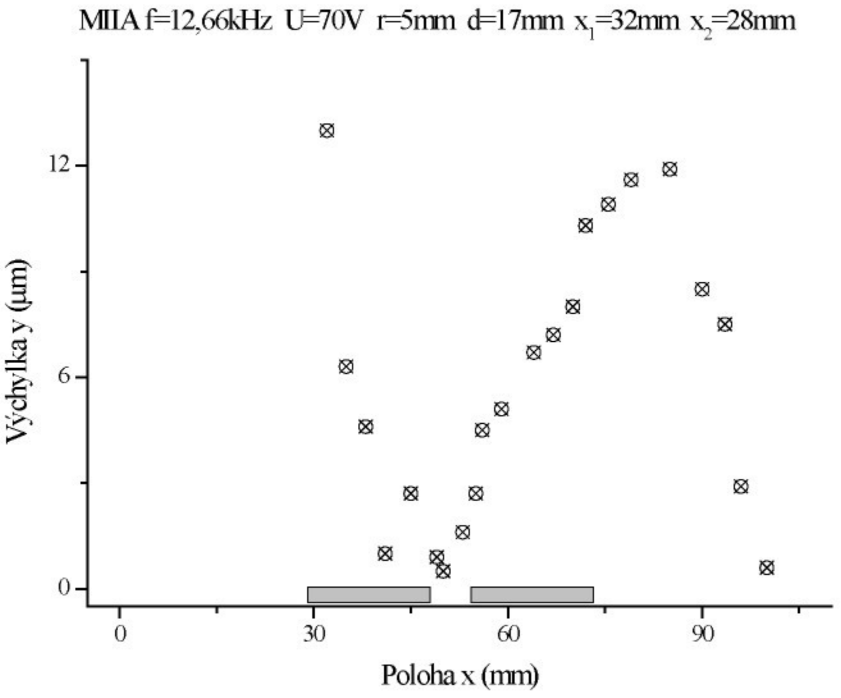
MIIA f=28,57kHz U=70V r=5mm d=17mm x_1=50,6mm x_2=31,6mm




MIIA f=27,03kHz U=70V r=5mm d=17mm x1=25,3mm x2=56,8mm
Výchylka y (μm)
Poloha x (mm)
0
6
12
0
40
80
120


MIIA f=14,93kHz U=70V r=5mm d=17mm x1=25,3mm x2=31,6mm
Výchylka y (μm)
Poloha x (mm)
0
5
10
15
0
30
60
90

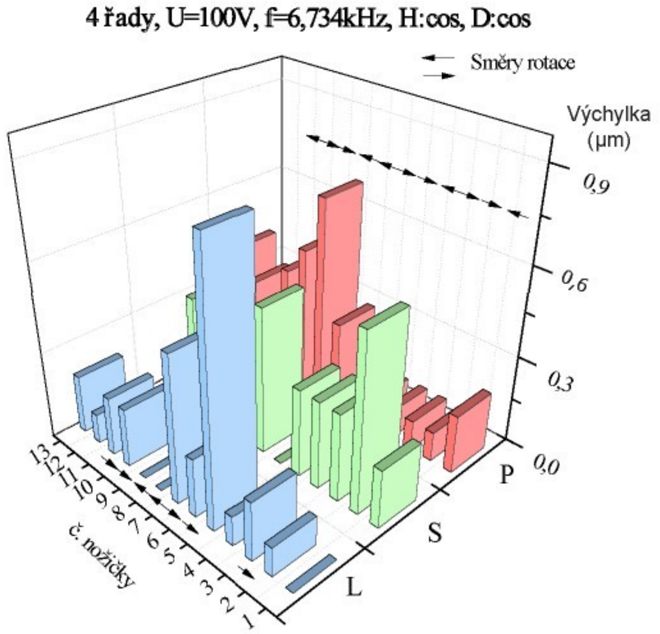

MIIA f=14,93kHz U=70V r=5mm d=17mm x1=32mm x2=20mm
Výchylka y (μm)
Poloha x (mm)
0
2
4
6
0
30
60
90

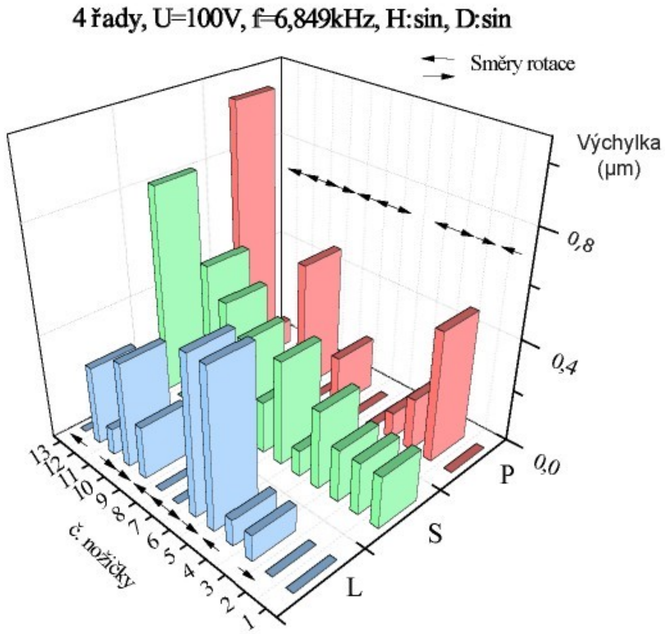

MIIA f=12,66kHz U=70V r=5mm d=17mm x1=32mm x2=28mm
Výchylka y (μm)
Poloha x (mm)
0
6
12
0
30
60
90

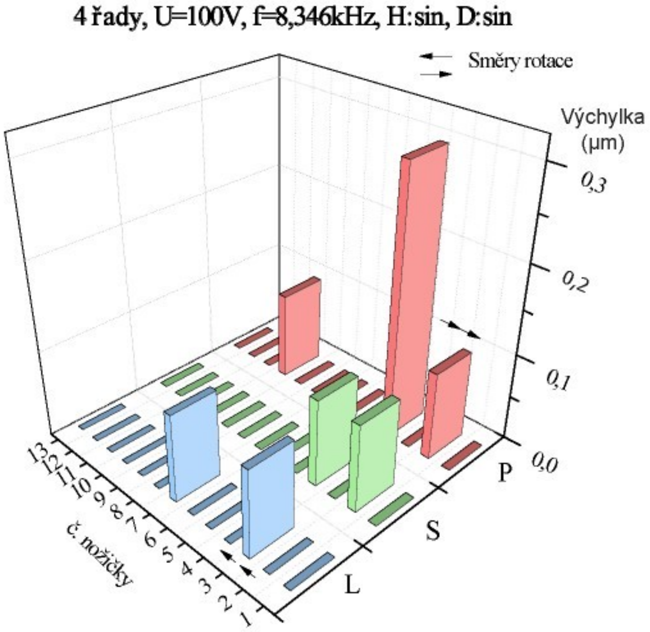
Příloha B

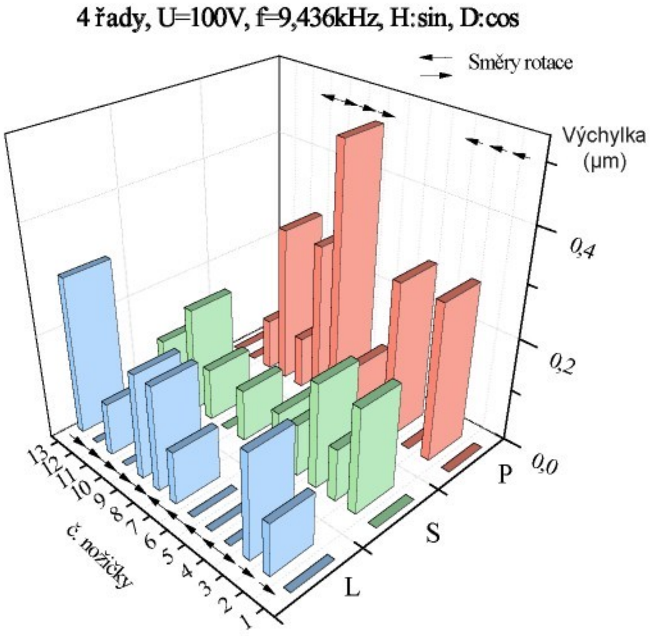
Vertikální výchylky nožek lineárních motorků

Označení grafů: Počet řad PZT elementů, amplituda budícího napětí, frekvence budícího napětí, H - buzení horních sad, D - buzení dolních sad, L - levá třetina nožičky, S - střed, P - pravá třetina nožičky,


4 řady, U=100V, f=6,734kHz, H:cos, D:cos
Směry rotace
Výchylka
(µm)
0,9
0,6
0,3
0,0
P
S
L
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
č. nožičky


4 řady, U=100V, f=6,849kHz, H:sin, D:sin
Směry rotace
Výchylka
(µm)
0,8
0,4
0,0
P
S
L
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
č. nožičky


4 řady, U=100V, f=8,346kHz, H:sin, D:sin
Směry rotace
Výchylka
(μm)
0,3
0,2
0,1
0,0
P
S
L
č. nožičky
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

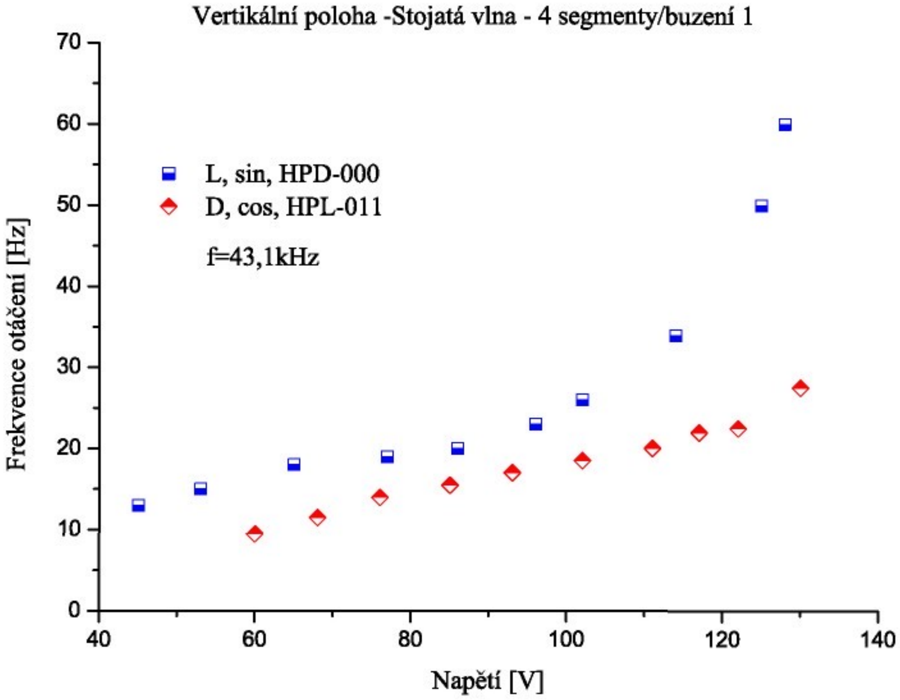

4 řady, U=100V, f=9,436kHz, H:sin, D:cos
Směry rotace
Výchylka
(μm)
0,4
0,2
0,0
P
S
L
č. nožičky
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

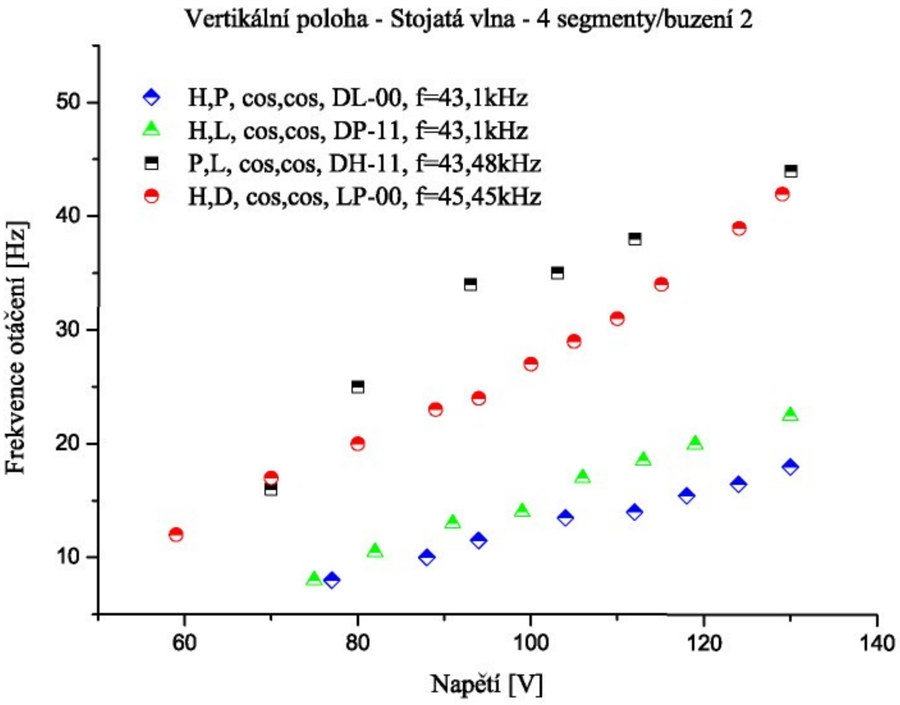
Příloha C

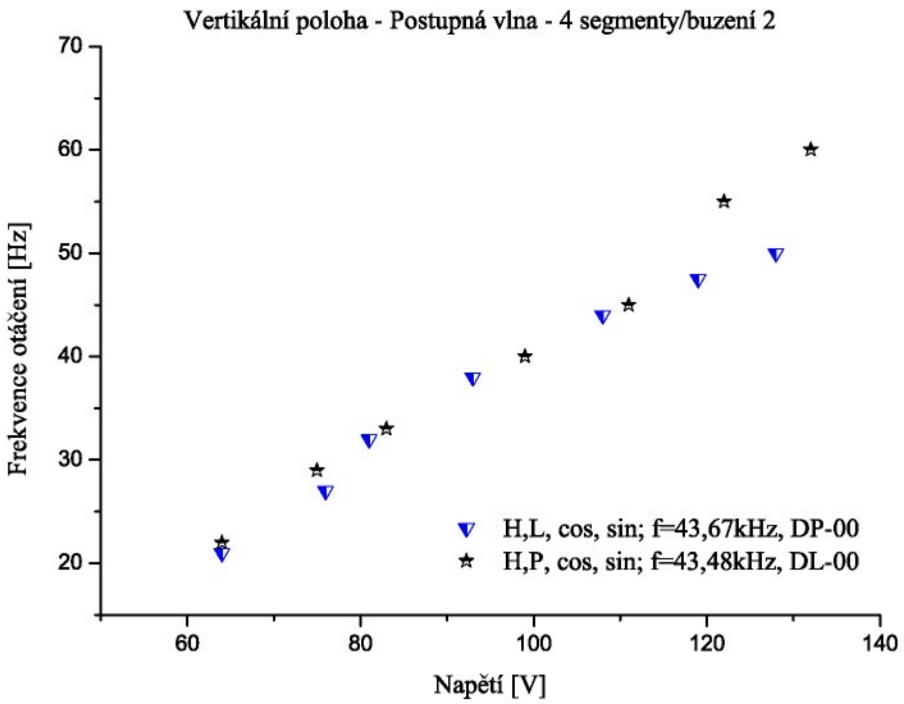
Otáčky rotačních motorků

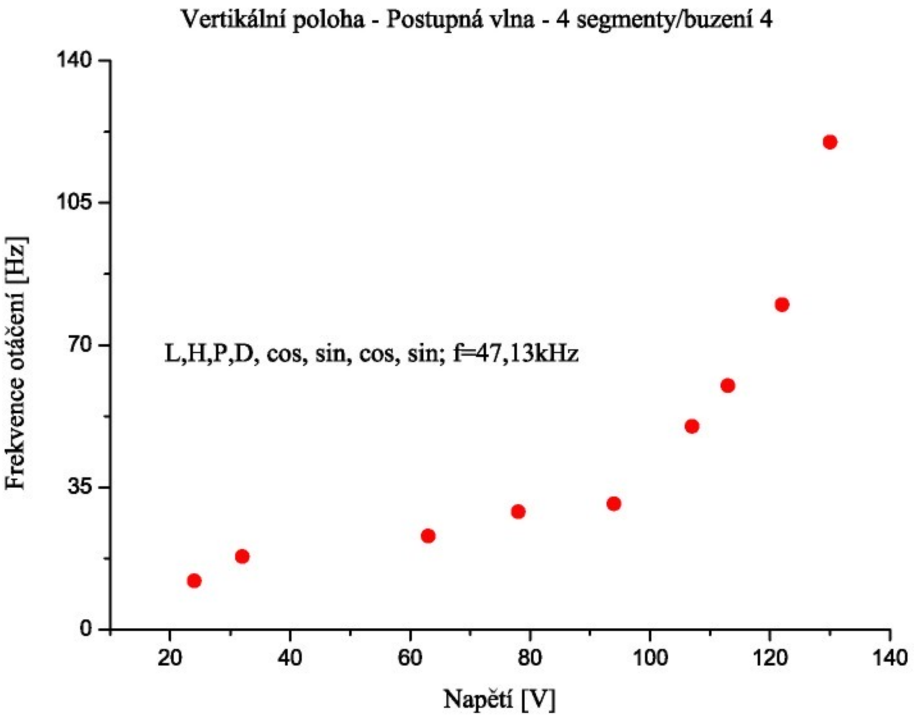
Označení grafů: Poloha upnutí motorku, typ vybuzené elastické vlny, počet PZT elementů, počet, buzených PZT elementů

4 kvadrantový rotační motorek RMI






Vertikální poloha - Postupná vlna - 4 segmenty/buzení 2
Frekvence otáčení [Hz]
Napětí [V]
H,L, cos, sin; f=43,67kHz, DP-00
H,P, cos, sin; f=43,48kHz, DL-00
70
60
50
40
30
20
60
80
100
120
140


Vertikální poloha - Postupná vlna - 4 segmenty/buzení 4
Frekvence otáčení [Hz]
Napětí [V]
L,H,P,D, cos, sin, cos, sin; f=47,13kHz
140
105
70
35
0
20
40
60
80
100
120
140

Publikace a spoluautorství, prezentace

Publikace a spoluautorství odborných článků

- J. Erhart, L. Rusin, M. Franclíková: *Piezoelectric Resonators with Engineered Domain Structures*, Ferroelectrics, **376** (2008) 295-311
- J. Erhart, L. Rusin: *Výzkum a vývoj mechatronických systémů pro spřádací stroje*, Výzkumná zpráva projektu MPO 1709 1FT-TA3/017 (2008)
- P. Půlpán, L. Rusin, J. Erhart: *Influence of Poling Conditions on Material Properties of Lead Zirconate-Lead Titanate Ceramics*, Japanese Journal of Applied Physics, **47** (2008) 7953-7958
- J. Erhart, L. Rusin: *Výzkum a vývoj mechatronických systémů pro spřádací stroje*, Výzkumná zpráva projektu MPO 1709 1FT-TA3/017 (2007)
- J. Erhart, L. Rusin, L. Seifert: *Resonant frequency temperature coefficients for the piezoelectric resonators working in various vibration modes*, Journal of Electroceramics, **19** (2007) 403-406
- J. Erhart, P. Půlpán, L. Rusin: *Výzkum a vývoj mechatronických systémů pro spřádací stroje*, Výzkumná zpráva projektu MPO 1709 1FT-TA3/017 (2006)
- L. Rusin: *Studium nehomogenně polarizovaných piezoelektrických rezonátorů*, Vědecká pojednání XI/2005, Akademické koordinační středisko v Euroregionu Nisa, ACC Journal, Technická Univerzita v Liberci, (2005) 395, abstrakt
- L. Rusin, L. Seifert, J. Erhart: *The study of inhomogeneously poled PZT ceramic and* $Pb_5Ge_3O_{11}$ *and* $LiTaO_3$ *multi-domain resonators*, ECAPD7, 7th European Conference on Applications of Polar Dielectrics, Technical University of Liberec, Czech Republic (2004), abstrakt

Curriculum Vitae

Jméno:	Luboš Rusin
Adresa:	Aloisina výšina 644/132 46015 Liberec 15 Česká Republika
E-mail:	lubos.rusin@tul.cz
Datum narození:	25.07. 1979
Místo narození:	Brandýs nad Labem
Národnost:	Česká
Pohlaví:	Mužské

Vzdělání

od 09/2004 Doktorské studium
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství, obor: Fyzikální inženýrství
Téma dizertační práce: Piezoelektrické aktuátory se zesíleným posunutím
Katedra fyziky, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická
Technická Univerzita v Liberci

06/2004 Akademický titul Ing.
Studijní obor: Přírodovědné inženýrství
Téma diplomové práce: Studium nehomogenně polarizovaných piezokeramických rezonátorů
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií
Technická Univerzita v Liberci

Počítačové dovednosti

Programování: Inprise Delphi, C++, HTML
Software: MS Office, Matlab, ANSYS, Wolfram Mathematica, Flash, AutoCAD
Adobe - Illustrator, Indesign, Photoshop, Acrobat

Jazyk Angličtina (písmem i mluvou), Němčina - pasivně

Zájmy fotografování, hudba, squash, florbal, cyklistika

139 stran
náklad 5 výtisků
(digitální verze na přiloženém CD)
© 2010 Technická univerzita v Liberci

Kapitola 3

Piezoelektrické motorky

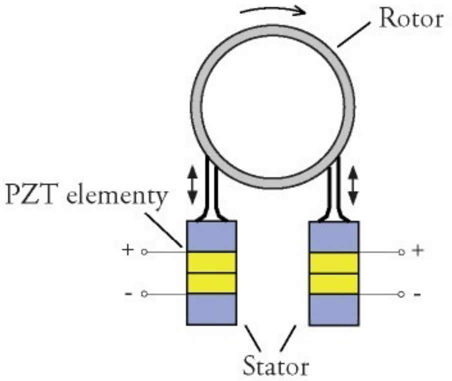
3.1 Úvod

Piezoelektrické motorky obecně jsou rozdělovány do dvou kategorií založených na typu elektrického buzení. Jednak je to elektrické buzení, kdy deformaci piezoelektrické látky dosáhneme aplikací stejnosměrného napětí (DC) nebo střídavého napětí (AC), kterým dosáhneme vybuzení na některé vlastní mechanické rezonanční frekvenci prvku. Výchylka v oblasti rezonance je závislá nejen na budící frekvenci, ale i na amplitudě aplikovaného napětí. Velmi významnou výhodou ultrazvukových motorků je právě relativně vysoká rychlost rotoru spojená s budící frekvencí a nanometrické deformace ovlivňující přesnost pohybu. Používané materiály na stavbu ultrazvukových motorků jsou především z velmi tvrdého typu piezoelektrické keramiky s vysokým mechanickým faktorem Q_m a malými dielektrickými ztrátami ($tan(\delta)\approx$0,1%) hlavně pro minimalizaci vznikajícího tepla a dosažení co největší možné výchylky.

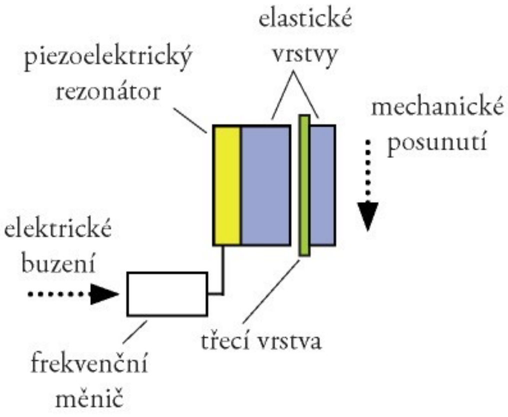
3.2 Historie

První piezoelektrický motorek si již roku 1948 nechali patentovat vynálezci A. L. W. Williams a W. J. Brown [135]. Patent obsahoval současně několik typů rotačních motorků využívajících piezoelektrický jev ve formě ohybových kmitů. Celkový rotační pohyb motorku zde spočíval v přeměně fázově různých elektrických signálů na ohybové kmity pomocí inverz-

ního piezoelektrického jevu. Postupně se začaly objevovat nové principy motorků využívající tento jev. Roku 1959 - C. Kleesattel [138], 1963 - G. Arkhangelsky a 1964 - V. Lavrinenko. Až roku 1973 vytvořil B. H. Barth první prakticky použitelný *ultrazvukový* piezoelektrický motorek jehož stator se skládal ze dvou piezoelektrických elementů a rotoru z klasické kruhové desky. Rotor byl poháněn sérií drobných výchylek, řádově mikrometrů, s vysokou frekvencí (obr 3.2.1). Přelomový moment pro vývoj moderních piezoelektrických motorků byl ovšem rok 1985, kdy T. Sashida zformuloval teorii postupné vlny u těchto motorků [139]. Od této doby se odvětví piezoelektrických motorků značně rozšířilo. Bylo to způsobeno především výhodami oproti konvenčním elektromagnetickým motorkům. Většina principů je realizována třením mezi rotorem a statorem, a proto i po vypnutí napájení zůstává motorek pevně v dané pozici. Nespornou výhodou je i kompaktnost a jednoduchost konstrukce celého motorku. Zařízení také vyniká absencí magnetického pole. Určení přesné pozice či tichý chod je zde téměř samozřejmé. Zařízení charakterizuje i menší kroutící moment, menší moment setrvačnosti a větší možnost miniaturizace [14]. Protože celý princip je založen právě na zmíněném tření je nutné používat materiály elastických vrstev (obr. 3.2.2), které jsou odolné vůči opotřebení [197]. Problém může činit i spolehlivost zařízení při dlouhodobějším používání, kdy již nemusí být stoprocentní.



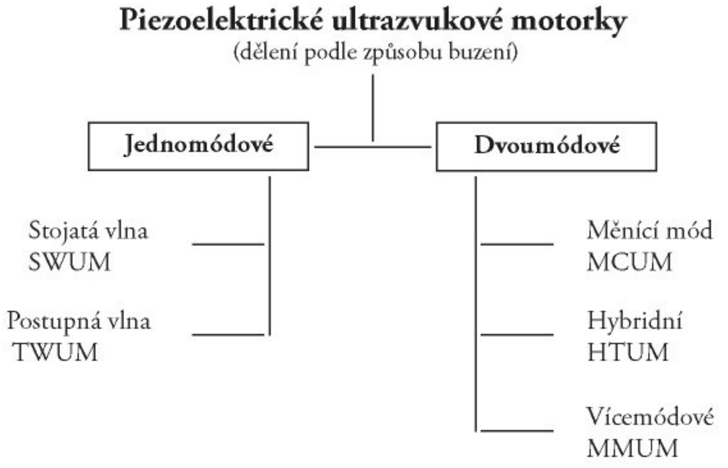
Obr. 3.2.1 - *První piezoelektrický motorek*



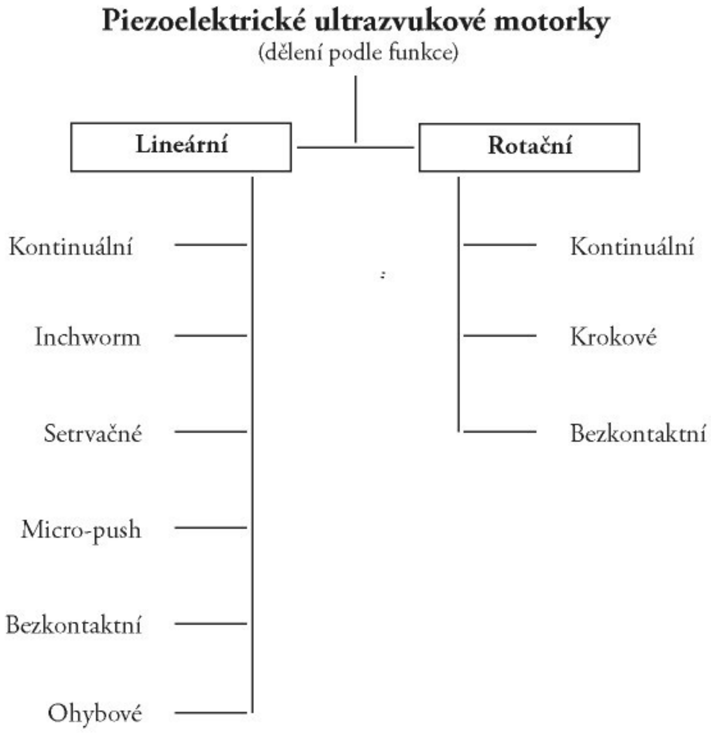
Obr. 3.2.2 - *Uspořádání piezoelektrického motorku*

Ultrazvukový motorek (*USM - Ultrasonic Motor*) je piezoelektrický aktuátor, který za pomoci inverzního piezoelektrického jevu přeměňuje elektrickou energii na energii mechanickou v podobě kmitů a v ideálním případě všechny body na povrchu statoru opisují *eliptickou dráhu*. Zařízení je rezonanční tudíž pracuje na jedné ze svých rezonačních frekvencí spadající do ultrazvukové oblasti. Rezonanční frekvence je především charakterizována maximální amplitudou a tento fakt vede i k závěru, že je možné použití menšího budícího napětí než tomu bylo u motorků pracujících mimo rezonanci. Pracovní frekvence jsou většinou v rozsahu od 20 kHz do 10 MHz a vybuzené amplitudy kmitů od 10 do 100 nm. Kombinací vybuzených kmitů a tření mezi rotorem a statorem dostáváme plynulý a téměř nekonečný posun.

Motorky můžeme rozdělit podle několika kritérií - použitého principu generovaného pohybu, funkce, geometrie stavby či dle typu vybuzených kmitů.



Tab. 3.2.1a - *Rozdělení piezoelektrických motorků*



Tab. 3.2.1b - *Rozdělení piezoelektrických motorků*

3.3 Ultrazvukové motorky

3.3.1. Rozdělení podle způsobu elektrického buzení

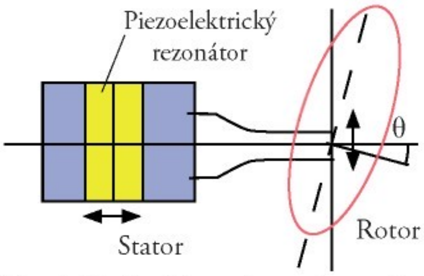
Třídy ultrazvukových motorků se dají klasifikovat podle způsobu jakým eliptický pohyb vzniká. Motorky se tedy dělí do dvou skupin na jednomódové a dvoumódové typy kmitů.

<u>Ultrazvukové motorky využívající jeden mód kmitů</u>

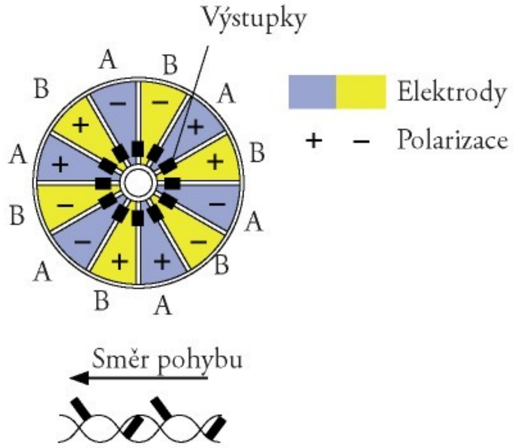
Motorky založené na jednomódových kmitech se dále dělí na další dvě podskupiny: motorky se stojatou a postupnou vlnou.

Motorky se stojatou vlnou
(Standing Wave Ultrasonic Motor - SWUM)

Existují dvě velmi odlišné třídy typů ultrazvukových motorků se stojatou vlnou. První třída je ta, kdy budíme podélné kmity aktuátoru (Obr. 3.3.1.1) [23], [31], [57], [93], [132]. Tyto podélné kmity jsou přeměněny na příčné přes vibrační vedení a šikmé upevnění mezi rotorem a statorem způsobuje eliptický pohyb. Tento princip je aplikovatelný také na podélné kmity tyčinky.



Obr. 3.3.1.1 - *Motorek se stojatou vlnou*



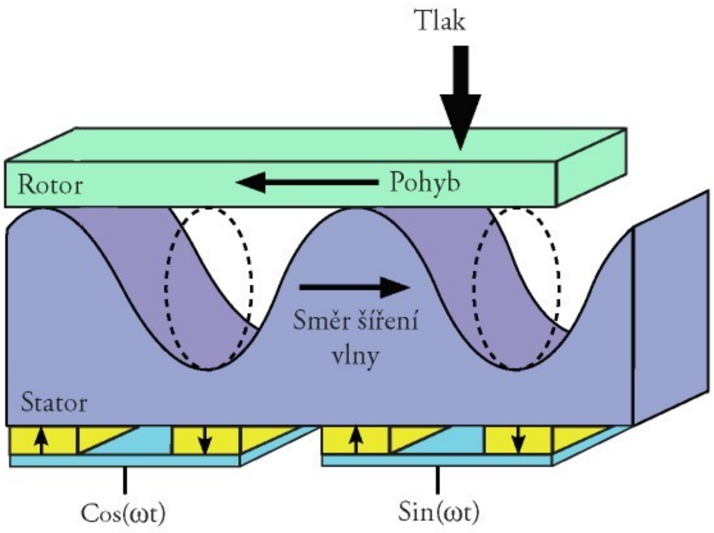
Obr. 3.3.1.2 - *Kruhový SWUM motorek*

Ve druhé třídě princip spočívá v tom, že například na prstenci jsou rozmístěny dvě skupiny elektrod pro možnost otáčení v obou směrech (vícemódový motorek). Takovýto typ motoru navrhnul T. Takano a princip vystihuje obrázek 3.3.1.2 [2], [63], [88], [141], [121], [131], [149]. Tvar prstence je tedy rozdělen do 12 částí po 1/4 vlnové délky. Každý sousední pár je polarizován antiparalelně. Je vhodné dělit stator na více menších oblastí. Vždy na každé hranici jednoho páru elektrod je k piezoelektrickému členu přilepen malý výstupek (zoubek). Jakmile se začnou budit elektrody A na rezonanční frekvenci kmitů tak vždy sousední výstupky se začnou pohybovat opačně. To znamená, že jeden vzhůru a druhý směrem dolů v sousedních půlperiodách. Rotor je poté těmito výstupky unášen daným směrem. Jestliže aplikujeme elektrické buzení na elektrody B celý proces se obrátí a pohyb je opačným směrem. Jednoduše tak lze změnit směr pohybu motoru. Stejný princip je možné využít i pro lineární

ultrazvukové motorky. Rotor je také možné ke statoru přitlačit tangenciálně z boku či umístit rotor doprostřed prstence.

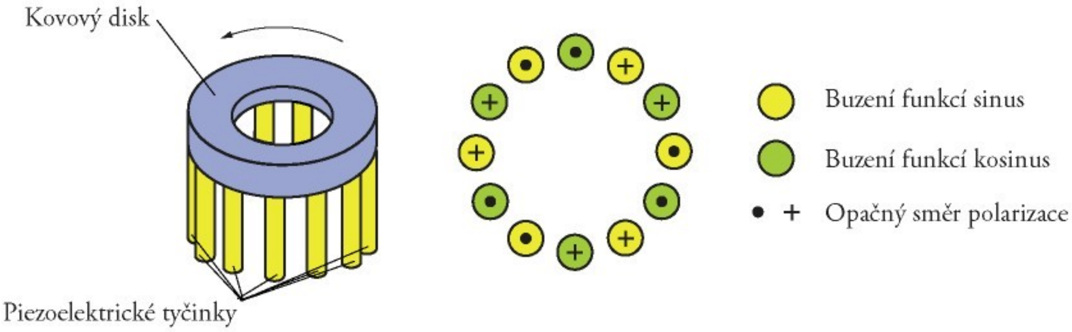
Motorky s postupnou elastickou vlnou (Traveling Wave Ultrasonic Motor - TWUM)

U motorků s postupnou vlnou se elastická vlna, složená z podélných a příčných vln, šíří materiálem a vychyluje postupně všechny body na povrchu materiálu. Předpokládáme-li vlnu v harmonickém tvaru tak poté každý bod na povrchu materiálu opisuje elipsu. Velikost elipsy ovlivňuje amplituda harmonické vlny (amplituda napájecího napětí). Tím také dochází ke změně rychlosti motorku (Obr. 3.3.1.3) [75], [126].



Obr. 3.3.1.3 - *Princip TWUM*

Se snižováním velikosti amplitudy budícího napětí samozřejmě roste silové působení generované vlnou. Naproti tomu zvyšování budícího napětí vede ke zvětšení šířky elipsy a zvýšení rychlosti motorku tudíž ale i ke snížení síly. Pro změnu směru pohybu na opačný se generovaná vlna budí stejným signálem ovšem opačné polarity. S postupnou vlnou jsou ovšem spojeny problémy s její realizací v konečné délce. Důvodem jsou odražené vlny od konců elastické vrstvy, ve které se vlna šíří. Jestliže spolu interferují původní a odražené vlny nemusí postupná vlna vzniknout. Odražené vlny lze ale výrazně potlačit. Potlačení může být například ve formě tlumení mechanickou přizpůsobovací vrstvou či jinou disipativní metodou, kdy se snažíme eliminovat energii všech odražených vln. Jednou z těchto metod je aktivní potlačení vibrací. Přímým piezoelektrickým jevem převedeme mechanickou deformaci do elektrické podoby a tu přeměníme na teplo. Další řešení, většinou velice výhodné, je postaveno na skutečnosti, že postupná elastická vlna vznikne interferencí dvou stojatých vln vůči sobě fázově posunutých o 90°. U takto vytvořených aktuátorových struktur pak žádná jiná vlna nevzniká. Úskalí této metody, ale tkví v tom, že ne vždy je možné vytvořit obě stojaté vlny v téže elastické vrstvě (např. konstrukční omezení apod.). Postupné vlny se především využívá u rotačních motorků, kde vybuzená elastická vlna obíhá stále po nekonečné dráze a v ideálním případě se nemá kde odrazit. Využití podélných kmitů pro vygenerování dvou stojatých vln reprezentuje obr. 3.3.1.4, kdy stator tvoří elastický prstenec a piezoelektrické



Obr. 3.3.1.4 - *Rotační motorek s podélnými kmity*

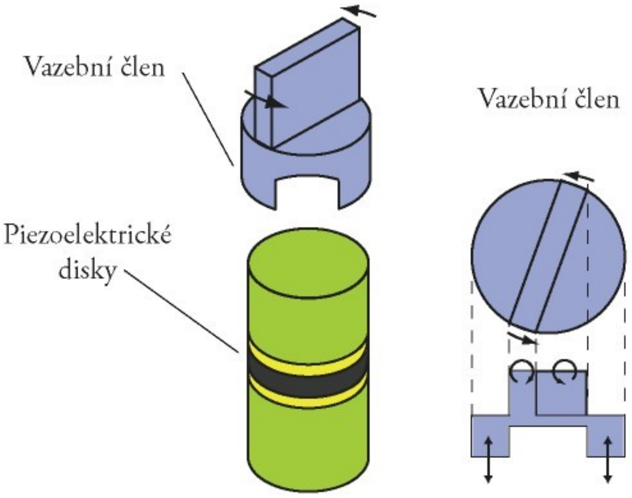
elementy tvaru tenkýchválečků [30], [74], [105], [103]. Výhodná konstrukce motoru ho předurčuje i pro použití se dvěma rotory. Přibližná hodnota frekvence otáčení je 100 otáček za minutu bez zátěže a s 1 mNm kroutícího momentu.

Ultrazvukové motorky využívající dvou kmitů různých módů

Eliptického pohybu lze docílit i dalšími různými způsoby. Jednoduchým způsobem je například použití dvou kmitů navzájem různých směrů resp. použití dvou nezávisle kontrolovatelných aktuátorů. Ultrazvukové motorky používající dvou různých módů lze dále dělit do tří skupin. Na motorky měnící mód, vícemódové a hybridní.

Motorky měnící mód kmitů (Mode Conversion Ultrasonic Motor - MCUM)

Tento motorek využívá změny módu kmitů tak, aby se z jednoho piezoelektrického prvku dosáhlo kýžených dvou módů [137]. Existuje zde spousta způsobů, ale většinou se používá vazebního členu, který svým tvarem mění právě mód kmitů. Jeden z nich je na Obr. 3.3.1.1. Jiný typ motorku používá torzního vazbového členu, který mění podélné kmity na kmity torzní Obr. 3.3.1.5 [200]. Vazební člen vykonává eliptický pohyb na základě kombinace torzních a podélných kmitů. Pro buzení těchto motorků se používá jednofázového řídícího signálu a velice těžce se obrací směr pohybu bez změny frekvence. V případě použití

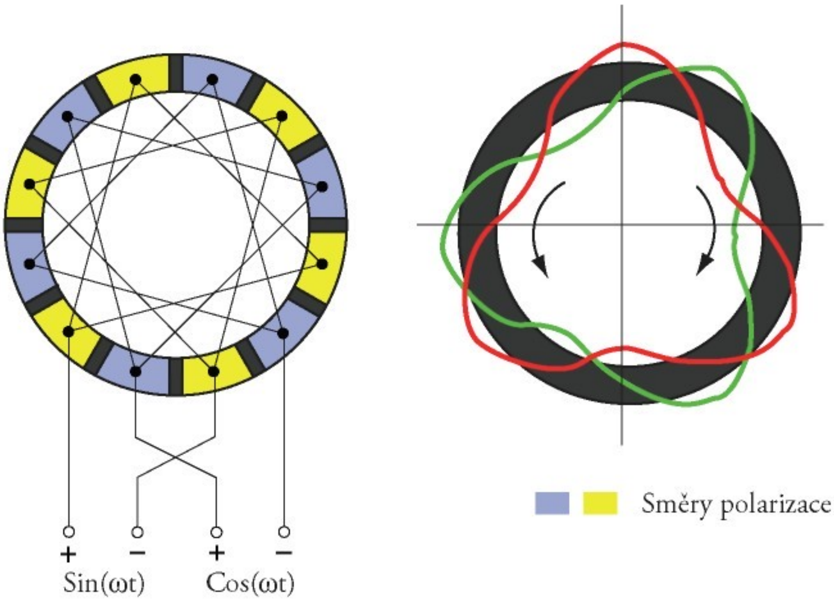


Obr. 3.3.1.5 - *Podélně torzní motorek s vazebním členem*

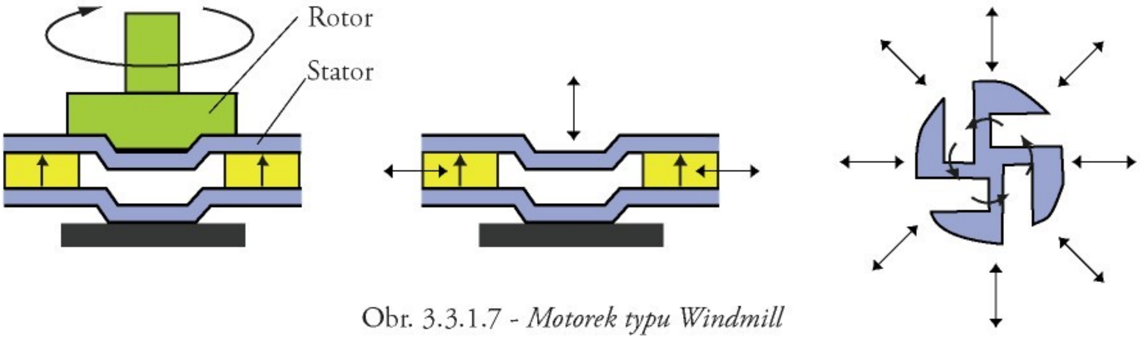
dvou piezoelektrických členů by byla změna směru otáčení jednodušší, protože směr by byl změněn záměnou fáze řídícího signálu mezi zdroji napájení obou elementů.

Vícemódové motorky
(Multi-Mode Ultrasonic Motor - MMUM)

Základ tohoto motoru spočívá v generování mechanických kmitů jedním či více piezoelektrickými elementy jejichž kmity spolu navzájem interferují [80]. Vícemódové motorky se také často označují příslušným písmenem, které charakterizuje typ kmitu a dvěma indexovými čísly. První udává počet uzlových kružnic a druhé počet uzlových přímek - počet domén. Využívá se několik základních módů. Jedním z nich jsou podélné a ohybové kmity plného válce. V tomto případě může být motor upevněn v ose vzniklého uzlu. Jiný případ zase ukazuje obrázek 3.3.1.6. [7], [64], jak se v kruhovém uspořádání piezoelektrických elementů generují symetricky střižné a radiální kmity a při vhodných budících podmínkách se na vnějším povrchu vytváří eliptický pohyb. Polarizace jednotlivých segmentů je ve směru tloušťky. Další ultrazvukové motorky využívají osově nesymetrické a radiálně rozpínavé kmity, podélné a ohybové kmity struktury v křížovém tvaru nebo dvou ohybových kmitů pravo-



Obr. 3.3.1.6 - *a) Rozložení elektrod a polarizace b) Schéma kruhového módu*

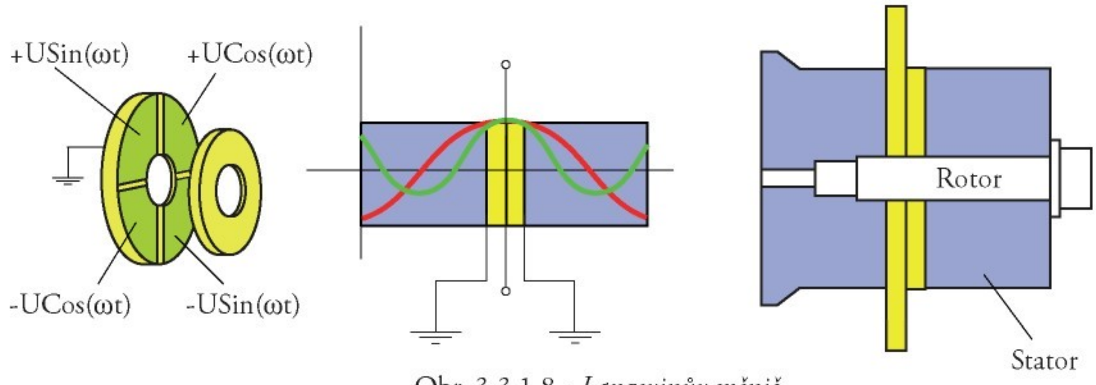


Obr. 3.3.1.7 - *Motorek typu Windmill*

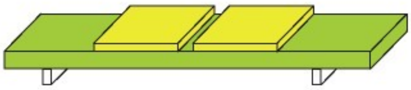
úhlé tyčinky, které jsou vzájemně kolmé či podélné a ohybové kmity destičky [54]. Poslední tři jmenované principy jsou vhodné především pro lineární motorky.

Pro vývoj nových druhů piezoelektrických motorků byly použity i kompozitní struktury. Názorným příkladem je typ Windmill (obr. 3.3.1.7) [89], [112], [114]. Stator je piezoelektrický výbrus tvaru kruhového prstence elektrodovaný na čelech, který má ve vnějším průměru rovnoměrně rozložená kovová ramena tvaru vrtule. Délka a průřez jednotlivých ramen je navržen tak, aby jejich ohybová rezonanční frekvence byla co nejblíže radiální rezonanční frekvenci statoru. Po aplikování elektrického pole o frekvenci mezi ohybovou a radiální rezonanční frekvencí se konce ramen pohybují opět elipticky a unáší tak rotor vsazený mezi ně. Konstrukční omezení ovšem nastává, jestliže vrtule nebude mít dostatečnou tloušťku a tudíž nemusí dojít k přenosu kmitů. Konstrukce motorku o průměru statoru 5 mm vykazovala při frekvenci elektrického pole 160 kHz maximální rychlost 2000 ot/min s maximálním kroutícím momentem 0,8 mNm.

Nejpoužívanějším principem vícemódových motorků je Langevinův motor (obr. 3.3.1.8) [102], [124], [145], [162]. Motor je obvykle charakterizován relativně úzkým pásmem rezonanční frekvence. Měnič se skládá z přední a zadní části v podobě hmotného tělesa a dvou piezoelektrických prvků umístěných uprostřed těles. Přední a zadní část jsou poté spojeny šroubem včetně piezoelektrických prstenců. Jeden z prstenců je většího průměru a je polarizován nehomogenně po kvadrantech zatímco menší je polarizován homogenně. Rotor je válcový magnet držící magnetickou silou v ose statoru. Jestliže budeme budit dvěma sinovými signály o stejné frekvenci a amplitudě dva protilehlé kvadranty piezoelektrického prstence s fázovým posunem 0° a 180° stupňů dostaneme nesymetrickou deformaci. Obr. 3.3.1.8. také ukazuje rozprostření výchylky prvního a třetího módu ohybových kmitů. Aplikací dalších dvou sinových signálů zbylých elektrod s fázovým rozdílem 90° a 270° stupňů vybudíme druhý ohybový mód posunutý vůči prvnímu o 90°. Předepnutí se realizuje zmíněným šroubem a zvyšuje tak mechanickou pevnost a tím i schopnost pojmout vyšší budící napětí.



Obr. 3.3.1.8 - *Langevinův měnič*

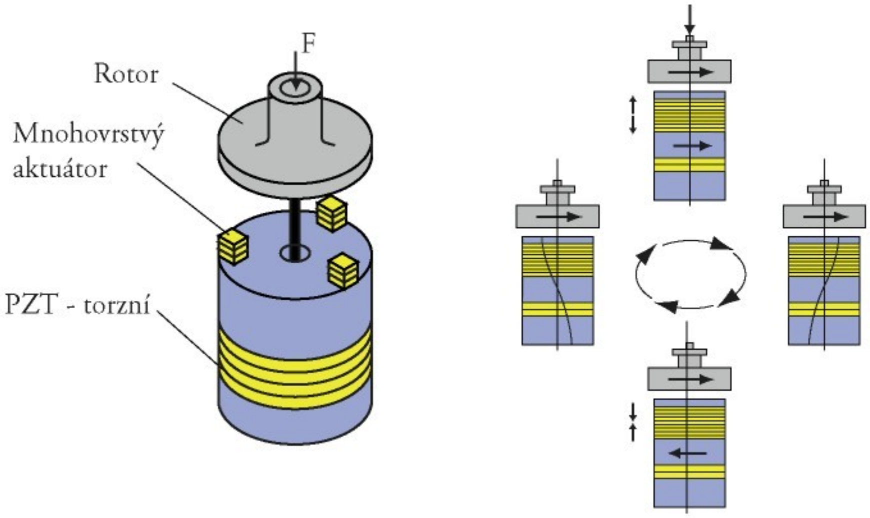


Obr. 3.3.1.9 - *Vícemódový motorek L1B4*

Ohybový a podélný mód kmitů využívá také motorek L1B4 (obr. 3.3.1.9) [3], [26], [76], [96], [196]. Obě piezoelektrické destičky jsou buzeny sinusovými signály s fázovým posunem 90°. Zároveň se budí podélný kmit na první harmonické frekvenci a ohybový kmit čtvrté harmonické frekvence. Oba řídící signály musí mít stejnou nebo velmi podobnou frekvenci a tudíž je nutné k tomu upravit rozměry elementů. Kombinace obou kmitů se přenáší na malé zoubky na kterých vzniká eliptický pohyb.

Hybridní motorky
(Hybrid Transducer Ultrasonic Motor - HTUM)

Princip těchto motorů spočívá ve využití dvou mechanických kmitů, které jsou generovány ze dvou nezávislých piezoelektrických elementů. Existuje několik různých druhů. Obr. 3.3.1.10 je schéma jednoho takového hybridního ultrazvukového motorku [8], [19], [20], [29], [48], [91], [140]. Stator je tvořen členem vytvářející torzní kmity (polarizovanými tangenciálně) a piezoelektrickými mnohovrstvými aktuátory, které jsou na torzním členu přilepeny. Tyto dva různé piezoelektrické členy jsou buzeny dvěma elektrickými zdroji o stejné frekvenci s příslušným fázovým rozdílem.



Obr. 3.3.1.10 - *a) Uspořádání HTUM b) Princip HTUM*

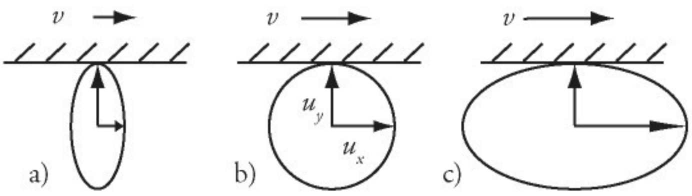
Obr. 3.3.1.11 nastiňuje čtyři typické fáze jednoho cyklu motoru:

1. Torzní kmity mají pravotočivý směr a mnohovrstvé aktuátory jsou nyní v kontaktu s rotorem. Unášivá síla je přenášena přes třecí sílu na rotor.

2. Výchylka kmitající části je na svém maximu a výchylka aktuátoru je nulová. Aktuátory jsou zpět na své neutrální délce a rotor je volný.

3. Torzní vibrátor má levotočivý směr rychlosti a aktuátory mají nejmenší délku.

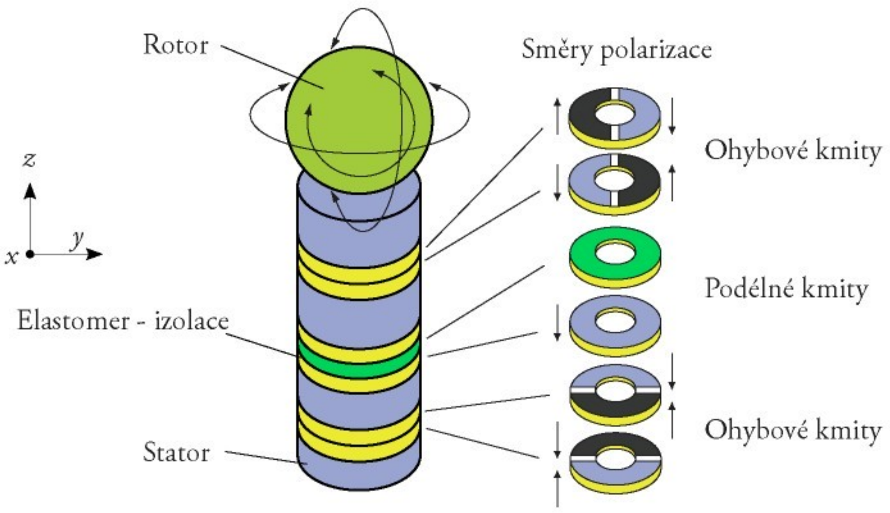
4. Kmitající část dosáhla maximální výchylky, ale opět opačného směru vůči druhému bodu a výchylka aktuátoru je nulová.



Obr. 3.3.1.11 - *Kontakt povrchu motorku pro různé amplitudy a) nízká b) střední c) vysoká rychlost*

Výhoda tohoto typu motorku je v nezávislosti každého z piezoelektrických elementů a motor může být řízen pouze nastavením jednoho z měničů. Trajektorie bodů na povrchu tohoto motoru jsou na obrázku 3.3.1.11.

Obrázek 3.3.1.12 ukazuje sestavu motorku *MDOF* (*Multi Degree Of Freedom*), který se skládá ze statoru válcového tvaru a kulového rotoru [12], [53], [113], [107], [120], [150]. Stator má tři piezoelektrické elementy, první z nich budí podélné a ostatní ohybové kmity čistě nezávisle. Podélné kmity se dějí v ose *z* zatímco ohybové v rovinách *xz* a *yz*. Kombinací těchto kmitů může vzniknout rotační pohyb. Rotor je poháněn opět třecí silou a rotace kuličky je buzena kombinací příslušných kmitů tzv. „wiggle" pohyb [50], [55]. Jestliže jsou podélné a ohybové kmity buzeny s příslušným fázovým posunem 90° kulička začne rotovat kolem os *x* nebo *y*. Jestliže se vybudí oba ohybové kmity s fázovým rozdílem 90° začne kulička rotovat kolem osy *z*.



Obr. 3.3.1.12 - *Motorek se třemi stupni volnosti*

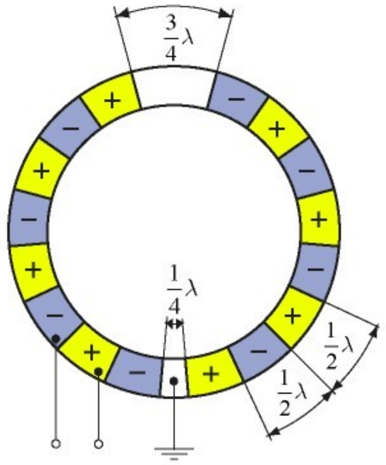
3.3.2 Rozdělení podle funkce motorku

Jak již bylo zmíněno výše ultrazvukové motorky mohou být děleny, jak podle způsobu buzení, tak podle funkce motorku (lineární nebo rotační). V následujících kapitolách budou typy buzení popsány.

Rotační ultrazvukové motorky

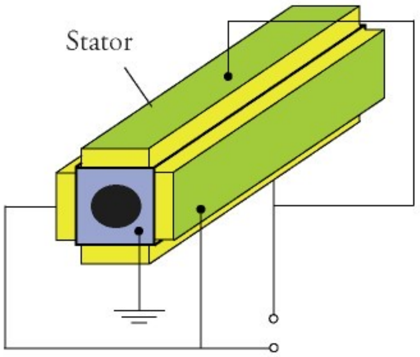
Kontinuální

V případě, že budíme mechanické kmity na uzavřeném tělese tvaru kruhu (kruhový [17], [27] či čtvercový) na některé z jeho vlastních frekvencí vybudí se pouze stojatá vlna. Ale protože se vlna šíří v podstatě od místa zdroje kmitů (piezoelektrického elementu) do různých směrů tak obě vlny spolu interferují. Jestliže budeme budit více elementů na uzavřeném tvaru prvku dosáhneme výchylky, která je superpozicí všech těchto vln (dvou vln od každého elementu). Za použití principu superpozice tak můžeme vytvořit vlnu obíhající dokola v uzavřeném tvaru statoru. Teoreticky by se takováto obíhající vlna dala vytvořit pouze dvěma piezoelektrickými elementy. V praxi se ale snažíme o co největší počet a co největší symetrii těchto elementů tak, aby se vlna zachovala na celém oběhu. Na obr. 3.3.2.1 je jeden z řady motorů Shinsei [9], [72], [90], [100], [133], [202]. Zde je postupná vlna vyvolaná tenkým piezoelektrickým prstencem, který je řízený střídáním harmonických funkcí sinus a kosinus pro oba směry otáčení. Rotor v podobě „slideru“ je také prstencového tvaru v těsném kontaktu se statorem. Velikou výhodou takovéhoto designu jsou jeho rozměry, které ho v podstatě předurčují pro použití např. jako aktuátor pro automatické zaostřování objektivu fotoaparátů apod.

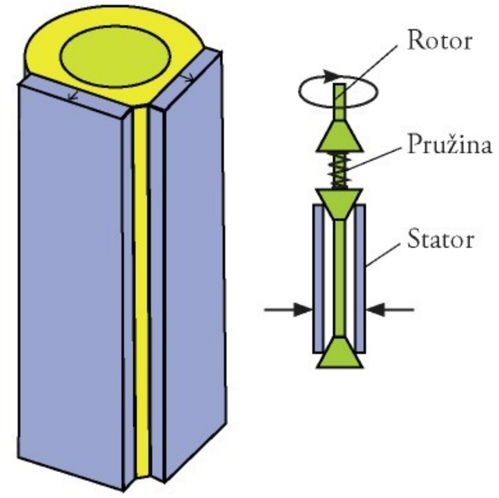


Obr. 3.3.2.1 - *Shinsei USM - stator*

Jedním z motorků, který vykonává rotační pohyb je i motorek využívající ohybové kmity [110]. Ten tvoří dlouhá trubička z piezoelektrického materiálu radiálně polarizovaná - stator. Na obou koncích má elektrody rozdělené na kvadranty. Pro pohyb jedním směrem je elektrické pole přiloženo na protilehlé kvadranty na kterých mají piezoelektrické elementy vždy opačnou polarizaci. Přiložené elektrické pole vytvoří ohyb trubičky a vytvoří se tak po-



Obr. 3.3.2.2 - *Hranolkový USM*



Obr. 3.3.2.3 - *Modifikovaný trubičkový motorek*

Kapitola 1

1.1 Úvod

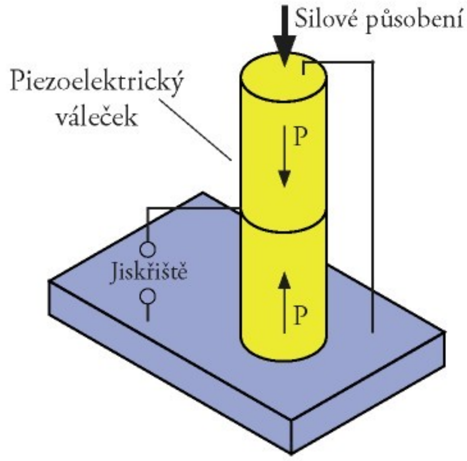
Ve 20. století piezoelektrická keramika, založená na oxidech kovů a jiných umělých materiálech, umožnila použít piezoelektrický a inverzní piezoelektrický jev v mnoha nových aplikacích. Tyto materiály jsou většinou fyzikálně odolné a chemicky netečné a jsou relativně laciné pro výrobu. Složení, tvar a rozměry piezoelektrického keramického prvku mohou být uzpůsobeny k jakémukoliv specifickému účelu. Keramiky vyráběné z modifikací zirkoničitanu olova/titaničitanu olova se projevují vyšší citlivostí a provozní teplotou než u podobných keramik. Keramiky *PZT* (*tuhý roztok oxidů* $PbZrO_3$ *a* $PbTiO_3$) jsou v současné době nejvíce používané keramické piezoelektrické materiály. Obecně piezoelektrika jsou vlastně dielektrika, jejichž struktura nemá střed symetrie a uspořádání atomů je nesouměrné.

Piezoelektrické materiály byly adaptovány na široké množství použitelnosti a jejich vlastností se využívá v nespočetně mnoha aplikacích. Přímý piezoelektrický jev se uplatňuje v různých snímacích členech sil, deformací atd. Nepřímý piezoelektrický jev se používá například při generování zvukových a ultrazvukových signálů v pevných látkách, kapalinách a podobně. Důležité použití je také pro tvorbu filtrů a piezoelektrických rezonátorů určených zejména pro stabilizaci kmitočtu přesných zdrojů kmitočtu a času. Nesporná výhoda většiny piezoelektrických zařízení je v absenci magnetického pole.

Základní rozdělení aplikací:

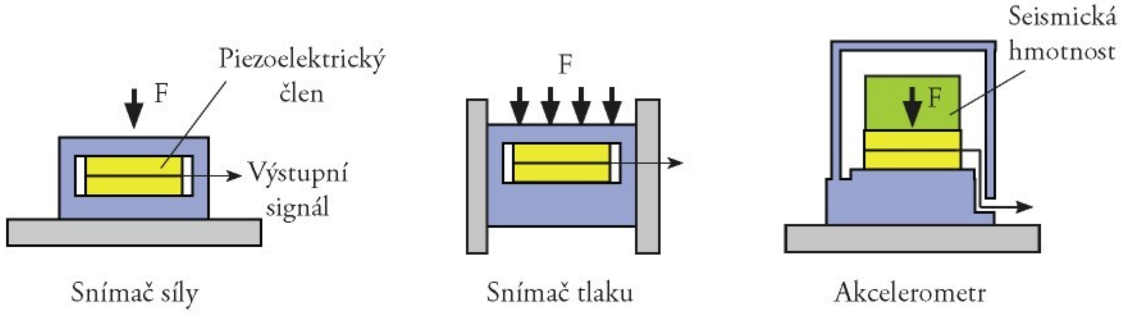
Generátory - generátory ve své podstatě realizují převod mechanické energie na energii elektrickou. Díky tomu, že silové působení na piezoelektrický materiál dokáže vyvolat dostateč-

ně vysoké napětí k překonání dielektrické pevnosti vzduchu dojde k přeskočení jiskry mezi elektrodami. Využití je především jako generátor elektrického náboje tj. zážehová vznětová jednotka motorů, část svařovacího vybavení a podobná zařízení. Piezoelektrické generátory jsou malé, jednoduché a mají výrazné výhody oproti podobným konvenčním systémům. Obr. 1.1.1 ukazuje princip piezoelektrického generátoru náboje. Obvykle se jedná o dva piezoelektrické válečky zapojené paralelně. Možné je také uchování elektrického náboje pomocí mnohovrstvých kondenzátorů principiálně podobných mnohovrstvým generátorům. Takové mnohovrstvé kondenzátory jsou pak vynikajícími bateriemi pevné fáze například pro napájení elektrických obvodů.



Obr. 1.1.1 - *Generátor elektrického náboje*

Snímače - princip snímačů je v převodu fyzikálních veličin jako jsou mechanické síly, posunutí apod. na elektrický signál. V některých případech fyzikální veličiny ovlivňují přímo piezoelektrický člen a nebo se využije povrchových (*SAW*) či objemových (*BAW*) akustických vln. Snímače často poskytují vizuální, zvukovou a nebo mechanickou odezvu na vstup snímače. Například čidlo umístěné v automobilovém bezpečnostním páse může snímat rychlé změny zrychlení. Typické snímače zrychlení, síly a tlaku jsou na obr. 1.1.2. Ve snímačích zrychlení se používá silového působení seismické hmotnosti, která je právě součástí těla snímače. Výsledná síla je pak jednoduše přepočítána podle druhého Newtonova zákona síly. Snímače síly a tlaku jsou velmi podobná zařízení a jejich princip spočívá ve vyvolání mechanického napětí v piezoelektrickém členu externí silou. Dalšími konkrétními aplikacemi pak jsou snímače viskozity, chemické rozbory apod. V hojné míře se využívá i teplotní závislosti frekvence nebo materiálových parametrů piezoelektrického materiálu pro snímače teploty.

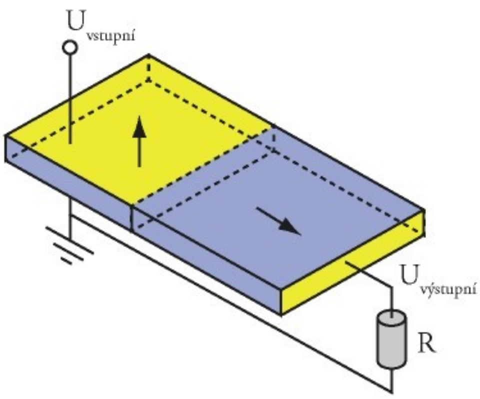


Obr. 1.1.2 - *Piezoelektrické snímače*

Měniče - jedná se o převod elektrické energie na energii mechanickou a hlavní rozdělení je podle frekvenční úrovně výstupu. Dělí se tedy na zvukové (*do 20 kHz*) - mikrofony, reproduktory, zvukové sirény, ultrazvukové (*nad 20 kHz*) - akustický hloubkoměr, elektrické motorky, měření vzdáleností, ultrazvukové čističky a vysokofrekvenční ultrazvukové (*vysoko nad 20 kHz*) - zpožďovací linky, přístroje ve zdravotnictví. Piezoelektrické měniče, které generují

mechanické vlny nabízejí opět zajímavé výhody v porovnání s elektromagnetickými zařízeními. Jsou jednoduché, kompaktní, vysoce spolehlivé a dokáží generovat zvuk s minimálními energetickými nároky. Protože existuje také obrácený piezoelektrický jev tak mohou měniče jak ultrazvukové vlny generovat tak i příchozí ultrazvukový signál současně přeměnit na signál elektrický.

Transformátory - Piezoelektrické transformátory disponují vůči elektromagnetickým transformátorům nízkou hmotností, malým objemem, lepší izolací a absencí elektromagnetického šumu. Svým příhodným tvarem jsou velmi vhodné pro miniaturizaci a vytvoření tak malého vysokonapěťového zdroje například pro studenou katodu fluorescenční lampy v mobilních počítačích apod. Princip piezoelektrického transformátoru Rosenova typu je na obr. 1.1.3. Vstupní elektrické napětí nepřímým piezoelektrickým jevem generuje mechanické kmity v jedné části transformátoru a protože se jedná o celistvou strukturu generují tyto kmity přímým piezoelektrickým jevem v druhé části elektrické napětí. Pro dosažení maximální účinnosti se transformátor provozuje při rezonanční frekvenci. Transformační poměr závisí na geometrických rozměrech, elektromechanických faktorech, mechanické jakosti materiálu a odporové zátěži.



Obr. 1.1.3: *Transformátor Rosenova typu*

Aktuátory - Použití aktuátorů má široké spektrum, ale charakterizuje je jeden společný znak a to ten, že slouží pro mechanický posun. Tato zařízení realizují převod elektrického signálu na mechanické posunutí nepřímým piezoelektrickým jevem. Dělí se z hlediska principu generování mechanického posunutí, síly a elektrického napájení do dalších kategorií. Další dělení a popis principů jednotlivých aktuátorů obsahují následující kapitoly. Například mezi nízkonapěťové aktuátory patří čtecí zařízení Braillova písma, aktuátory až s nanometrickými posuvy a mezi vysokonapěťové aktuátory zařízení pro vstřikování paliva do válců motorů a mnoho dalších.

1.2 Cíle dizertační práce

První část práce pojednává o rozdělení piezoelektrických aplikací - aktuátorů, od aktuátorů s vnitřním zesílením přes vnější zesílení až po zesílení frekvenční - motorky. Piezoelektrické motorky jsou rozděleny podle dvou zásadních kritérií a to podle způsobu buzení a podle funkce motorků. Další z kapitol obsahuje buzení piezoelektrických členů, kdy nejvyššího efektu v porovnání budících podmínek versus deformace vyznělo nejlépe pro obdélníkový průběh řídícího signálu. Pro další buzení byl použit výkonový měnič s dvěma obdélníkovými pulzy vzájemně posunutými tak, aby bylo možné docílit vybuzení stojaté nebo postupné elastické vlny.

Protože se také jedná o práci konstrukční bylo nutné všechny měřené motorky a jejich prototypy vyrobit. Pro hlavní funkci a to přenos deformací od piezoelektrických elementů do kovové části statoru byly testovány různé druhy lepidel a kvalita lepeného spoje v podobě kmitajícího unimorfu rezonanční metodou. Poté následovaly pokusy s lineárními motorky o dosažení postupné elastické vlny. Průběhy vln resp. jejich amplitudy byly měřeny fotonickou sondou MTI-2100 s rozlišením 0,1μm. Při různém buzení různého počtu elementů včetně pokusu o potlačení reflexních vln se stále průběh výsledné vlny jevil jako vlna stojatá. Nicméně se i pro vytvoření postupné vlny dá využít dvou vzájemně posunutých stojatých vln. Využit byl i princip stojaté vlny, kterého lze dosáhnout pouhou změnou budících podmínek výše zmíněnou interferencí. Z důvodu nerovnoměrnosti výsledného pohybu a nekontrolovatelných posunů do různých směrů byly na nožičky umístěny hliníkové válečky, které se již otáčely pouze dvěma směry a výsledný pohyb rotoru byl zajištěn. Lineární motorky prošly řadou modifikací ať už v podobě různých druhů materiálů nožiček tak třeba jejich různými profily. Funkce těchto motorků byla proměřena z pohledu velikosti budícího napětí, jak na rychlosti otáčení válečků tak i možného mechanického zatížení. Další razantní modifikací byla konstrukce lineárního motorku monobloku. Bohužel na polotovar, který byl k dispozici nebylo možné uspořádání několika řad PZT keramiky a tudíž se nedosáhlo většího zesílení piezoelektrického efektu důležitého pro výslednou elastickou vlnu.

Stejný princip jako u výše zmíněných lineárních piezoelektrických motorků byl zkoušen i na motorky rotační ovšem zde bez úspěchu. Hlavní příčina byla v použité kovové části statoru a ve vhodném materiálu pro rotor. Proto bylo přikročeno ke známým druhům rotačních motorků popsaných v kapitole 3, jejichž princip je v dostupné literatuře vysvětlen jako takzvaný *Wobble* pohyb. V podstatě záleží na tom, jak jsou piezoelektrické elementy buzeny a co se děje s těmi nezapojenými (pasivními). V teoretické části je vždy odvozena výsledná elastická vlna ve statoru. Přístup je pouze pro bodový kontakt rotoru a statoru. Uvažována je samozřejmě možnost šíření elastické vlny opět oběma směry. Výsledná elastická vlna ve statoru může mít podobu jak stojaté tak i postupné vlny v závislosti na druhu buzení. Do modelů bohužel z důvodu velké komplikovanosti není zahrnuto vzájemné ovlivňování výchylek statoru přes hřídelku rotoru. Také není zahrnut projev přímého piezoelektrického jevu pasivních elementů v podobě konstruktivní či destruktivní povahy. Pro teoretické chování motorků by do budoucna bylo například vhodné využití simulace metodou konečných prvků apod., kde by se tyto vlivy zahrnout daly. Prakticky byly sestrojeny čtyři rotační motorky, dva 2 kvadrantové a dva 4 kvadrantové dvou různých velikostí (různých materiálů statorů). U těchto rotačních motorků byla změřena závislost rychlosti otáčení na velikosti budícího napětí a druhu buzení včetně velikostí kroutícího momentu, kterého rotační motorky dosáhly.

1.3 Rozdělení aktuátorů

Jak již bylo zmíněno, piezoelektrické aktuátory se dělí na dvě hlavní skupiny, a to podle mechanického posunutí a elektrického napájení. Z hlediska mechanického posunutí se jedná o rozdělení na řádové hodnoty posunutí nanometrů, mikrometrů, milimetrů a výše. Elektrické napájení se rozlišuje na nízkonapěťové a vysokonapěťové. Samozřejmě aktuátory se dají rozdělit podle dalších různých vlastností, například podle toho na jakém principu fungují, použitém materiálu, vyvinuté síly apod. Rozdělení dle principu se zdá být tím nejlepším,

Kapitola 4

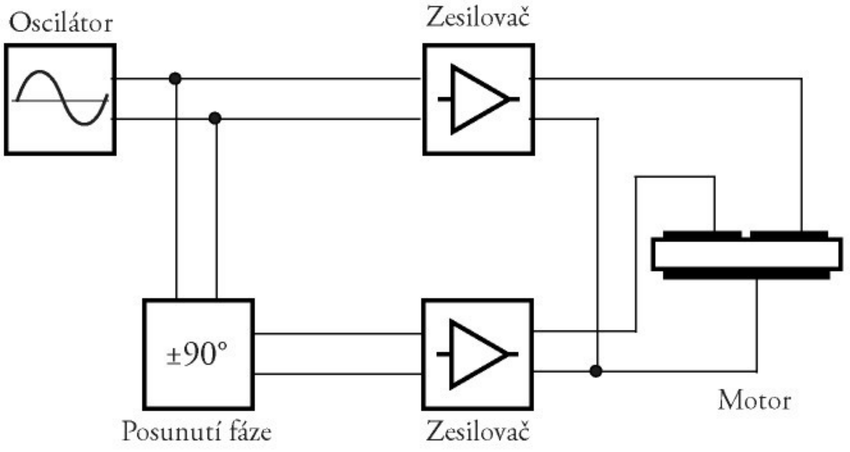
Řízení piezoelektrických motorů

Jelikož piezoelektrický prvek obecně je elektrický kondenzátor tak jeho funkce spočívá v tom, že přiložené elektrické pole tento kondenzátor nabije a poté v krátkém čase (ultrazvukové ≈ 50µs) tuto energii spotřebuje v podobě mechanického pohybu a tak stále dokola. Pro řízení piezoelektrických prvků je nutné vybudit piezoelektrický prvek vhodnými napěťovými signály z pohledu konstantní frekvence, fázového posunu a amplitudy. Standardně se používají dva harmonické signály s dostatečnou amplitudou elektrického napětí k vybuzení rezonance v piezoelektrickém prvku (pozor na elektrické proražení materiálu a depolarizaci) a s frekvencí odpovídající rezonanční frekvenci prvků fázově posunutých o $\pi/2$. Vzájemný fázový posun obou signálů záleží na rozmístění jednotlivých elementů, resp. na zachování spojitosti probíhající vlny a je nutné jej dopočítat. Ideální řídicí signál je ten, který má minimální harmonické zkreslení a ve frekvenčním spektru se tedy nevyskytují žádné další harmonické složky, které by ovlivňovaly buzení jiných módů piezoelektrického prvku, pokud to není principiálně vyžadováno. Existují dvě základní skupiny analogové ([16], [28]) a digitální, případně harmonické a neharmonické signály řízení.

Analogové

Realizace spočívá v jednoduchém zapojení oscilátoru se zesilovačem signálu a elektromagnetického transformátoru obr. 4.1. Průběh řídícího signálu je prostá harmonická funkce - sinus, kosinus. Jelikož rychlost rotoru (tvar eliptické trajektorie bodů statoru) je dána amplitudou řídicího signálu záleží tedy na stabilitě zesilovače. Další nevýhodou je velká teplotní závislost elektrických prvků zapojených v obvodu a problémy se zahříváním, které vznikají na základě nízké účinnosti řízení vysokovýkonových piezoelektrických prvků. Ovšem buzení

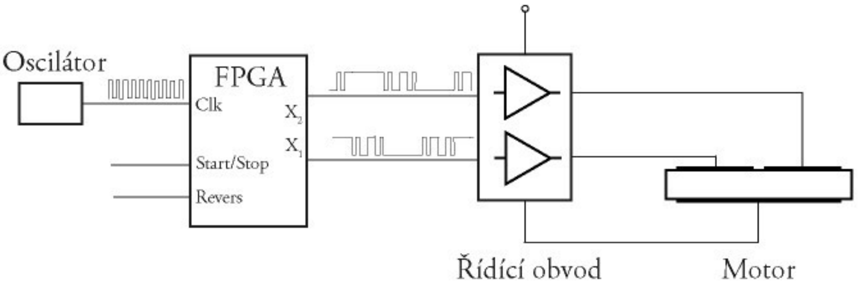
výše zmíněnou harmonickou vlnou má výhodu v tom, že ve frekvenčním spektru se nachází pouze jedna jediná harmonická frekvence a tudíž nedochází k ovlivňování buzení dalšími harmonickými složkami. Záměnou použitého transformátoru za piezoelektrický odpadá elektromagnetický šum. Piezoelektrické transformátory se navrhují k motorkům tak, aby měly co nejvíce stejnou pracovní frekvenci. To znamená, že se snažíme docílit podobného tvaru jak motorku tak transformátoru včetně stejného materiálu, který nám zaručí přinejmenším stejnou teplotní závislost.



Obr. 4.1 - *Zapojení řízení piezoelektrikého prvku*

Digitální

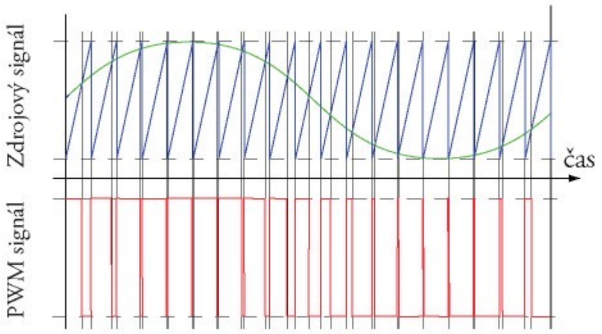
U digitálního řízení se ve své podstatě nahrazuje analogový harmonický průběh sekvencí napěťových pulzů. Nejjednodušším případem digitálního buzení je buzení prostým napěťovým pulzem [41]. Bohužel tento signál ve Fourierově spektru, na rozdíl od analogového harmonického signálu, má základní harmonickou frekvenci včetně dalších harmonických lichých násobků, které mohou ovlivnit buzení piezoelektrického aktuátoru. Jistým vylepšením náhrady spojitého signálu je použitím metody pulzní šířkové modulace - *PWM* obr. 4.2.



Obr. 4.2 - *Princip PWM generátoru*

Vlastní zapojení využívá FPGA (pole programovatelných hradel), kde je možné měnit šířku pulzů a docílit tak přesnějšího napodobení sinusového průběhu. Šířka pulzů závažným způsobem ovlivňuje i ostatní harmonické složky signálu ve frekvenčním spektru a vhod-

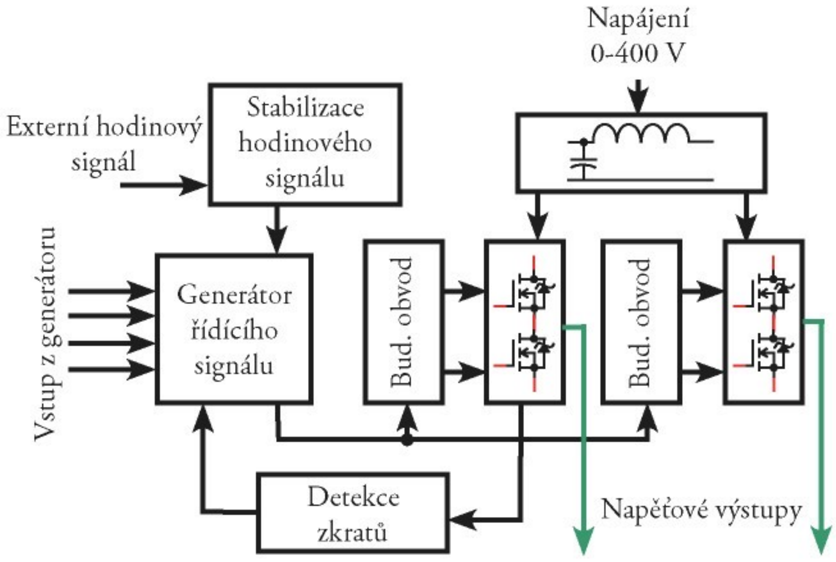
nou šířkou pulzů se dají potlačit právě nežádoucí složky. Pro přepínání pulzů se používají velmi rychle spínané tranzistory typu MOSFET. Například při budícím napětí piezoelektrického prvku frekvence 100 kHz odpovídající časové periodě 10 µs je nutné mít signál PWM o periodě 33 ns a čas spínání tranzistoru odpovídající 3,3 ns. Na první pohled je již patrné, že při takto krátkém čase spínání se projeví vliv náběžných a sestupných hran průběhu, což vede k problematickému řízení. Za tímto účelem se nejvíce používá modifikovaná pulzní šířková modulace, která má změnu délky trvání pulzů pouze pro potlačení nežádoucích harmonických složek. Samozřejmě stačí potlačit jen ty harmonické, které svou amplitudou mohou ovlivnit buzení aktuátoru a ostatní zanedbat.



Obr. 4.3 - *Příklad pulzní šířkové modulace*

Konkrétní řídící systémy

Jedním z řídících systémů piezoelektrických aktuátorů je systém univerzální (obr. 4.4). Výhodou tohoto systému je především jeho možnost řídit i neznámý piezoelektrický aktuátor (s různou impedanční zátěží převážně kapacitního charakteru) nastavením budícího napětí a frekvence. Budící frekvenci poskytuje externí funkční generátor a amplituda výstupního signálu je řízena ze stejnosměrného generátoru napětí. Obvod funguje na principu



Obr. 4.4 - *Blokové schéma univerzálního systému*

Kapitola 5

Materiálové vlastnosti komponent motorků

Klíčové problémy z hlediska funkce motorků jsou, mimo budících podmínek atd., použití co nejvhodnějších konstrukčních materiálů a pojidel z pohledu největších možných výchylek a nejnižších možných ztrát při přenosu mechanických deformací.

5.1 Kovová část statoru

Abychom dosáhli v daných podmínkách největší možné amplitudy elastické vlny musí být mechanické vlastnosti včetně rozměrů kovové a piezoelektrické části statoru shodné nebo alespoň velmi podobné. Piezoelektrická část statoru byla realizována na bázi keramiky APC880 (Piezokeramika, s.r.o., Libřice), která již z dřívějších měření vykazovala Youngův modul pružnosti 80MPa [116]. Měření modulů pružnosti keramik probíhalo rezonanční metodou na rezonátorech tvaru tenké tyčinky, kdy se z rezonanční frekvence podélných kmitů vypočetl elastický koeficient s^E_{11}, resp. Youngův modul pružnosti. Měření mechanických vlastností kovové části proběhlo měřením průhybu vetknutého nosníku. Za tímto účelem jsme měli k dispozici několik plechů s různými tvrdostmi převážně odlišných slitin od firmy Kovohutě Rokycany, a.s. Protože výroba plechů udává pro jejich materiálové vlastnosti velmi široký rozsah hodnot, museli jsme elastické vlastnosti změřit sami.

Označení plechu	Tvrdost	Tloušťka [mm]	Modul pružnosti [GPa]
Mosaz 70	2	0,16	57
Mosaz 63	3	0,20	59

Označení plechu	Tvrdost	Tloušťka [mm]	Modul pružnosti [GPa]
Cu	2	0,60	57
CuSn 6%	4	0,32	53
Invar	3	0,30	64
FeNi42	3	0,10	90
NiXD	3	0,25	180
Mosaz[1]	---	0,70	74

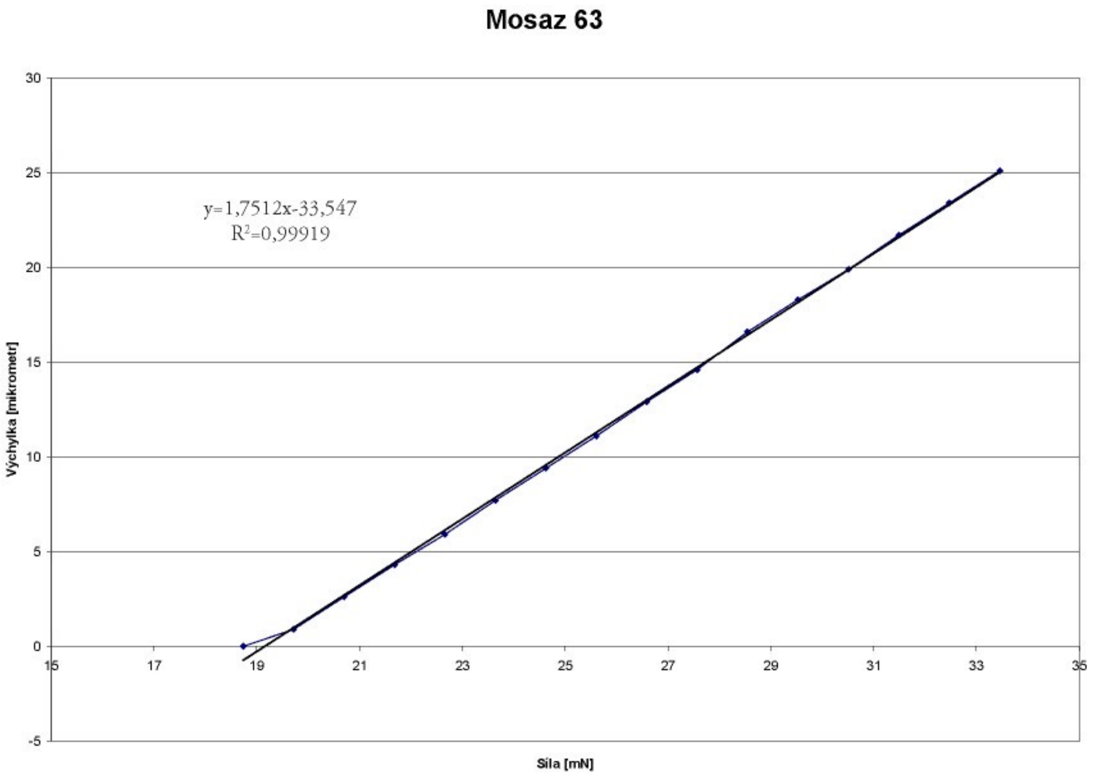
[1] - Použitý materiál od jiného dodavatele

Tab. 5.1.1 - *Změřené moduly pružnosti různých plechů*

Měření modulu pružnosti probíhalo na fotonickém senzoru MTI-2100, kdy známou proměnnou silou se plech v podobě vetknutého nosníku deformoval a měřila se výchylka na jeho konci. Protože profil průhybu vetknutého nosníku je

$$z = \frac{F}{EI_p}\left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right), \tag{5.A}$$

kde x je vzdálenost místa průhybu od upevnění, F je působící síla, E je Youngův modul pružnosti, l volná délka vetknutého nosníku a



Obr. 5.1.1 - *Závislost výchylky na zatěžující síle pro materiál Mosaz 63*

$$I_p = \int_S (z - z_n)^2 dS = \frac{1}{12} wt^3 \tag{5.B}$$

je moment setrvačnosti průřezu nosníku. z_n je souřadnice neutrální roviny, w šířka, t tloušťka a konečně průhyb na konci nosníku je

$$d = \frac{4Fl^3}{Ewt^3} \,. \tag{5.C}$$

Tudíž měření výše zmíněné dvojice výchylky a zatěžující síly lze lineárně aproximovat a Youngův modul pružnosti vypočíst ze směrnice k proložené přímky.

$$E = \frac{4l^3}{kwt^3} \tag{5.D}$$

Z výsledků modulu pružnosti je patrné, že nejvhodnějším materiálem ze zkoušených je slitina železo-nikl FeNi42. Bohužel výrobce nedodává malá množství materiálu, která by byla potřebná k výrobě piezoelektrického motorku a poskytnutý vzorek neměl dostatečné rozměry, především tloušťku, aby mohl být použit s dostupnými piezoelekrickými elementy. Proto pro konstrukci lineárních motorků bylo použito materiálu Mosaz uvedeného v Tab. 5.1.1., který byl k dispozici ve větších tloušťkách.

5.2 Mechanický kontakt mezi kovovou a piezoelektrickou částí statoru

Druhým problémem je nutné zajistit co nejefektivnější přenos kmitů ve statoru z piezoelektrického elementu na mosazný plech. Za tímto účelem byly testovány tři druhy dvousložkových 1) *Loctite 326*, 2) *3M Scotch-Weld DP810*, 3) *Loctite 3295* a dva druhy jednosložkových akrylátových lepidel 4) *Bondmaster F246* a 5) *RS 159-3991*. Test probíhal tak, že jsme pomocí těchto lepidel vytvořili kruhové unimorfní struktury a po dostatečném zatuhnutí lepidla jsme měřili jejich frekvenční spektra pro zjištění kvality rezonátoru. Kruhový tvar byl vybrán především z toho důvodu, aby se zohlednil přenos, jak podélných tak i příčných deformací. Rezonanční křivku lze obecně zobrazit jako závislost velikosti impedance či fáze na frekvenci. Tvar rezonanční křivky je závislý na činiteli jakosti Q_m (resp. závisí na indukčnosti a elektrickém odporu dynamické větve náhradního elektrického obvodu) a podle tohoto tvaru lze zjistit kvalitu rezonátoru. Čím větší je činitel, tím je rezonanční křivka „ostřejší" a tudíž má rezonátor nižší mechanické ztráty. Kvantitativně lze také určit tento činitel jako podíl rezonanční frekvence a šířky rezonanční křivky v polovině výšky (5.E).

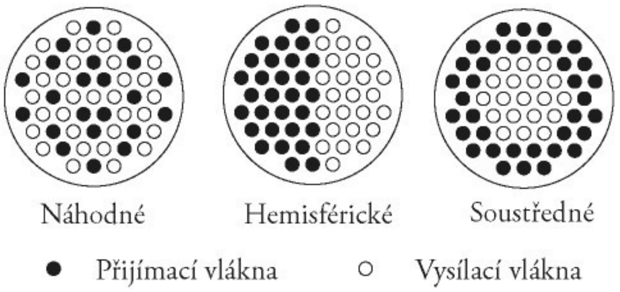
$$Q_m = \frac{f_0}{f_{50\%}} = \frac{f_0}{w} \tag{5.E}$$

Protože závislost reálné části elektrické impedance na parametrech obvodu (5.H) má tvar Lorentzovského pulzu lze ji tímto vztahem aproximovat (5.F). Aby bylo možné porovnat všechny vzorky je činitel jakosti vztažen ke dvěma rezonančním frekvencím (130 kHz a 3MHz), které odpovídaly rezonanční frekvenci radiálních resp. tloušťkovým kmitům samotného PZT elementu a ve většině naměřených frekvenčních spektrech jsou jasně viditelné.

Kapitola 6

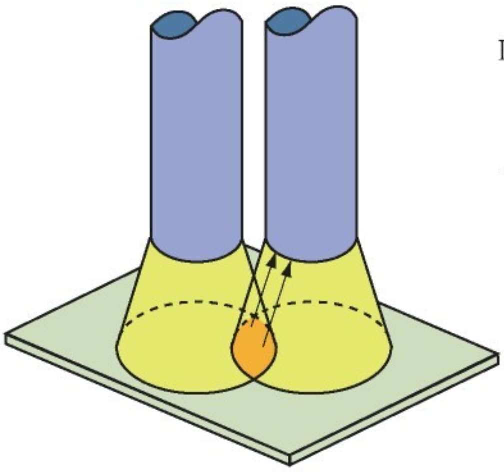
Měření amplitud elastických vln

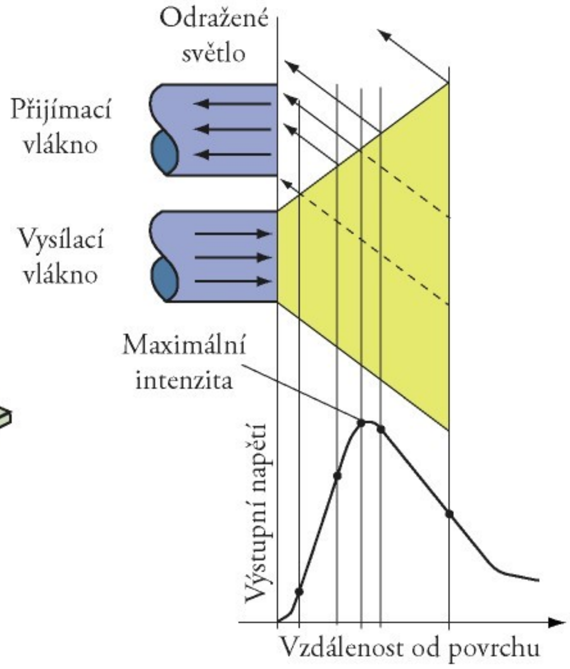
Jedním z důležitých měřených parametrů je amplituda výchylky stojaté a postupné vlny v piezoelektrického motorku především z důvodu zjištění tvaru vlny. Amplitudy kmitání se pohybují v řádech od 1 nanometru až do řádově 10 mikrometrů a je proto velmi efektivní použít optické sondy. V našem případě sondy MTI-2100 [203]. Princip je vysvětlený prostřednictvím obrázků obr. 6.1, obr. 6.2. Sonda disponuje několika světelnými vlákny z nichž je část vysílacích a zbylá část přijímacích viz rozložení (obr. 6.1). Různé rozložení vláken je vhodné pro různé povrchy měřených materiálů s různou odrazivostí apod.



Obr. 6.1 - *Uspořádání vláken v sondě*

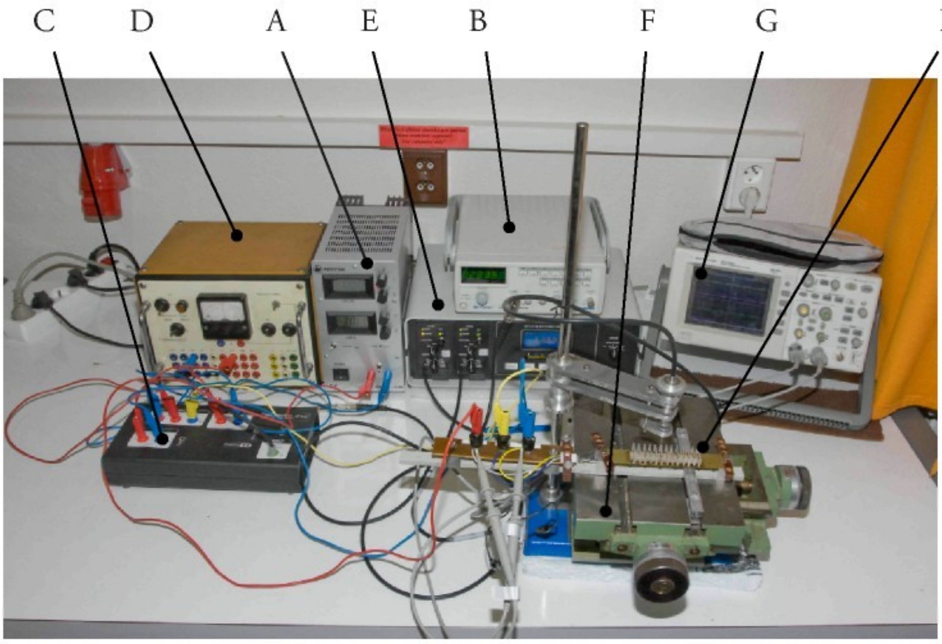
Zdroj světla wolframová halogenová žárovka vysílá světlo vysílacími vlákny, které se poté odráží od měřeného povrchu. Část odraženého světla se přenáší zpět přijímacími vlákny do snímače a měří se intenzita tohoto pohlceného světla. Na základě intenzity se poté přepočítává vzdálenost od povrchu. Jestliže je sonda v přímém kontaktu s povrchem tak se





Obr. 6.2 - a) *Princip sondy MTI-2100* b) *Pohlcování světla v závislosti na vzdálenosti od povrchu*

žádné světlo neodráží a výsledná intenzita je nulová. Jakmile se ovšem vzdálenost zvětšuje tak úměrnou část odraženého světla detekuje přijímací vlákno. Výsledkem je velmi citlivá lineární odezva vhodná pro měření (obr. 6.2b). Dalším zvětšováním vzdálenosti dosáhneme maximální hodnoty intenzity odraženého světla. Ještě dalším zvětšováním vzdálenosti přesáhneme tento bod a množství odraženého světla se začne snižovat. Tato oblast je vhodná pro měření větších vzdáleností. Na začátku každého měření je nutné sondu zkalibrovat z důvodu různé emisivity měřených povrchů materiálu právě na maximální intenzitu pohlceného světla. To je



Obr. 6.3 - *Měření výchylek piezoelektrických motorků*

Kapitola 7

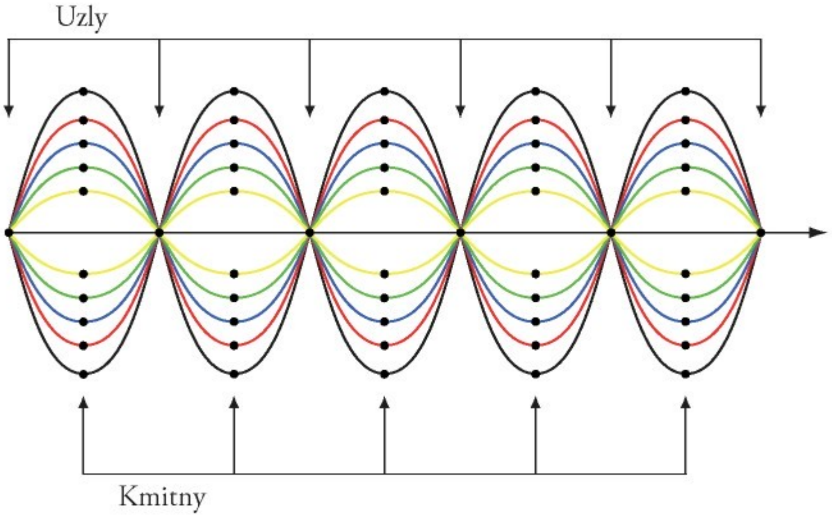
Lineární piezoelektrické motory

Stojaté a postupné elastické vlny

Ultrazvukové piezoelektrické motorky lze obecně provozovat jak na principu postupné tak na principu stojaté elastické vlny šířící se po povrchu. Motorky využívající stojatou vlnu jsou založeny na kombinaci ohybových, podélných či torzních kmitů piezoelektrického elementu. Sílu generovanou deformací elementů můžeme rozdělit na dvě složky. První tvoří sílu rovnoběžnou se směrem šíření bez které by se rotor (slider) nepohyboval a druhá část přispívá k velikosti síly normálové. Obě tyto síly, jak třecí tak přítlačná jsou na sebe kolmé. Na druhé straně u motorků s postupnou vlnou se vlna šíří v prostředí oběma směry. Takové vlny mohou být rozděleny na dvě základní kategorie. První jsou vlny Rayleighova typu, tyto vlny si lze představit jako určitou obdobu seismických vln. Druhým typem jsou vlny generované ohybem. Pro oba tyto typy se bude bod na povrchu pohybovat po eliptické trajektorii. A eliptický pohyb bodů je právě podstata motorů založených na bázi postupné elastické vlny.

Motorky se stojatou vlnou

Stojatá vlna, oproti postupné, vzniká interferencí dvou postupných vln s fázovým rozdílem 90°. Pokud tedy spolu interferují dvě vlnění - přímé a odražené, která postupují stejnou rychlostí opačnými směry, vzniká stojaté vlnění (obr. 7.0.1). Na zmíněném obrázku jsou různými barvami zachyceny výchylky vlnění v odlišných časových okamžicích.Stojaté vlnění se nepohybuje ani doleva ani doprava: polohy nulové a maximální výchylky se v čase nemění. Body, které kmitají s největší amplitudou, nazýváme kmitny stojatého vlnění. Naopak body, které mají stále nulovou výchylku od rovnovážné polohy, tj. nekmitají, nazýváme uzly stoja-



Obr. 7.0.1 - *Stojaté vlnění, pohyb bodů v čase*

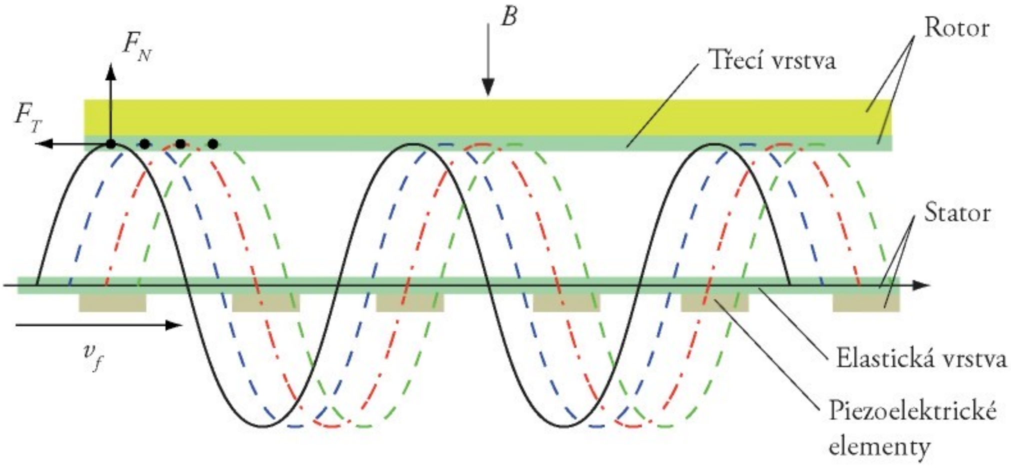
tého vlnění. Jestliže se pružným prostředím šíří vlnění ze dvou nebo více zdrojů, jednotlivá vlnění postupují prostředím nezávisle. V místech, kde se vlnění setkávají nastává interference a kmitání bodu v uvažovaném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění. Každé dva nejbližší uzly a každé dvě nejbližší kmitny jsou ve vzájemné vzdálenosti $\lambda/2$. Kmitna je vzdálena $\lambda/4$ od nejbližšího uzlu. Poloha kmiten a uzlů stojatého vlnění se nemění. Stojaté vlnění vzniká se stejnou frekvencí jako mají obě složené vlny.

Prvním krokem k porozumění principu motorků se stojatou vlnou je především v porozumění kmitání resp. vytvoření eliptického pohybu ve statoru. Mezi rotorem a statorem je víceméně bodový dotyk. Základní podmínka jednoho z principů stojaté vlny je v tom, že stator je vůči rotoru pod určitým úhlem a generuje tak eliptický pohyb (viz obr. 3.3.1.2).

Motorky s postupnou vlnou

Elastická vlna vytvořená kmitajícím elementem postupuje v materiálu po povrchu od zdroje kmitů na obě strany symetricky přičemž přenáší energii (obr. 7.0.2). Mechanismus, kterým vzniká postupná vlna je v podstatě tahová a tlaková mechanická interakce sousedních bodů materiálu statoru na které se podílí síla tlaková kolmá na směr pohybu a síla třecí rovnoběžná s pohybem. Šířící se vlna vytváří určitá místa s maximální a minimální výchylkou, která se periodicky opakují a jestliže má rotor kontakt se statorem (jakožto zdroje kmitů) pak tento kontakt je stálý v celém prostoru statoru, ale mění se místo dotyku. Unášení rotoru tedy je pouze v momentě kontaktu rotoru se statorem, kdy působí třecí síla. Nicméně generovaná vlna má obvyklé maximální výchylky ne více než řádu jednotek mikrometrů. Postupná vlna se v ideálním případě šíří až do okamžiku, kdy narazí na mechanickou překážku ať už v podobě upnutí, defektu materiálu apod.

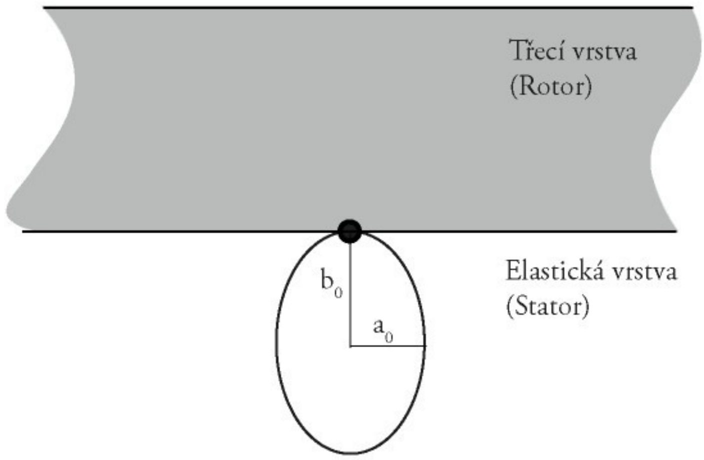
Velikost rychlosti rotoru, třecí síly či kroutícího momentu (u rotačních motorků) závisí především na styčných plochách rotoru, statoru - charakteristice použitého materiálu, amplitudě elastické vlny a jí příslušné frekvence. Jestliže budeme piezoelektrické elementy budit řídícím signálem tvaru harmonické funkce například



Obr. 7.0.2 - *Uspořádání USM*

$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t) \tag{7.A}$$

bude každý bod na povrchu statoru opisovat známou trajektorii elipsy (obr. 7.0.3). Doba oběhu po elipse odpovídá převrácené hodnotě frekvence elektrického buzení. Z toho důvodu je rychlost závislá na frekvenci buzení a amplitudě běžící vlny, takže rotor se pohne v ideálním případě maximálně o jeden obvod elipsy na jednu periodu budícího signálu. Rychlost motoru je poté úměrná amplitudě budícího napětí. Protože budící elementy jsou vyvýšené oproti celé podložce může se jednak negativně uplatnit vliv hran na výsledné vlnění v podobě nepatrných odrazů a také to, že se právě na zmíněné hraně může eliptický pohyb částic částečně zdeformovat. Nicméně dále předpokládáme, že budící signál a potažmo amplitudy výchylek piezoelektrických prvků jsou o dost větší než vzniklé odrazy na hranách.

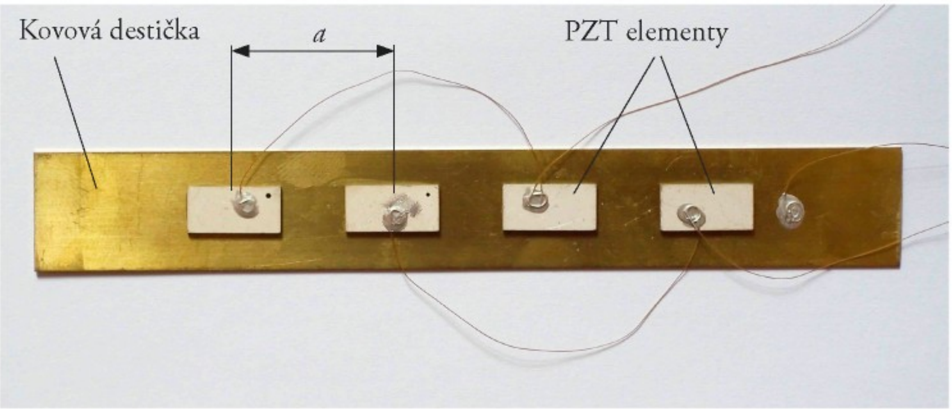


Obr. 7.0.3 - *Detail eliptického pohybu*

Při návrhu lineárního piezoelektrického motorku lze vycházet, jak již bylo uvedeno výše, ze dvou základních principů, a to postupné nebo stojaté elastické vlny. Tyto dva principy mají k sobě velice blízko avšak na druhou stranu existují mezi nimi značné rozdíly především v konstrukci.

7.1 Postupná elastická vlna

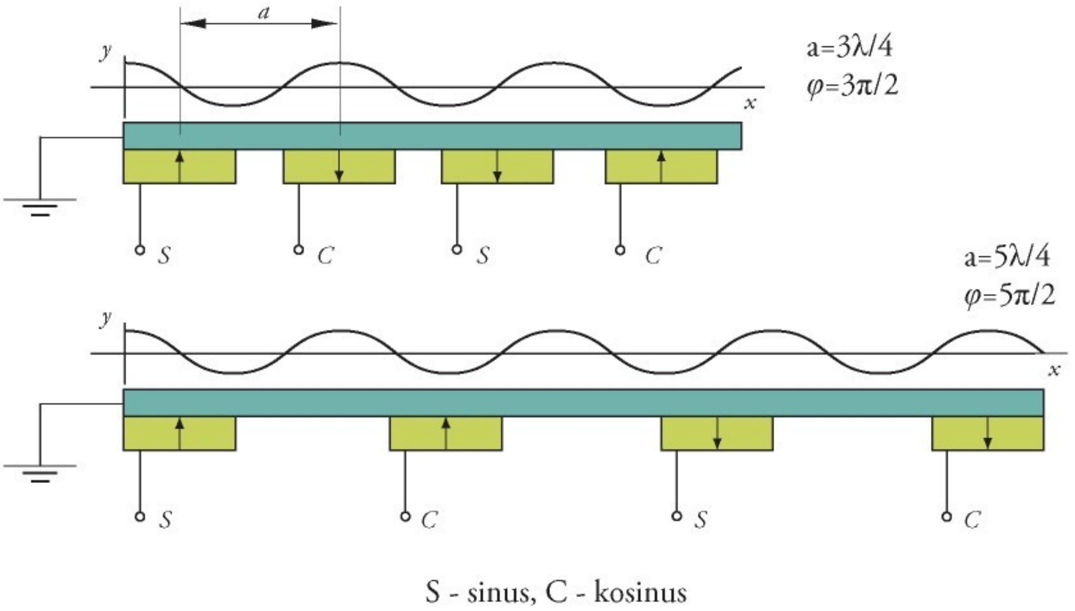
Postupná elastická vlna vzniká ve statoru díky podélným kmitům piezoelektrických elementů, které se nalepením na kovový plech mění na ohybovou deformaci a postupná vlna má základní tvar (7.A). První pokusy návrhu piezoelektrického motorku byly realizovány podle jednoduchého principu vytvoření jedné postupné elastické vlny ve statoru třením unášející rotor (viz obr. 7.1.1). Zde je nutné mít rozmístění piezoelektrických elementů v přesných vzdálenostech a s přesným fázovým rozdílem budícího signálu φ tak, aby byla zachována kontinuita generované vlny. S tím také souvisí i správná polarizace elementů. Vzdálenost jednotlivých elementů a však, vzhledem k útlumu elastické vlny v pružném prostředí, nemůže být libovolně velká.



Obr. 7.1.1 - *Stator lineárního motorku*

Následující podmínky vycházejí především z předchozího tvrzení nekonečně dlouhého statoru a jsou vztaženy k vlnové délce. Proto nejmenší možná vzdálenost středů elementů při které nedochází k nutné modifikaci řídícího signálu je $a=5\lambda/4$. Fázový rozdíl signálů je poté $\varphi=\pi/2$ (viz. obr. 7.1.2) [152]. Problémy s napájením se rozumí především fázový rozdíl, který je dán jako násobek $\pi/2$. Pro další možnosti uspořádání mimo zmíněného limitního případu $\lambda/4$ volíme délku elementů jako $\lambda/2$. Proto také vzdálenosti středů elementů jsou lichými násobky čtvrtiny vlnové délky a jím odpovídající fázový posun stejného lichého násobku poloviny čísla π. Samozřejmě existuje spousta dalších možností kombinace fázového posunu a odpovídající polarizace elementů. Počet elementů není pevně stanoven. Tloušťka elementu by také měla co nejvíce odpovídat tloušťce kovového plátku pro co největší dosažitelnou amplitudu generované vlny z důvodu vhodného mechanického přizpůsobení. Druhou částí, většinou rotorem, se myslí posouvaný materiál s konstantní mechanickou tuhostí. Funkce obou částí se ovšem dají i zaměnit a ze statoru se může stát rotor a z rotoru stator například jako část podložky, například položením aktuátoru na podložku.

Hlavním cílem bylo najít optimální konfiguraci tak, aby se dosáhlo takové postupné vlny, která by dokázala pohnout rotorem. Faktorů, které mohou ovlivnit výslednou vlnu je celá řada. Proto experimenty byly zúženy na tyto parametry: různé vzdálenosti, tloušťky, orientace, elektrické buzení piezoelektrických elementů a upnutí celého statoru.



Obr. 7.1.2 - *Možné rozmístění PZT elementů*

První pokus byl jako na obr. 7.1.1, na mosazný plech o rozměrech 252x20x0,4mm byly ve vzdálenosti 38mm od sebe umístěny ve směru většího rozměru piezoelektrické destičky s rozměry 14x7x1mm. Budící signál měl tvar obdélníkových pulzů o amplitudě 90V a polarita destiček byla uzpůsobena tak, aby se zachovala návaznost běžící vlny a stator byl volně položený na podložku. Tento pokus bohužel výsledek v podobě postupné elastické vlny nepřinesl, bylo to přisuzováno špatným vzdálenostem mezi jednotlivými elementy. Proto bylo provedeno několik dalších pokusů s tím samým principem, nyní ovšem s piezoelektrickými tyčinkami (APC880 17x3,75x1mm) umístěných kolmo k délce plechu. Vzdálenosti byly samozřejmě liché násobky $\lambda/4$, resp. $3\lambda/4$ a $5\lambda/4$ ze znalosti rychlosti šíření akustických vln v mosazi obr. 7.1.2. Experimenty probíhaly opět hledáním rezonanční frekvence a tudíž i maximální výchylky statoru. Pro zvýšení efektu přenášených deformací ze statoru na rotor byla vytvořena i konstrukce složená ze dvou statorů při čemž se oba dotýkaly kovovými částmi. Mezi nimi byl umístěn rotor v podobě papíru či látky. Při buzení statoru se piezoelektrické elementy deformovaly a při nižších budících frekvencích bylo slyšet jimi generované zvukové vlnění. Tím pádem docházelo k určité deformaci statorů, ale výchylky na statoru byly sondou neměřitelné a pro posun rotoru nedostatečné. Musely tak přijít další experimenty tentokrát už s mosazným plechem stejné tloušťky jako piezoelektrické elementy. Zmenšená byla i šířka plechu na rozměr blížící se šířce piezoelektrické destičky proto, aby nemusel být zbytečně ohýbán nepokrytý kousek plechu. Zde již určité výchylky sonda změřila a mohlo se postupovat v měření charakteru výsledné vlny pro různá uspořádání.

Prvním z řady uspořádání elementů na plechu je umístění jednoho elementu (segmentu), jmenovitě u statorů s označením MI a MII.

MI - mosazný plech o rozměrech 160x10x1mm, piezoelektrický element APC841 (d_{31}=109.10^{-12} m/V) 14x7x1mm umístěný uprostřed (příloha A). Stejně symetricky byl i upnut celý stator do držáku mezi gumové podložky pro tlumení odražených běžících vln. Postupně byly změřeny výchylky vlny pro 4 různé frekvence a tři různá upevnění. Dvě z

frekvencí se blížily vlastní mechanické frekvenci ohybových kmitů samotného plechu tj. 83,61Hz, resp. 137Hz a dvě z oblasti vysokofrekvenční 40 a 80kHz. Výsledkem byla stojatá vlna s amplitudou ne větší než 12μm s uzly v místech upevnění a nad samotným segmentem. Vzhledem k symetrickému upevnění byly i naměřené vlny v podstatě symetrické včetně jejich dvou kmiten.

MII - mosazný plech s rozměry 160x20x0,3mm, piezoelektrický element APC850 (d_{31}=175.10^{-12} m/V) 18x13x0,25mm vyříznutý z disku byl umístěný uprostřed. Výsledek měřením výchylek statoru byl téměř identický s rozdílem nepatrného náznaku uzlu nad segmentem a amplitudy až 30μm při frekvenci 141Hz.

Z měření se dala vydedukovat závislost menší či větší amplitudy vlny na délce statoru. V místě nalepených segmentů je v podstatě stator natolik zpevněn, že se zde elastická vlna i více tlumí. Přičemž v blízkosti vlastní rezonanční frekvence samotného plechu je amplituda zhruba 10ti násobná oproti ostatním frekvencím. U statoru MII nejsou obě vrstvy stejné tloušťky a nejsou tedy optimálně mechanicky přizpůsobeny proto také vykazuje jiné chování vzniklé vlny.

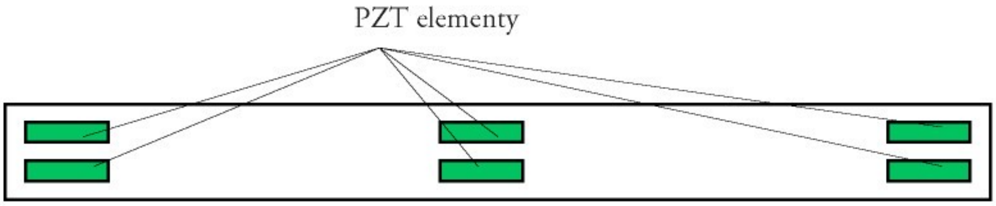
Pokusem, kde by bylo možné zjištění, zda se podařilo vytvořit jedinou běžící elastickou vlnu, bylo uspořádání dvou segmentů na stator.

MIIx - mosazný plech 160x10x1mm, piezoelektrické segmenty APC880 (d_{31}=142.10^{-12} m/V a d_{31}=149.10^{-12} m/V) 17x3,75x1mm umístěny symetricky ve vzdálenostech 5 (MIIA), 10 (MIIB), 15mm (MIIC). Polarity obou segmentů byly opačné a budily se dvěma obdélníkovými signály fázově posunutými o $\pi/2$. Buzení vyššími frekvencemi dává prostor různým reflexím a tudíž i různým interferencím generovaných a odražených vln. V případě dvou segmentů záleží také na jejich rozteči. Samozřejmě při menší rozteči se výsledná vlna tlumí daleko více kvůli mechanickému zpevnění než při rozteči větší a záleží velkou měrou i na budící frekvenci. Při nižších frekvencích je tomu jako u jedno-segmentového statoru (sken povrchu je bez výrazných skoků). Skenování povrchu bylo prováděno i pro nesymetrické upevnění. Vzhledem k nesymetrickému upevnění piezoelektrických elementů se vytvoří uzly a kmitny na jiných místech.

MIIIA - stator byl vytvořen ze stejných struktur jako MII ale se třemi piezoelektrickými segmenty. Výsledky měření opět prokázaly stojatou vlnu s uzlem nad prostředním elementem a kmitnami nad elementy krajními jako u zmíněného statoru. Způsob zapojení buzení na průběh vlny neměl téměř žádný vliv. Při frekvenci 666,7Hz byla největší amplituda výsledné vlny 65μm@70V. V řádově ultrazvukových frekvencích nebylo možné sondou výchylky změřit.

MIV - celá struktura byla stejná jako v předchozích případech s dalším piezoelektrickým elementem. Podobné byly i průběhy elastické vlny. Ale vzhledem k tomu, že byl přidán další element amplituda kmitny vzrostla až na 70μm při pouhých 50V. Rozdíl ovšem byl při uvolnění jednoho konce statoru při kterém nedocházelo k tak masivnímu tlumení uprostřed struktury. Při různém buzení nebo absenci buzení některých z elementů se již projeví pokles amplitudy.

MV - k dalšímu možnému zvýšení amplitudy kmiten byly použity 2 paralelně nalepené elementy stejného materiálu (3 sériově), kde i při maximálním použitém napětí 70V, frekvenci 335Hz byla amplituda vlny jen 50μm a ke zvýšení nedošlo (obr. 7.1.3).



Obr. 7.1.3 - *Paralelně nalepené PZT elementy*

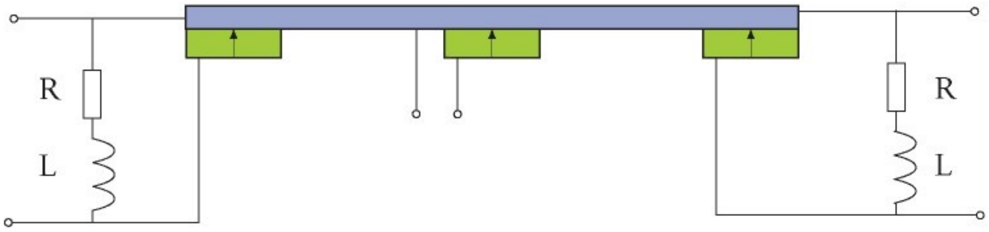
Bohužel, jak se ukázalo, tento princip buzení postupné elastické vlny pomocí rozmístěných PZT elementů v takovéto podobě je podle výsledných měření vhodný pouze pro nekonečně dlouhý stator nebo pro využití stojaté vlny s řádově 10 μm. A to především z důvodu interference odražených elastických vln. Určitou modifikací ovšem lze alespoň částečně tento problém vyřešit. Protože chceme zamezit odrazům generované postupné elastické vlny je možné její energii vhodně disipovat. Disipace je založena na přímém piezoelektrickém jevu, kdy je stator složen z několika částí. První část nacházející se ve středu statoru tvoří piezoelektrické elementy, které nepřímým piezoelektrickým jevem generují postupnou vlnu. Další dvě části taktéž složené z piezoelektrických elementů se nalézají na koncích statoru a vygenerované mechanické kmity se pomocí jich transformují na energii elektrickou. Poté již stačí pouze tuto energii odvést od elementů a přeměnit ji například přes připojený elektrický odpor nebo účinnější RLC obvod na teplo. Při řešení disipace pouze s odporem se vychází ze vztahu impedance vzorku, kdy pro maximální efekt se jí musí přiložený elektrický odpor rovnat. I přes experimentální odzkoušení různých odporů se ale vlna stále chovala jako stojatá s následující amplitudou ve středu statoru.

Připojený odpor [Ω]	Výchylka [μm]
4M	12,9
3,4M	12,9
800k	13
100k	12,3
50k	12,4
25k	12,4
10k	12,4
5k	12,4
2,5k	12,5
1k	12,6
500	12,6
200	12,6
100	12,6
50	12,5

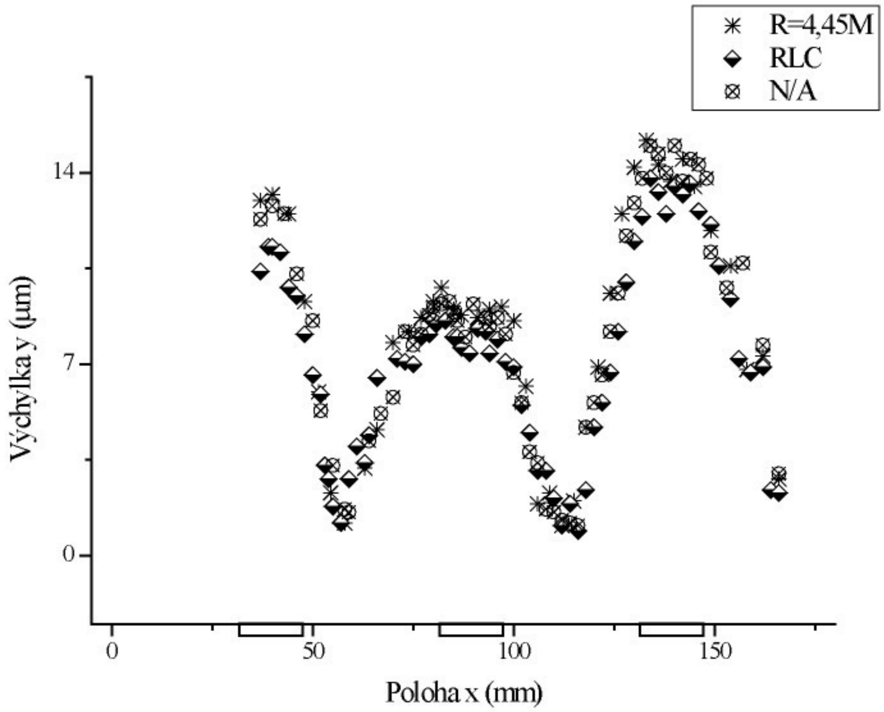
Připojený odpor [Ω]	Výchylka [μm]
0	12,3

Tab. 7.1.1 - *Připojené elektrické odpory při potlačení vln*

Řešení pomocí RLC obvodu je o něco složitější. Jedná se o paralelně zapojený obvod k piezoelektrickému vzorku. Vlastní vzorek plní úlohu kondenzátoru a je nutné přidat elektrický odpor a indukčnost v podobě cívky. Většinou se provádí tak, že máme dva pevné prvky (R, C) a obvod se ladí přes indukčnost. Charakter jednotlivých prvků se dá vysvětlit na závislosti proudu (napětí) na frekvenci. Přidaným odporem se řídí amplituda rezonanční křivky, indukčností frekvenční posun a zároveň šířka křivky rezonance. Kapacita piezoelektrického vzorku pak mění rezonanční frekvenci. K dispozici byly ovšem pouze tyto indukčnosti 3,3 a 33μH. Na nepájivé pole se tedy přidal potenciometr a vždy jedna z indukčností (obr 7.1.4). Ale ani zde se potlačení reflexních vln nepovedlo a výsledná vlna byla stojatá (obr. 7.1.5). O charakteru vlny se lze přesvědčit i posypáním statoru práškem (krupičkou) po jehož aplikaci se vytvoří Chladniho obrazce.



Obr. 7.1.4 - *Zapojení do RLC obvodu*

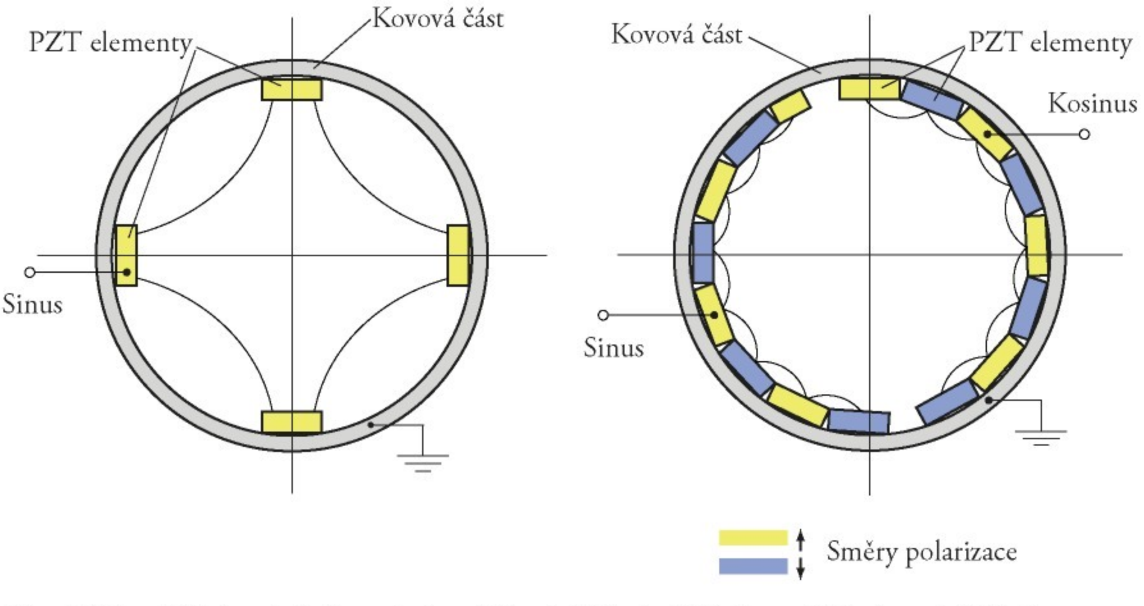


Obr. 7.1.5 - *Výchylky při pokusu o potlačení reflexí*

Kapitola 8

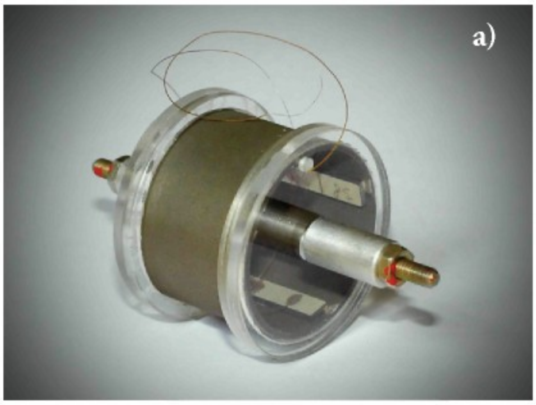
Rotační piezoelektrické motory

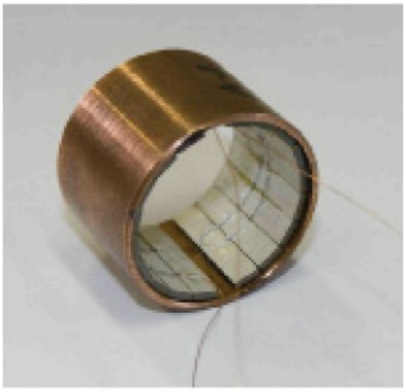
Konstrukce rotačních piezoelektrických motorků je ve své podstatě stejná jako u lineárních ovšem s tím rozdílem, že je nutné počítat s oběhem generované elastické vlny. Protože zde nehrozí odrazy vlny z důvodu konečné délky statoru můžeme považovat šíření za šíření v nekonečně dlouhém pružném prostředí. Tudíž je nutné zajistit správnou návaznost obíhající vlny především rozmístěním piezoelektrických elementů a jejich buzením.



Obr. 8.0.1 - *a) Stator rotačního motorku s 90° uspořádáním b) Stator se střídavým uspořádáním*

Prvním pokusem je prototyp s piezoelektrickými elementy rozmístěnými po 90° (obr. 8.0.1a). Stator tvoří kovová trubka ve které jsou nalepeny právě elementy po kvadrantech. Vzhledem k rozmístění je zapotřebí pouze jednofázového buzení. Popřípadě použitím více elementů nebo různého rozmístění bude napájení již vícefázové. Naladěním budící frekvence na frekvenci podélných kmitů elementů je generována elastická vlna s maximální amplitudou. Průměr kovové části statoru však musí odpovídat budící frekvenci jinak je spojitost elastické vlny znemožněna. Jinou možností vhodné konstrukce je mít kovovou trubku určitých rozměrů a úměrně jim zmenšovat délku piezoelektrických elementů na příslušnou rezonanční frekvenci podélných kmitů. Druhou část tvořící rotor je v podobě opásaného tělesa nebo nosníku relativně malých rozměrů uložený tangenciálně vůči statoru. Použity byly 4 elementy PZT keramiky APC880 s rozměry 17x3,75x1mm a kovová část z bronzu o průměru 25mm a tloušťkou 1mm. Při měření se ale ukázalo, že takové uspořádání resp. piezoelektrické elementy vygenerují výchylku trubky téměř nulovou (<0,1μm) a tím pádem vlna nemá potřebnou amplitudu pro pohyb rotoru.





b)

Obr. 8.0.2 - *a) Čtyř segmentový b) více segmentový motorek*

Odlišný princip (obr. 8.0.1b, obr. 8.0.2b) je založen na dvou sadách piezoelektrických elementů opačné polarity a buzených fázově posunutými signály. Je to v podstatě obdoba principu motorků lineárních. Opět jedna sada elementů, vzhledem k tomu, že se vlna šíří na obě strany generuje stojaté vlnění. Druhá sada generuje stejnou stojatou vlnu ovšem s fázovým posunutím $\pi/2$, složením obou generovaných vln by se mělo docílit vlny postupné. K vytvoření postupné elastické vlny je taktéž nutné piezoelektrické elementy se stejnými budícími podmínkami mít posunuté o $\lambda/4$. Znovu byly použity PZT elementy a kovová trubka stejných rozměrů a materiálu, ale tak jako v předchozím případě byla amplituda vlny nedostatečná.

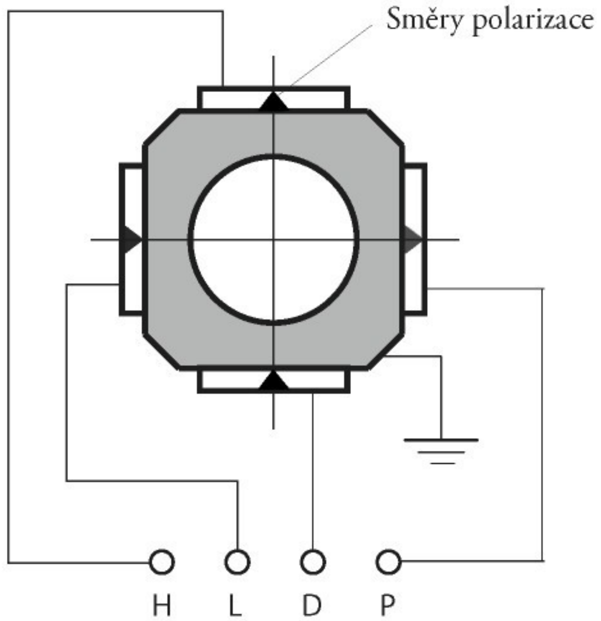
Další použité principy pro rotační piezoelektrické motorky popisované jako motorky s postupnou vlnou vychází z uspořádání uvedeného v kapitole 3 (obr. 3.3.2.2, obr. 3.3.2.3). U těchto konstrukcí motorků se vždy mluví o takzvaném „wobble“ pohybu, který je vždy popsán jen jako prostý ohyb trubky podobný pohybu „Hula-hoop“. Tento pohyb, resp. směr pohybu dosahují v

Obr. 8.0.3 - *Různé druhy rotačních motorků*

buzení buďto (obr. 3.3.2.2) buzení prvního či druhého elementu nebo v případě principu na obr. 3.3.2.3 je to buzení dvou na sebe kolmých elementů vždy stejného řídícího signálu. Jestliže se ale začnou budit piezoelektrické elementy různými budícími signály můžeme dosáhnout *stojaté* nebo *postupné* elastické vlny ve statoru. Aby se dala celá problematika smysluplně teoreticky popsat (především výpočet výsledné elastické vlny ve statoru) je nutné mít několik předpokladů. Prvním je fakt, že při deformaci piezoelektrického elementu se vlna jím způsobená šíří ve statoru oběma směry. V případě buzení signálem v podobě harmonické funkce kosinus jež je funkcí sudou lze změnit pouze jeho argument pro směr šíření. Na druhé straně při buzení funkcí sinus je také nutné změnit argument funkce pro opačný směr, ale ještě navíc je nutný posun celkové fáze o π tak, aby se zachovala spojitost buzené elastické vlny. Za druhé předpokládáme vlnu vybuzenou jedním piezoelektrickým elementem s vlnovou délkou odpovídající obvodu statoru. Tudíž ať už je buzení buďto sinem nebo kosinem tak na délce statoru vznikne elastická vlna jedné vlnové délky. Důležité je také rozlišovat budící frekvenci a frekvenci oběhu vlny, což jsou dvě různé věci. Jestliže zvýšíme budící napětí tak ten samý bod na statoru nyní musí urazit podstatně delší dráhu ovšem za stejný čas a tím pádem je rychlost otáčení vyšší. I za této situace považujeme vlnovou délku elastické vlny rovnu délce rotoru. Synchronizace buzení piezoelektrických elementů se totiž nezmění.

8.1 Čtyř kvadrantový rotační motor

Popis tohoto motorku byl již uveden a první modifikací bylo sražení hran statoru pro lepší mechanické přizpůsobení a zabránění disipace energie v těchto místech. Stejné přizpůsobení se realizovalo i u lineárního motorku zmenšením šířky statoru. Dále se zaměříme na buzení elastické vlny následujícího uspořádání (obr. 8.1.1) s příslušnými směry polarizace. Při buzení pouze jednoho elementu řídícím signálem tvaru jedné z harmonických funkcí sin či cos vznikne ve statoru stojatá elastická vlna. Vytvořená vlna má svou určitou amplitudu, která je menší než v konfiguraci zapojení s více elementy a má také menší frekvenci otáčení.

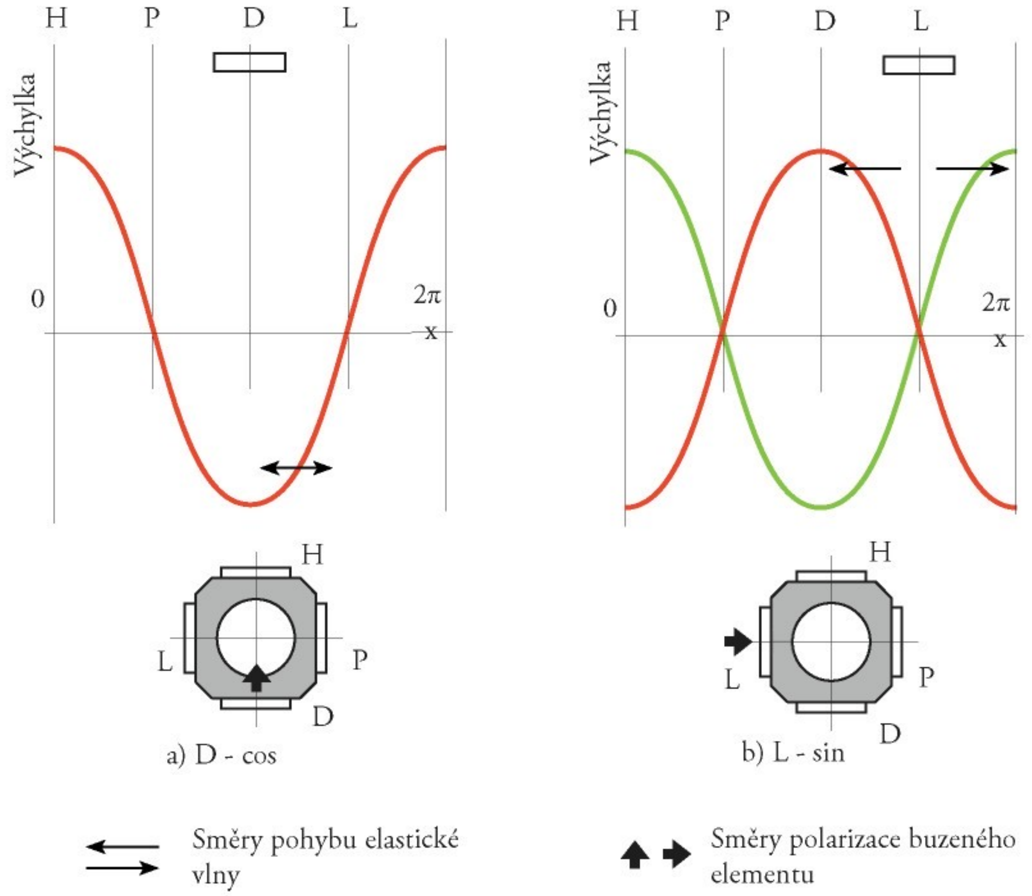


Obr. 8.1.1 - *Schéma rotačního motorku*

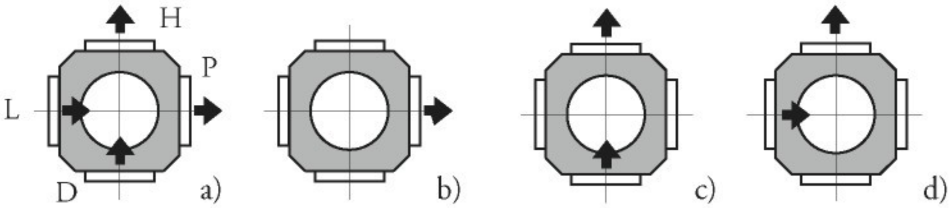
V případě buzení dvou elementů se již princip rozděluje vzhledem k typu buzení každého z nich na případy stojaté a postupné vlny (obr. 8.1.2), kde se rozdíl fáze pohybu realizuje prostorovým posunutím. Rozdělení vystihuje tabulka 8.1.1. Tvrzení, které popisovalo vyšší výchylky při použití většího počtu elementů ať z důvodu zvýšení výchylky superpozicí dalších vln nebo zesílení mírně tlumené elastické vlny je podpořeno naměřenými hodnotami otáček v závislosti na počtu buzených elementů.

Stojatá vlna	**Postupná vlna**
L - sin	H,P - cos, sin
D - cos	H,L - cos, sin
P,L - cos, cos	H,P,D - cos, cos, sin
H,D - cos, cos	H,P,D - cos, sin, cos
H,D - cos, sin	H,P,D - cos, sin, sin
H,P - cos, cos	H,P,D,L - sin, cos, sin, cos
H,L - cos, cos	
H,P,D - cos, cos, cos	
H,P,D,L - cos, cos, cos, cos	

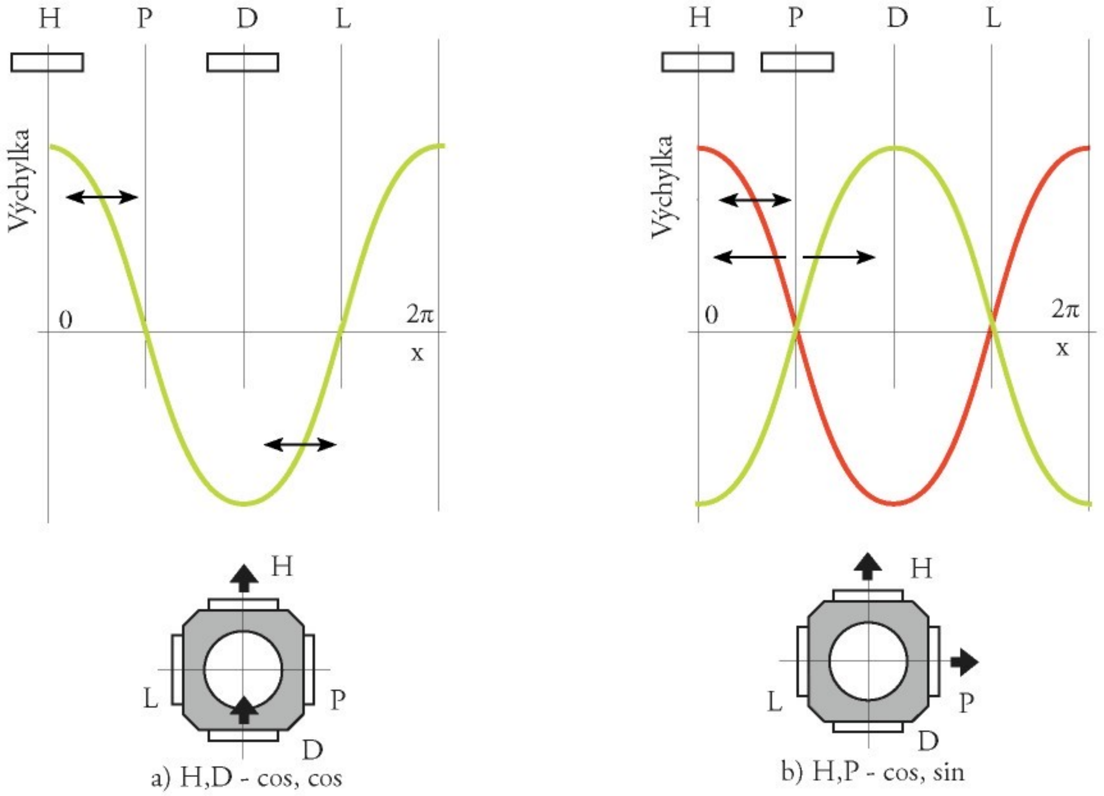
Tab. 8.1.1 - *Stojatá vs. Postupná vlna - měřená buzení*



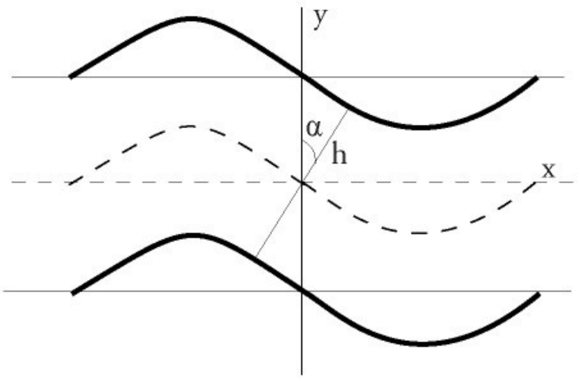
Obr. 8.1.2 - *Průběh elastické vlny a výchylky ve statoru při buzení a) D-cos, b) L-sin*



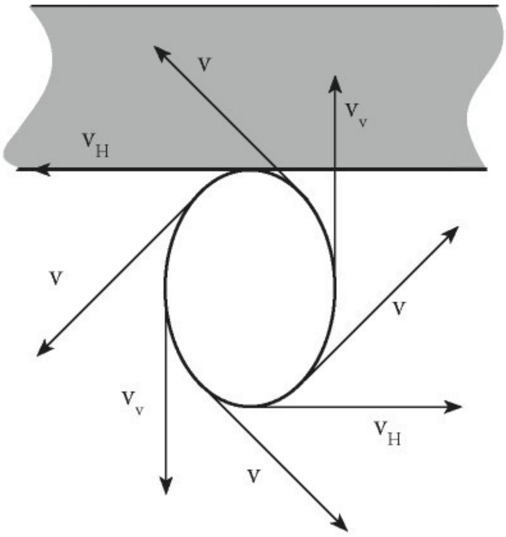
Obr. 8.1.3 - *Příklady výchylek statoru a) H,P,D,L - c, s, c, s; b) P - c c) H, D - c, c; d) H, L - s, c*



Obr. 8.1.4 - *Průběhy buzení 2 segmentů*



Obr. 8.1.5 - *Určení x-ové složky výchylky bodu na statoru*



Obr. 8.1.6 - *Rozložení rychlostí bodu statoru*

V prvním přiblížení budeme předpokládat pouze přímkový styk rotoru a statoru a pokusíme se o určité teoretické přiblížení vzniklé vlny a výpočet rychlosti rotoru. Základem je zde určení vzniklé vlny interferencí vln od každého ze zapojených elementů. Tu určíme na základě známého fázového posunu a polarizace generovaných vln a to v obou směrech. Vzniklá výsledná vlna je ovšem výchylka elastické vlny pouze v příčném směru vůči směru šíření. Abychom zjistili výchylku v podélném směru musíme uplatnit derivaci resp. tečny vůči vzniklé vlně viz obr. 8.1.5.

$$x(t) = h\frac{dy}{dx}\ , \tag{8.A}$$

kde h je polovina tloušťky statoru.

Tento vztah předpokládáme pro malé hodnoty úhlu α, kdy

$$\sin(\alpha) \cong \alpha \qquad \cos(\alpha) \cong 1 \tag{8.B}$$

Ze znalosti horizontální souřadnice bodu statoru x lze určit i rychlost v tomto směru jako časovou derivaci a jedná se tedy o rychlost v horizontálním směru v_H,

$$v_H = \frac{dx(t)}{dt}\,. \tag{8.C}$$

V případě, že tedy uvažujeme pouze přímkový resp. bodový dotyk obou částí motorku a zanedbáme prokluz mezi rotorem a statorem bude unášivá rychlost rotoru shodná s horizontální velikostí rychlosti na vrcholu vlny (elipsy). Tato horizontální rychlost v tomto bodě nabývá své maximální rychlosti a výpočet lze provést přes výpočet lokálního extrému funkce horizontální rychlosti. Výše zmíněné výpočty obsahuje následující tabulka 8.1.2, kde jsou zaznamenány horizontální rychlosti včetně maximálních hodnot v_{Hmax} podělených veličinami h, ω, k, A (h - poloviční tloušťka statoru, ω - úhlová frekvence, k - vlnový vektor, A - amplituda elastické vlny).

U tohoto motorku ale rozeznáváme výslednou stojatou a postupnou vlnu. U stojaté vlny je maximální hodnota horizontální rychlosti v místě kmitny na statoru, protože bod statoru v tomto místě musí za stejný čas urazit větší dráhu než např. v blízkosti uzlového bodu a tudíž musí dosahovat i maxima rychlosti. Postupná elastická vlna nemá uzly ani kmitny a každý bod na statoru se po určitém čase dostane do maximální amplitudy a odpadá zde závislost na poloze x.

Buzení	Příčná výchylka y/A	Horizontální rychlost $v_H/Ak\omega h$	$\lvert v_{Hmax} \rvert / Ak\omega h$
L - s	$-2\sin(\omega t)\sin(kx)$	$-2\cos(\omega t)\cos(kx)$	2,0
D - c	$2\cos(\omega t)\cos(kx)$	$2\sin(\omega t)\sin(kx)$	2,0
P, L - c, c	$4\cos(\omega t)\sin(kx)$	$-4\sin(\omega t)\cos(kx)$	4,0
H, D - c, c	$4\cos(\omega t)\cos(kx)$	$4\sin(\omega t)\sin(kx)$	4,0
H, P - c, s	$2\cos(\omega t + kx)$	$-2\cos(\omega t + kx)$	2,0
H, L - c, s	$2\cos(\omega t + kx)$	$-2\cos(\omega t + kx)$	2,0
H, P, D, L - s, c, s, c	$-4\sin(\omega t - kx)$	$-4\sin(\omega t - kx)$	4,0
H, P, D, L - c, c, c, c	$4\sqrt{2}\cos(\omega t)\sin\left(kx + \frac{\pi}{4}\right)$	$-4\sqrt{2}\cos\left(kx + \frac{\pi}{4}\right)\sin(\omega t)$	5,6
H, P - c, c	$2\sqrt{2}\cos(\omega t)\sin\left(kx + \frac{\pi}{4}\right)$	$-2\sqrt{2}\cos\left(kx + \frac{\pi}{4}\right)\sin(\omega t)$	2,8
H, L - c, c	$2\sqrt{2}\cos(\omega t)\sin\left(kx + \frac{\pi}{4}\right)$	$-2\sqrt{2}\cos\left(kx + \frac{\pi}{4}\right)\sin(\omega t)$	2,8
H, D - c, s	$2\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)\cos(kx)$	$2\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)\sin(kx)$	2,8
H, P, D - c, s, s	$-\sqrt{5}\sin(\omega t + kx - \alpha) - \sin(\omega t - kx)$	$\sqrt{5}\sin(\omega t + kx + \alpha) - \sin(\omega t - kx)$	3,2
H, P, D - c, c, s	$\sqrt{5}\cos(\omega t - kx + \alpha) + \cos(\omega t + kx)$	$\sqrt{5}\sin(\omega t - kx + \alpha) - \cos(\omega t + kx)$	3,2
H, P, D - c, s, c	$\cos(\omega t - kx) + 3\cos(\omega t + kx)$	$\cos(\omega t - kx) - 3\cos(\omega t + kx)$	4,0
H, P, D - c, c, c	$2\sqrt{5}\cos(\omega t)\sin(kx + \alpha)$	$-2\sqrt{5}\sin(\omega t)\cos(kx + \alpha)$	4,5

pozn. $\sin\alpha = \frac{2}{\sqrt{5}}$, $\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{5}}$

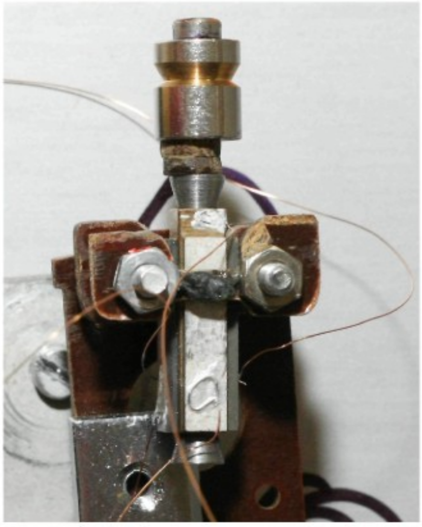
Tab. 8.1.2 - *Přímkový dotyk - charakteristiky*

Motorky byly prakticky vyrobeny ve dvou různých velikostech:

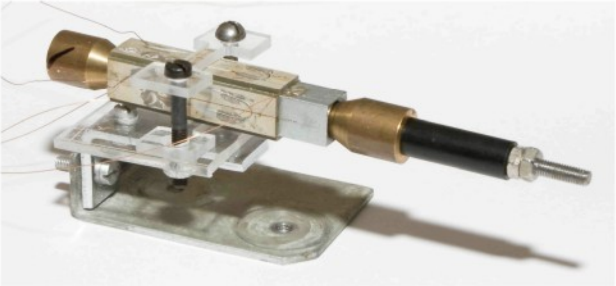
RMI - 4 PZT elementy APC880 o rozměrech 17,3x3,75x1 mm (obr. 8.1.7, 8.1.8) s mosaznou trubičkou o rozměrech 5x20 mm.

RMII - 4 PZT elementy tvořily buzení jednoho kvadrantu motorku o stejných rozměrech s hlavním dílem statoru hliníkovou trubičkou o rozměrech 10x50mm (obr. 8.3, 8.1.8).

Rotorem těchto motorků byla hřídelka adekvátních rozměrů zakončená jedním posuvným a jedním pevným kuželem pro přenos vzniklých výchylek za pomoci tření ze statoru na rotor. Zkoušeli jsme také různé kužely s rozdílnými vrcholovými úhly. Pro vhodnou přítlačnou sílu rotoru ke statoru lze využít pružinu nebo vertikální umístění motoru v držáku (obr. 8.1.8), kde jako přítlak slouží přimontovaná řemenice.
RMI - $F_{přítlačná}=5.10^{-2}$ N, RMII - $F_{přítlačná}=21,3.10^{-2}$ N.

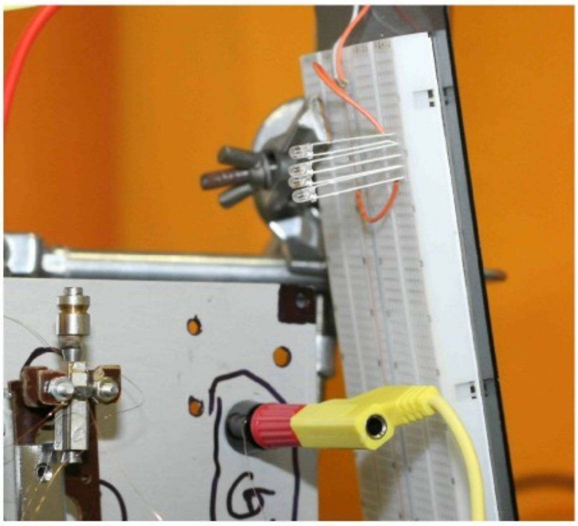


Obr. 8.1.7 - *Čtyř kvadrantový motorek*



Obr. 8.1.8 - *Čtyř kvadrantový motorek složený z 16 PZT elementů*

Měření otáček se realizovalo bezdotykově pomocí sestaveného stroboskopu (obr. 8.1.9) z LED diod. Konec rotoru na kterém byla umístěna řemenice je pojištěn matkou na které je úzký jasně viditelný zářez sloužící jako rozpoznávací znak pro měření otáček. Otáčky motorků jsou závislé především na elektrickém poli a v případě malých otáček se využije vícenásobného zobrazení rozpoznávacího znaku, kde podle počtu zobrazené značky se určí otáčky rotoru. Z použitého principu měření lze určit i rovnoměrnost otáčení motorku, kdy při konstantních otáčkách se zářez jeví jako nehybný. Ve všech měřených případech naprázdno však šlo o stabilní otáčení. Aby nedošlo k chybě odečítání násobným zviditelněním rozpoznávacího zářezu byla frekvence stroboskopu nastavována pro každé zapojení od 0 Hz. Tudíž např. při rovnoměrných otáčkách rotoru a nastavování frekvence stroboskopu od 0 Hz se nejprve zářezy ukázaly nehybné při poloviční frekvenci právě z toho důvodu, že jsou vlastně dva vůči sobě otočené o 180°. Proto také změřená frekvence byla dvojnásobnou hodnotou skutečné (ve všech tabulkách je ovšem uvedena již frekvence skutečná).



Obr. 8.1.10 - *Měření otáček rotačního motorku*

RMI

Protože výsledky otáček horizontálního uložení motorku byly nižší než pro vertikální uspořádání jsou prezentovány výsledky pouze pro uspořádání vertikální. To způsobilo rovnoměrnější zatížení gravitační sílou po celé vnitřní části statoru rotorem. První věcí z hlediska konstrukčního je mechanické upevnění motorku. Zde byly hledány maximální otáčky pro jeden druh buzení včetně amplitudy elektrického napájení. Výsledná poloha upevnění motorku pak byla v jedné třetině celé struktury ze směru kontaktní plochy. I když podélný mód kmitu teoreticky vyznívá pro upevnění na střed PZT elementu, musí se motorek brát jako ucelená struktura, která není zcela symetrická ve směru kolmém k délce. Kontaktní plocha přes kterou se přenášela vytvořená deformace je především v horním styku rotoru a statoru. Následující tabulka (tab. 8.1.3) vystihuje otáčky (Hz) v závislosti na druhu buzení včetně zkratování - 1 či rozpojení - 0 nebuzených elementů.

D - cos	130V@43,1kHz
Zapojení pasivních elementů H, P, L	Otáčky [Hz]
0, 0, 0	12
1, 1, 1	11
1, 1, 0	14
0, 1, 1	26
1, 0, 1	12

L - sin	130V@44,05kHz
Zapojení pasivních elementů H, P, D	Otáčky [Hz]

L - sin	130V@44,05kHz
0, 0, 0	60
1, 1, 1	30
0, 1, 1	41
1, 0, 1	25
1, 1, 0	36

P, L - cos, cos	130V@43,48kHz
Zapojení pasivních elementů	Otáčky [Hz]
D, H	
0, 0	60
1, 1	44

H, D - cos, cos	130V@45,45kHz
Zapojení pasivních elementů	Otáčky [Hz]
L, P	
0, 0	42
1, 1	50

H, P - cos, sin	130V@43,48kHz
Zapojení pasivních elementů	Otáčky [Hz]
D, L	
0, 0	60
1, 1	45

H, L - cos, sin	130V@43,67kHz
Zapojení pasivních elementů	Otáčky [Hz]
D, P	
0, 0	50
1, 1	45

H,P - cos, cos	130V@43,10kHz
Zapojení pasivních elementů	Otáčky [Hz]
D, L	
0, 0	18
1, 1	27

Kapitola 9

Závěr

Aktuátory na bázi piezoelektrického jevu jsou velice perspektivní a studovanou oblastí pro mnoho různorodých aplikací s rychlým posunem a vysokou přesností v rámci malých deformací.

V rešeršní části práce jsem piezoelektrické aktuátory rozdělil podle typu zesílení posunutí od vnitřního přes vnější až po zesílení frekvenční. Frekvenční zesílení je dále členěno do dvou hlavních kapitol dle způsobu elektrického buzení a funkce aktuátoru. Následuje kapitola řízení aktuátorů včetně již konkrétního vysokovýkonového budiče disponujícího na výstupu dvěma obdélníkovými signály řiditelné amplitudy a frekvence s fázovým posunem $\pi/2$.

V hlavní části práce jsou popsány provedené experimenty a diskutovány jejich výsledky. Některé z těchto výsledků byly publikovány formou posteru na konferencích a výzkumných zpráv projektů (seznam viz. str. 137 resp. str. 138).

Výběr materiálu a testování jejich vlastností

Nejprve jsem testoval jednotlivé komponenty motorku. Při výběru materiálu jsem hledal takový, který by měl podobné vlastnosti jako použité piezoelektrické elementy tak, aby mechanické přizpůsobení bylo maximální. Ze stejného důvodu byl rozhodující i rozměr (tloušťka) materiálu ve shodě s piezoelektrickými elementy. Po volbě materiálu jsem zkoumal přenos kmitů z piezoelektrických elementů na mosazný plech. Za tímto účelem jsem otesto-

Literatura

[1] J. Hu, K. Nakamura, S. Ueha: *A Noncontact Ultrasonic Motor with the Rotor Levitated by Axial Acoustic Viscous Force*, Electronics and Communications in Japan, Part 3, **82**, 4 (1999) 56-63

[2] P. Le Moal, E. Joseph, J.C. Ferniot: *Mechanical energy transductions in standing wave ultrasonic motors: Analytical modelling and experimental investigations*, European Journal of Mechanics - A/Solids, **19** (2000) 849–871

[3] T. Funakubo, Y. Tomikawa: *Characteristics of Multilayer Piezoelectric Actuator Made of High Q Material for Application to Ultrasonic Linear Motor*, Japanese Journal of Applied Physics, **41** (2002) 7144–7148

[4] S. Cagatay, B. Koc, P. Moses, K. Uchino: *A Piezoelectric Micromotor with a Stator of Ø=1.6mm and l=4mm Using Bulk PZT*, Japanese Journal of Applied Physics, **43**, 4A (2004) 1429–1433

[5] J.R. Friend, D.S. Stutts: *The dynamics of an annular piezoelectric motor stator*, Journal of Sound and Vibration, **204**, 3 (1997) 421-437

[6] G.A. Lesieutre, R. Rusovici, G.H. Koopmann, J.J. Dosch: *Modelling and characterization of a piezoceramic inertial actuator*, Journal of Sound and Vibration, **261** (2003) 93–107

[7] Y.H. Kim, S.K. Ha: *Analysis of a disk-type stator for the piezoelectric ultrasonic motor using impedance matrix*, Journal of Sound and Vibration, **263** (2003) 643–663

[8] Y. Yia, W. Seemann, R. Gausmann, J. Zhong: *A method for matching the eigenfrequencies of longitudinal and torsional vibrations in a hybrid piezoelectric motor*, Journal of Sound and Vibration, **295** (2006) 856–869

[9] C. Liu, T. Chen, Y. Chen: *A modified axisymmetric finite element for the 3-D vibration analysis of piezoelectric laminated circular and annular plates*, Journal of Sound and Vibration, **309** (2008) 794–804

[10] K. Mossi, R. Bryant, P. Mane: *Piezoelectric Composites as Bender Actuators*, Integrated Ferroelectrics, **71** (2005) 221–232

[11] T. Morita: *Miniature piezoelectric motors*, Sensors and Actuators A, **103** (2003) 291-300

[12] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, R. Luchinskis: *The square bar-shaped multi-DOF ultrasonic motor*, Journal of Electroceramics, **20** (2008) 231–235

[13] E. Bekiroglu: *Ultrasonic motors: Their models, drives, controls and applications*, Journal of Electroceramics, **20** (2008) 277–286

[14] R. Maeda, J.J. Tsaur, S.H. Lee, M. Ichiki: *Piezoelectric Microactuator Devices*, Journal of Electroceramics, **12** (2004) 89–100

[15] K. Lim, J. Lee, S. Park, S. Kang, H. Kim: *Fabrication and characteristics of impact type ultrasonic motor*, Journal of the European Ceramic Society, **27** (2007) 4159–4162

[16] J.L. Pons, P. Ochoa, M. Villegas, J.F. Fernandez, E. Rocon, J. Moreno: *Self-tuned driving of piezoelectric actuators The case of ultrasonic motors*, Journal of the European Ceramic Society, **27** (2007) 4163–4167

[17] J.T. Leinvuo, S.A. Wilson, R.W. Whatmore: *Flextensional Ultrasonic Motor Using the Contour Mode of a Square Piezoelectric Plate*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **51**, 8 (2004) 929-936

[18] K. Lee, D. Lee, S. Borodinas, P. Vasiljev, S. Nahm, S. Yoon: *Analysis of Shaking Beam Actuator for Piezoelectric Linear Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **51**, 11 (2004) 1508-1513

[19] J. Satonobu, D. Lee, K. Nakamura, S. Ueha: *Improvement of the Longitudinal Vibration System for the Hybrid Transducer Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **47**, 1 (2000) 216-221

[20] K. Yao, B. Koc, K. Uchino: *Longitudinal-Bending Mode Micromotor Using Multilayer Piezoelectric Actuator*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **48**, 4 (2001) 1066-1071

[21] B. Koc, S. Cagatay, K. Uchino: *A Piezoelectric Motor Using Two Orthogonal Bending Modes of a Hollow Cylinder*, IEEE Transactions on Ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, **49**, 4 (2002) 495-500

[22] S. Cagatay, B. Koc, K. Uchino: *A 1.6-mm, Metal Tube Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on Ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, **50**, 3 (2003) 782-786

[23] F. Zhang, W. Chen, J. Liu, Z. Wang: *Bidirectional Linear Ultrasonic Motor Using Longitudinal Vibrating Transducers*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **52**, 1 (2005) 134-138

[24] J. Friend, K. Nakamura, S. Ueha: *A Traveling-Wave, Modified Ring Linear Piezoelectric Microactuator with Enclosed Piezoelectric Elements - The "Scream" Actuator*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **52**, 8 (2005) 1343-1353

[25] O. Vyshnevskyy, S. Kovalev, W. Wischnewskiy: *A Novel, Single-Mode Piezoceramic Plate Actuator for Ultrasonic Linear Motors*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **52**, 11 (2005) 2047-2053

[26] J. Rho, B. Kim, C. Lee, H. Joo, H. Jung: *Design and Characteristic Analysis of L1B4 Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **52**, 11 (2005) 2054-2064

[27] J.T. Leinvuo, S.A. Wilson, R.W. Whatmore, M.G. Cain: *Flextensional Ultrasonic Piezoelectric Micro-Motor*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **53**, 12 (2006) 2357-2366

[28] J. Maas, T. Schulte, N. Fröhleke: *Model-Based Control for Ultrasonic Motors*, IEEE Transactions on mechatronics, **5**, 2 (2000) 165-180

[29] M. Kurosawa, S. Ueha: *Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **38**, 2 (1991) 89-92

[30] L. Petit, R. Briot, L. Lebrun, P. Gonnard: *A Piezomotor Using Longitudinal Actuators*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **45**, 2 (1998) 277-284

[31] J.M. Fernandez, Y. Perriard: *Sensitivity Analysis and Optimization of a Standing Wave Ultrasonic Linear Motor*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **53**, 7 (2006) 1352-1361

[32] H. Ko, S. Kim, C. Kang, H. Kim, S. Yoon: *Optimization of a piezoelectric linear motor in terms of the contact parameters*, Materials Chemistry and Physics, **90** (2005) 322–326

[33] M. Mracek, J. Wallaschek: *A system for powder transport based on piezoelectrically excited ultrasonic progressive waves*, Materials Chemistry and Physics, **90** (2005) 378–380

[34] H.Ko, S. Kim, J. Kim, H. Kim, S. Yoon: *Wear and dynamic properties of piezoelectric ultrasonic motor with frictional materials coated stator*, Materials Chemistry and Physics, **90** (2005) 391–395

[35] M. Kinouchi, I. Hayashi, N. Iwatsuki, K. Morikawa, J. Shibata, K. Suzuki: *Application of Fuzzy PI control to improve the positioning accuracy of a rotary-linear motor driven by two-dimensional ultrasonic actuators*, Microprocessors and Microsystems, **24** (2000) 105–112

[36] S. Dembélé, K. Rochdi: *A three DOF linear ultrasonic motor for transport and micropositioning*, Sensors and Actuators A, **125** (2006) 486–493

[37] J. Wallaschek: *Contact mechanics of piezoelectric ultrasonic motors*, Smart Material and Structures, **7** (1998) 369–381

[38] B. Koc: *Operating frequency tracking of single phase driving type piezoelectric motors*, Journal of Electroceramics, Accepted: 8 January 2008, zveřejněno zatím pouze online

[39] Z. Duan, Q. Wang: *Development of a novel high precision piezoelectric linear stepper actuator*, Sensors and Actuators A, **118** (2005) 285–291

[40] J.L. Pons, H. Rodriguez, J.F. Fernández, M. Villegas, F. Seco: *Parametrical optimisation of ultrasonic motors*, Sensors and Actuators A, **107** (2003) 169–182

[41] G. Bal, E. Bekiroglu: *Servo speed control of travelling-wave ultrasonic motor using digital signal processor*, Sensors and Actuators A, **109** (2004) 212–219

[42] L. Petit, N. Rizet, R. Briot, P. Gonnard: *Frequency behaviour and speed control of piezomotors*, Sensors and Actuators A, **80** (2000) 45–52

[43] O. Ohnishi: *Ultrasonic motor and method of adjusting the same*, U.S. Patent No. 4965482 (1990)

[44] D. Koyama, T. Ide, J.R. Friend, K. Nakamura, S. Ueha: *An Ultrasonically Levitated Noncontact Stage Using Traveling Vibrations on Precision Ceramic Guide Rails*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **54**, 3, (2007) 597-604

[45] J. Li, R. Sedaghati, J. Dargahi, D. Waechter: *Design and development of a new piezoelectric linear Inchworm actuator*, Mechatronics, **15** (2005) 651–681

[46] P. Juang, D. Gu: *Analysis, measurement and control of a new disc-type ultrasonic motor system*, Mechatronics, **16** (2006) 1–12

[47] W.M. Kuo, S.F. Chuang, C.Y. Nian, Y.S. Tarng: *Precision nano-alignment system using machine vision with motion controlled by piezoelectric motor*, Mechatronics, **18** (2008) 21–34

[48] T. Park, D. Jeong, M. Kimb, T. Song: *A study on the rotary-type ultrasonic motor using a longitudinal–torsional vibration converter*, Materials Chemistry and Physics, **98** (2006) 1–4

[49] A. Kawamura, N. Takeda: *Linear ultrasonic piezoelectric actuator*, IEEE Transactions on industry applications, **27**, 1 (1991) 23-26

[50] X. Chu, Z. Xing, W. Gong, L. Li, Z. Gui: *Vibration analysis of stepping piezoelectric micro-motor using wiggle mode*, Materials Science and Engineering B, **99** (2003) 306-308

[51] H. Isobe, A. Kyusojin: *Motion error correction for non-contact ultrasonic motor driven by multi-layered piezoelectric actuators*, Microsystem Technologies, **11** (2005) 970–973

[52] Y. Suzuki, K. Tani, T. Sakuhara: *Development of a new type piezoelectric micromotor*, Sensors and Actuators A, **83** (2000) 244–248

[53] M. Kurosawa, M. Takahashi, T. Higuchi: *Friction drive surface acoustic wave motor*, Ultrasonics, **34** (1996) 243-246

[54] L. Lebrun, L. Petit, P. Gonnard: *Piezoelectric motor using a (1,1) non-axisymmetric mode*, Ultrasonics, **34** (1996) 251-255

[55] M. Kurosawa, H. Inagaki, T. Higuchi: *Investigation of stator transducer for a column-shaped ultrasonic motor*, Ultrasonics, **34** (1996) 271-274

[56] M. Aoyagi, Y. Tomikawa, T. Takano: *Simplified equivalent circuit of an ultrasonic motor and its applications*, Ultrasonics, **34** (1996) 275-278

[57] K. Ohnishi, Y. Tomikawa, C. Kusakabe, M. Aoyagi: *Ultrasonic actuator using orthotropic composite materials*, Ultrasonics, **34** (1996) 283-285

[58] M. Kummel, S. Goldschmidt, J. Wallaschek: *Theoretical and experimental studies of a piezoelectric ultrasonic linear motor with respect to damping and nonlinear material behaviour*, Ultrasonics, **36** (1998) 103-109

[59] M.K. Kurosawa: *State-of-the-art surface acoustic wave linear motor and its future applications*, Ultrasonics, **38** (2000) 15–19

[60] T. Morita, M.K. Kurosawa, T. Higuchi: *A cylindrical micro-ultrasonic motor (stator transducer size: 1.4 mm in diameter and 5.0 mm long)*, Ultrasonics, **38** (2000) 33–36

[61] T. Hemsel, J. Wallaschek: *Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors*, Ultrasonics, **38** (2000) 37–40

[62] A. Iula, R. Carotenuto, N. Lamberti, M. Pappalardo: *A matrix model of the axle vibration of a piezoelectric motor*, Ultrasonics, **38** (2000) 41–45

[63] A. Iino, K. Suzuki, M. Kasuga, M. Suzuki, T. Yamanaka: *Development of a self-oscillating ultrasonic micro-motor and its application to a watch*, Ultrasonics, **38** (2000) 54–59

[64] Y. Ming, Q. Peiwen: *Performances estimation of a rotary traveling wave ultrasonic motor based on two-dimension analytical model*, Ultrasonics, **39** (2001) 115-120

[65] H. Storck, W. Littmann, J. Wallaschek, M. Mracek: *The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motor*, Ultrasonics, **40** (2002) 379–383

[66] S. Manuspiya, P. Laoratanakul, K. Uchino: *Integration of a piezoelectric transformer and an ultrasonic motor*, Ultrasonics, **41** (2003) 83–87

[67] H. Frayssignes, R. Briot: *Traveling wave ultrasonic motor: coupling effects in free stator*, Ultrasonics, **41** (2003) 89–95

[68] F. Wen, C. Yen, M. Ouyang: *Thin-disk piezoceramic ultrasonic motor. Part I: design and performance evaluation*, Ultrasonics, **41** (2003) 437–450

[69] F. Wen, C. Yen, M. Ouyang: *Thin-disc piezoceramic ultrasonic motor. Part II: system construction and control*, Ultrasonics, **41** (2003) 451–463

[70] A. Iula, M. Pappalardo: *A general model of the axle vibration in piezoelectric motors*, Ultrasonics, **42** (2004) 291–296

[71] F. Wen, S. Mou, M. Ouyang: *Design and construction of shaft-driving type piezoceramic ultrasonic motor*, Ultrasonics, **43** (2004) 35–47

[72] A. Frangi, A. Corigliano, M. Binci, P. Faure: *Finite element modelling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor*, Ultrasonics, **43** (2005) 747–755

[73] B. Yang, J. Liu, D. Chen, B. Cai: *Theoretical and experimental research on a disk-type non-contact ultrasonic motor*, Ultrasonics, **44** (2006) 238–243

[74] X. Chu, L. Ma, L. Li: *A disk–pivot structure micro piezoelectric actuator using vibration mode* B_{11}, Ultrasonics, **44** (2006) 561–564

[75] Y. Chen, Q.L. Liu, T.Y. Zhou: *A traveling wave ultrasonic motor of high torque*, Ultrasonics, **44** (2006) 581–584

[76] C. Lu, T. Xie, T. Zhou, Y. Chen: *Study of a new type linear ultrasonic motor with double-driving feet*, Ultrasonics, **44** (2006) 585–589

[77] T. Hemsel, M. Mracek, J. Twiefel, P. Vasiljev: *Piezoelectric linear motor concepts based on coupling of longitudinal vibrations*, Ultrasonics, **44** (2006) 591–596

[78] T. Morita, R. Yoshida, Y. Okamoto, M.K. Kurosawa, T. Higuchi: *A Smooth Impact Rotation Motor Using a Multi-Layered Torsional Piezoelectric Actuator*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **46**, 6, (1999) 1439-1445

[79] S. Ueha, M. Kurosawa: *Ultrasonic motors*, IEEE Ultrasonics Symposium (1988) 519-522

[80] T. Takano, Y. Tomikawa, T. Ogasawara, S. Sugawara, M. Konno: *Ultrasonic motors using piezoelectric ceramic multimode vibrators*, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **37**, 2, (1990) 224-229

[81] K. Ohnishi: *Ultrasonic linear motor*, U.S. Patent No. 5036245 (1991)

[82] C. Yin, T. Yu: *An Ultrasonic Motor Driven by Traveling Cylindrical Wedge Waves*, IEEE Ultrasonics Symposium (2006) 156-159

[83] C. Li, S. Xu, R. Liu: *Dynamic Analysis and Optimal Design of a Novel Small 2-D planar Ultrasonic Motor*, IEEE Ultrasonics Symposium (2006) 2269-2272

[84] J. Hu, K. Nakamura, S. Ueha: *Characteristics of a Noncontact Ultrasonic Motor Using Acoustic Levitation*, IEEE Ultrasonics Symposium (1996) 373-376

[85] S. Hirose, Y. Yamayoshi, H. Ono: *A small non-contact ultrasonic motor*, IEEE Ultrasonics Symposium (1993) 453-456

[86] O.Y. Zharii: *An exact mathematical model of a travelling wave ultrasonic motor*, IEEE Ultrasonics Symposium (1994) 545-548

[87] J.R. Friend, D.S. Stutts: *Design, optimization and the prototyping of a small tuning fork ultrasonic piezoelectric linear motor*, IEEE Ultrasonics Symposium (1999) 653-656

[88] C. Zhao, G. Wang, L. Jin: *A new type of self-correction ultrasonic motor using standing wave*, IEEE Ultrasonics Symposium (1999) 671-674

[89] B. Koc, Y. Xu, K. Uchino: *Ceramic/metal composite piezoelectric motors*, IEEE Ultrasonics Symposium (1998) 687-690

[90] T. Ishii, K. Nakamura, S. Ueha, K. Ohnishi: *A wear evaluation chart of friction materials used for ultrasonic motors*, IEEE Ultrasonics Symposium (1998) 699-702

[91] K. Nakamura, J. Satonobu, D. Lee, S. Ueha: *An optimum design for the hybrid transducer ultrasonic motor in symmetrical structure*, IEEE Ultrasonics Symposium (1998) 703-706

[92] L. Dellmann, S. Roth, C. Beuret, G.A. Racine, H. Lorenz, M. Despont, P. Renaud, P. Vettiger, N.F. Rooij: *Fabrication process of high aspect ratio elastic and SU-8 structures for piezoelectric motor applications*, Sensors and Actuators A, **70** (1998) 42-47

[93] R. Fung, C. Yao, C. Tseng: *Dynamic analysis of a bimodal ultrasonic motor with initially stressed force onto the rotor*, Sensors and Actuators A, **72** (1999) 229-233

[94] M. Bexell, S. Johansson: *Characteristics of a piezoelectric miniature motor*, Sensors and Actuators B **75** (1999) 118–130

[95] A.D. Brisbane: *Position Control Device*, U.S. Patent No. 3377489 (1968)

[96] B. Zhai, S. Lima, K. Lee, S. Dong, P. Lu: *A modified ultrasonic linear motor*, Sensors and Actuators A, **86** (2000) 154–158

[97] P. Lua, K. Lee, S.P. Lim, W.Z. Lin: *A kinematic analysis of cylindrical ultrasonic micromotors*, Sensors and Actuators A, **87** (2001) 194–197

[98] P. Juang, H.J. Hardtke: *A new disc-type ultrasonic motor*, Sensors and Actuators A, **94** (2001) 102-111

[99] Y. Roh, S. Lee, W. Han: *Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor*, Sensors and Actuators A, **94** (2001) 205-210

[100] D. Sun, J. Liu, X. Ai: *Modeling and performance evaluation of traveling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method*, Sensors and Actuators A, **100** (2002) 84-93

[101] Y. Roh, J. Kwon: *Development of a new standing wave type ultrasonic linear motor*, Sensors and Actuators A, **112** (2004) 196-202

[102] R. Carotenuto, G. Caliano, A. Iula, M. Pappalardo: *Langevin flexural piezoelectric motor based on stator precessional motion*, Sensors and Actuators A, **113** (2004) 189-197

[103] L. Petit, P. Gonnard: *Inter-phases mechanical coupling in ultrasonic motors*, Sensors and Actuators A, **116** (2004) 492-500

[104] Y. Ming, Z. Meiling, R.C. Richardson, M.C. Levesley, P.G. Walker, K. Watterson: *Design and evaluation of linear ultrasonic motors for a cardiac compression assist device*, Sensors and Actuators A, **119** (2005) 214-220

[105] L. Petit, P. Gonnard: *Industrial design of a centimetric "TWILA" ultrasonic motor*, Sensors and Actuators A, **120** (2005) 211–224

[106] M. France, D. Dubet, S. Kuzmic, L. Petit: *Electronic and software control for rotary piezomotor*, Sensors and Actuators A, **121** (2005) 462–471

[107] C. Zhao, Z. Li, W. Huang: *Optimal design of the stator of a three-DOF ultrasonic motor*, Sensors and Actuators A, **121** (2005) 494–499

[108] C. Yoon, G. Park, H. Kim, J. Ryu: *Piezoelectric ultrasonic motor by co-extrusion process*, Sensors and Actuators A, **121** (2005) 515–519

[109] H. Ko, S. Kim, S.N. Borodinas, P.E. Vasiljev, C. Kang, S. Yoon: *A novel tiny ultrasonic linear motor using the radial mode of a bimorph*, Sensors and Actuators A, **125** (2006) 477–481

[110] T. Kanda, A. Makino, T. Ono, K. Suzumori, T. Morita, M.K. Kurosawa: *A micro ultrasonic motor using a micro-machined cylindrical bulk PZT transducer*, Sensors and Actuators A, **127** (2006) 131–138

[111] J.T. Leinvuo, S.A. Wilson, R.W. Whatmore, M.G. Cain: *A new flextensional piezoelectric ultrasonic motor-Design, fabrication and characterisation*, Sensors and Actuators A, **133** (2007) 141–151

[112] C. Yoon, S. Lee, H. Kim, K. Lee: *Windmill-type ultrasonic micromotor fabricated by thermoplastic green machining process*, Sensors and Actuators A, **134** (2007) 519–524

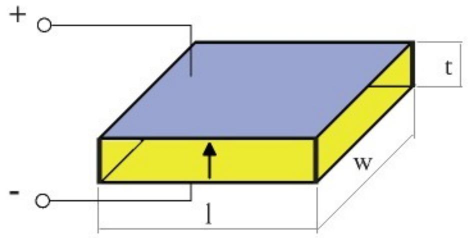
[113] Z. Li, C. Zhao, W. Huang, Z. Li: *Several key issues in developing of cylinder type 3-DOF ultrasonic motor*, Sensors and Actuators A, **136** (2007) 704–709

[114] V. Kaajakari, A. Lal: *Micromachined ultrasonic motor based on parametric polycrystalline silicon plate excitation*, Sensors and Actuators A, **137** (2007) 120–128

Kapitola 2

2.1 Aktuátory s vnitřním zesílením

Mezi aktuátory s vnitřním zesílením se řadí aktuátory, které samy o sobě dokáží vyvinout dostatečně velké posunutí bez jakéhokoli externího principu zesílení. Jedná se tedy jednak o *prosté výbrusy* z piezoelektrického materiálu, které generují pohyb ve směru tloušťky, délky či šířky. Směr pohybu závisí na umístění elektrod, polarizaci a rozměrech materiálu (obr. 2.1.1). Jako aktuátory se víceméně nepoužívají z důvodu velmi malých posunutí řádově desítek nanometrů při elektrickém napětí stovek voltů, frekvence od 10^3 Hz a sil 10^3 N. Použití spadá spíše do oblasti rezonátorů či ultrazvukových měničů.



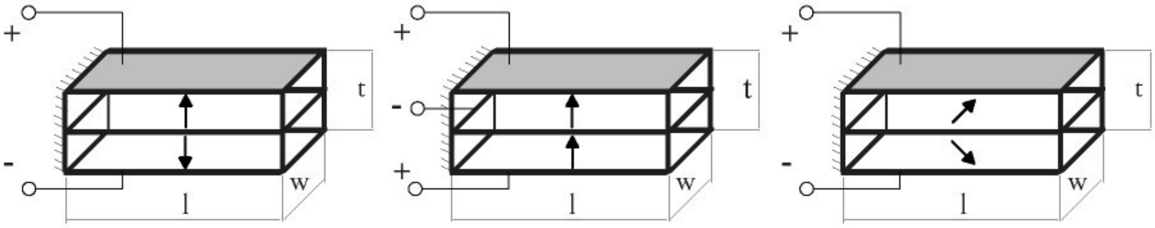
Obr. 2.1.1 - *Piezoelektrický výbrus*

Další kategorií jsou *ohybové struktury*. Jsou to jedny z nejuniverzálnějších aktuátorů vůbec a patří sem *monomorfy, bimorfy, s-morfy, unimorfy, helimorfy a ladičky*. Princip spočívá v upevnění jednoho konce struktury a v deformaci vyvolané piezoelektrickým jevem.

Monomorf je ve své podstatě pouze jedna homogenní vrstva piezoelektrického materiálu na jednom konci uchycená, polarizovaná v různých směrech s různě orientovanými elektrodami. Nejčastěji se jedná o tloušťkově polarizovaný výbrus konající podélné kmity. Parametry jsou v tomto případě velmi podobné již zmíněnému výbrusu [181], [201].

Struktura piezoelektrického bimorfu je technologicky velice jednoduchá. Skládá se

ze dvou aktivních vrstev piezoelektrického materiálu a jedné doplňkové neaktivní kovové vrstvy. Neaktivní vrstva zvyšuje odolnost proti mechanickému poškození a pracuje také jako pružina. Podle způsobu polarizace a elektrického zapojení jednotlivých vrstev se dělí na *sériové*, *paralelní* a *délkově střižné* (obr. 2.1.2). Obecným principem ovšem zůstává, že po přiložení elektrického pole dochází mezi neutrální rovinou na obě strany k opačnému mechanickému napětí tudíž v jedné z vrstev k podélnému tlaku a ve druhé k podélnému tahu [10], [186], [187], [188], [192].

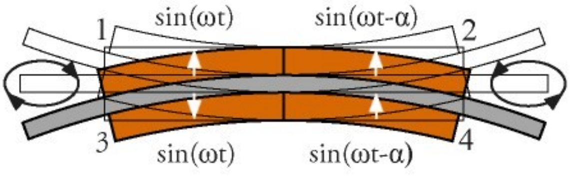


Obr. 2.1.2 - *Piezoelektrické bimorfy a) sériový b) paralelní c) délkově střižný*

Sériové a paralelní bimorfy jsou z hlediska výroby velmi jednoduché. Jejich směry polarizace a přivedená elektrická pole nepůsobí žádné technologické obtíže. Naproti tomu délkově střižné struktury mají směr polarizace natočený a představují tak komplikace při výrobě. Ať už polarizací nebo úpravou tvaru. Zato v sobě kombinují ohybovou a střižnou elastickou deformaci. Tato kombinace vede k menší úrovni vnitřního napětí při téže výchylce než u zbylých dvou typů.

Maximální výchylka na koncích bimorfů je lineárně závislá na intenzitě elektrického pole a v rezonanci dosahuje až jednotek milimetrů. Při odlišných frekvencích se více projevují další módy kmitů nejen ohybové a střižné, ale například torzní kmity apod. Sériové i paralelní bimorfy mají blokovací sílu kvadraticky nepřímo úměrnou volné délce bimorfu, jejíž dosažitelné hodnoty jdou při elektrickém napětí 100 V až do 1 N. Popřípadě ji lze zvětšit například použitím jiného materiálu pro střední neaktivní vrstvu s vyšší tuhostí. Jelikož délkově střižné struktury byly vynalezeny teprve nedávno, tak o jejich blokovací síle zatím nelze rozhodnout.

Velmi podobnou strukturou jsou aktuátory typu *S-morf* [188]. Jedná se o ohybovou strukturu na principu sériového bimorfu, ovšem s odlišným systémem napájení a rozmístěním elektrod (obr. 2.1.3). Základ tvoří dvě aktivní piezoelektrické vrstvy antiparalelně polarizované, jejichž elektrody jsou dělené a jedna neaktivní vrstva. Elektrody na horní i spodní straně bimorfu jsou tedy rozděleny, a to každá na dvě samostatné části. Na elektrody 1 a 3 je přivedené shodné elektrické napětí a samy o sobě generují deformaci v podélném směru. Elektrody 2 a 4, které jsou buzené fázově posunutým signálem vůči elektrodám 1, 3 a generují ohybovou deformaci. Přičemž přítomnost střední vrstvy je v celé struktuře nezbytná. Jelikož navíc jsou obě skupiny elektrod ještě vzájemně fázově posunuté a vzhledem ke vzájemné společné vazbě je výsledkem obou těchto pohybů (podélné i ohybo-



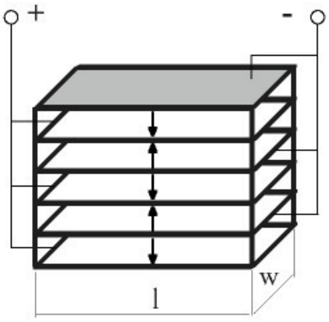
Obr. 2.1.3 - *Přivedené el. napětí a generovaný pohyb*

vé deformace) eliptický pohyb obou volných konců struktury. Při upevnění jednoho konce je výchylka v celé struktuře podobná písmenu S a druhý konec opět opisuje elipsu [168].

Ohybovou strukturu tvořenou ve většině případů jednou aktivní a jednou neaktivní substrátovou vrstvou nazýváme *unimorf*. Základní typ unimorfu má tedy jednu aktivní vrstvu z piezoelektrického materiálu, která je pevně spojena s vrstvou neaktivní. Vzhledem k pevné vazbě mezi oběma vrstvami dochází, po přiložení elektrického pole, k ohybové deformaci. Vedle zmíněného základního typu existují ještě další, jejichž struktura je obdobná. Rozlišujeme tak typy unimorfů *Rainbow* (Reduced and Internally Biased Oxide Wafer), *Cerambow* (Ceramic Biased Oxide Wafer) a *Thunder* (Thin Layer Composite Unimorph Piezoelectric Driver and Sensor) [172]. Unimorf typu Rainbow je konstrukčně vytvořen tak, že základ tvoří pouze jedna destička z piezoelektrického materiálu, která je za zvýšené teploty (1000°C) z jedné strany chemicky dopovaná určitým kovem. Na základě nehomogenního rozložení piezoelektrického koeficientu se mění deformace, která již není v celém materiálu homogenní. Velikost deformace je samozřejmě úměrná chemickému dopování a přiloženému elektrickému poli. Unimorfy typu Cerambow a Thunder jsou tvořeny kovovou a piezoelektrickou destičkou, které jsou spojeny za zvýšené teploty (300°C) a tlaku. Při dosažení pokojové teploty se v aktuátoru indukuje mechanické předpětí vzhledem k rozdílným koeficientům teplotní roztažnosti kovu a piezoelektrické látky. Výchylka je tudíž závislá na poměru tlouštěk piezoelektrické a kovové destičky, stejně tak na přiloženém elektrickém poli. Při poměru tlouštěk mezi piezoelektrickou a kovovou destičkou 0,17-0,33 dosahuje volná výchylka maximální hodnoty. S rostoucím i klesajícím poměrem se výchylka snižuje. Jestliže porovnáme obě struktury z hlediska maximální volné výchylky dostáváme v případě unimorfu Rainbow o 10-25% vyšší hodnoty než u typu Thunder. Příkladem aplikace unimorfu v oblasti aktuátorů je bezesporu zařízení pro přečerpávání kapalin - mikropumpa [92], [171], [190], [191].

Poměrně novou ohybovou strukturou je *Helimorf* [170]. Některé prameny uvádějí i zkratku *WHERM* (Wound Helical Electrically Reactive Mechanism). Tento aktuátor je založený na principu paralelního bimorfu a je analogický bimetalovému proužku. Je tedy tvořen proužkem z piezoelektrického materiálu ve kterém je uprostřed tenká elektroda. Druhý pól tvoří spojené elektrody po stranách pásku. Klíčovou záležitostí je zde materiál aktuátoru. Materiál helimorfu je založen na prášku PZT keramiky a polymerních pojivech, kdy se tato směs mletím a dalšími technologickými postupy přemění na visko-plastický materiál. Výsledná struktura z tohoto materiálu tvaru dvojité šroubovice vykazuje po přiložení elektrického pole axiální plastickou deformaci.

Kategorií, která vyvine největší sílu bez externího zesílení je kategorie *mnohovrstvých* aktuátorů, někdy označovaných také jako „Multistacks“ či „Multilayers“ (obr. 2.1.4) [177], [193]. Principiálně jsou mnohovrstvé aktuátory založené na prostých vrstvách z piezoelektrického materiálu, které se spojují a zvyšují tak několikanásobně některé vlastnosti celku. Se zvyšujícím se počtem vrstev roste samozřejmě celkové posunutí struktury. Právě této vlastnosti se při vytváření aplikací využívá v hojné míře. Závislost posunutí ve směru přidávání vrstev je lineární a velikost generované síly závisí na ploše vrstev. Výchylka se pohybuje až po stovky µm, zatímco síla do hodnot stovek



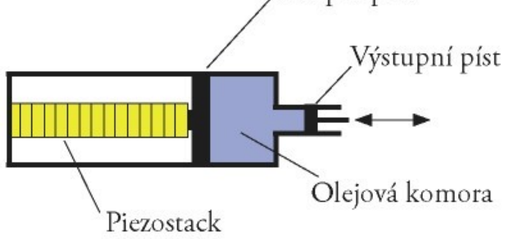
Obr. 2.1.4 - *Multistack*

kN. Rezonanční frekvence vykazuje lineární pokles se zvyšujícím se počtem vrstev. Spojování jednotlivých vrstev musí být maximálně tuhé, aby nedocházelo k degradaci síly a posunutí ve spojích. Vzhledem k paralelnímu propojení jednotlivých vrstev je velikost použitelného elektrického pole nižší. Elektricky napájená je každá z vrstev a odpadá tedy nutnost aplikování velkého pole z důvodu tloušťky (výšky) aktuátoru. Téměř všechny předchozí aktuátory je možné přepracovat na princip mnohovrstvých struktur za účelem dosažení většího posunutí. Zvyšování posunutí tímto způsobem záleží na konkrétní aplikaci, ale i toho lze snadno docílit. Nicméně existují i aplikace, které jsou originální a jejich princip přímo mnohovrstvou strukturu vyžaduje. Příkladem může být pseudo-střižný mnohovrstvý aktuátor [183]. V této aplikaci jsou jednotlivé vrstvy polarizované ve stejném směru a využívá se podélné výchylky, kdy jsou vrstvy střídavě přilepeny jedním koncem. V konečném důsledku tím makroskopicky dosáhneme střižné deformace celku. Jiným příkladem použití mnohovrstvého aktuátoru pro výrazné zvýšení výchylky je aplikace více vrstev na principu S-morfu. Není to ovšem typický představitel S-morfu popsaný výše. Zde je pro výchylku ve tvaru písmene S mnohovrstvá struktura přímo nezbytná. Každá z vrstev je založena na principu bimorfu, kdy je upevněný pouze jeden konec a to vždy střídavě. Přivedené elektrické pole tak deformuje každou vrstvu a předchozí vrstva ovlivňuje polohu vrstvy následné. Tímto způsobem dosáhneme značné výchylky závislé na počtu jednotlivých vrstev.

2.2 Aktuátory s vnějším zesílením

Externí mechanismus zesílení výchylky se používá ve dvou základních případech. První je ten, kdy stávající aktuátor nedokáže vůbec vyvinout dostatečné posunutí a výchylku je tudíž nutné zvětšit. Druhým, kdy se snažíme o zvětšení výchylky již funkčních aktuátorů (kapitola 2.1). Zvýšení posunutí lze realizovat dvěma základními způsoby. Na základě hydraulického či pákového mechanismu. U každého mechanismu je nejdůležitějším parametrem faktor zesílení. Ten se pochopitelně liší podle druhu realizace a nelze tak obecně specifikovat jeho limity.

Hydraulický princip pracuje na základě Pascalova zákona, který říká, že jestliže na nestlačitelnou kapalinu působí vnější tlaková síla tak poté tlak v každém místě kapaliny vzroste o stejnou hodnotu. Pokud tedy použijeme hydraulické zařízení, využijeme tím přenos tlaku a tím i tlakové síly od jednoho pístu k druhému. Jednou z konkrétních aplikací je struktura mnohovrstvého aktuátoru, který tlačí na píst o relativně velké ploše, tlak je přenášen kapalinou na píst s menší plochou a vykazuje tím větší posunutí (obr. 2.2.1) [159], [161]. Faktor zesílení výchylky resp. zmenšení síly zde závisí na poměru druhých mocnin velikostí poloměrů obou pístů. Jistá nevýhoda, ale tkví v tom, že se jedná o relativně precizní zařízení. Především nutností je absolutní těsnost celé konstrukce. Aby přenos síly a výchylky byl optimální s rychlou odezvou na vstup musíme mít i jisté požadavky na kapalinu - velký modul objemové pružnosti a nízkou viskozitu.



Obr. 2.2.1 - *Hydraulický mechanismus*