

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MIKROPOHON S LINEÁRNÍM PIEZOMOTOREM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

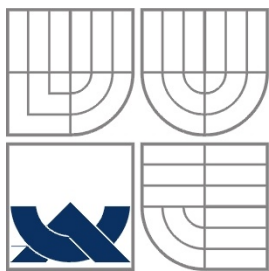
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

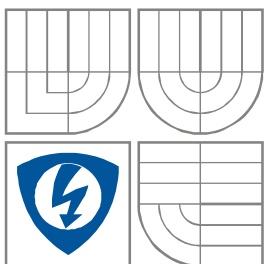
Petr Grmela

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Mikropohon s lineárním piezomotorem

MICRODRIVE WITH LINEAR PIEZOMOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Grmela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Kolářný, CSc.

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Grmela Petr

Ročník: 3

ID: 78210

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Mikropohon s lineárním piezomotorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte sestavu funkčního laboratorního vzorku s lineárním piezomotorem.
2. Popište funkci jednotlivých prvků struktury a ověřte možnost komunikace PC s řídicí jednotkou motoru
3. Měřením zjistěte statickou charakteristiku: rychlost posuvu / tažná síla

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.10.2007

Termín odevzdání: 06.06.2008

Vedoucí projektu: doc. Ing. Josef Kolář, Csc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Grmela

Bytem: Bořetická 13, Brno

Narozen/a (datum a místo): 10.11.1985, Brno

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce

☐ diplomová práce

☒ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:

Vedoucí/ školitel VŠKP:

Ústav:

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v * :

☐ tištěné formě – počet exemplářů 1

☐ elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 4.června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popis funkce a struktury piezoelektrického motoru „piezowawes“, vytvoření jeho laboratorní sestavy a následné změření jeho základních statických charakteristik (rychlost posuvu a tažné síly).

Kromě experimentálních výsledků je práce zaměřena i na teoretický rozbor a fyzikální vysvětlení piezoelektrického jevu. Analýza se týká materiálů, ve kterých se tento jev vyskytuje a důležitých pojmů, pomocí kterých se piezoelektrický jev charakterizuje. Dále práce obsahuje základní členění typů piezoelektrických motorů a je pojednáno o možnostech jejich praktického využití.

Abstract

The goal of this bachelor thesis is description of function and structure of piezoelectric motor „piezowawes“, creation his laboratory formation and following measuring his static characteristic (feed speed / drawing force).

Except experimental conclusions is this thesis aim on theoretical analysis and physical explanation of piezoelectric phenomenon. This analysis contains materials and important definition which are dealing with this phenomenon. This thesis also contains basic distribution of each kind of piezomotor and discuss about their practical use.

Klíčová slova

deformace; elastické napětí; jezdec; moment síly; piezoelektrický jev; piezomotor; rotor; rychlost posuvu; stator; tažná síla;

Keywords

Deformation; drive rod; elastic tension; feed speed; drawing force; Piezomotor; rotory; stator; torque;

Bibliografická citace

Grmela, P. Mikropohon s lineárním piezomotorem, Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 63 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Mikropohon s lineárním piezomotorem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4.června 2008

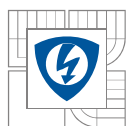
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Koláčnému, Csc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

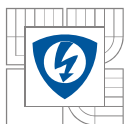
V Brně dne 4.6.2008

Podpis autora

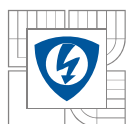


Obsah

1. ÚVOD	15
2. ZÁKLADNÍ POJMY PIEZOELEKTRINY	16
2.1 DEFINICE POJMŮ	16
2.2 ELEKTROSTRIKCE	16
2.3 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	17
2.4 TENZOR ELASTICKÉHO NAPĚTÍ	19
2.5 TENZOR ELASTICKÉ DEFORMACE	20
3. PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	21
3.1 PŘÍRODNÍ PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	21
3.1.1 KŘEMEN	21
3.1.2 TURMALÍN	21
3.1.3 VINÁNY	21
3.1.4 SÍRAN LITHITÝ	21
3.1.5 FOSFOREČNANY	21
3.1.6 LITHIUM NIOBÁT	22
3.1.7 LITHIUM TANTALÁT	22
3.1.8 GERMANIUM VIZMUT	22
3.2 KERAMICKÉ PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	22
3.3 ZVLÁŠTNÍ PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	23
4. PIEZOELEKTRICKÉ MOTORY	24
4.1 ÚVOD	24
4.2 HISTORIE VÝVOJE PIEZOMOTORŮ	24
4.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ TYPŮ PIEZOELEKTRICKÝCH MOTORŮ	25
4.4 PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR S POSTUPNOU VLNOU	25
4.5 PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR S VÍCEVRSTVOU PIEZOELEKTRICKOU STRUKTUROU	32
4.6 PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR S PEVNÝMI NEBO ELASTICKÝMI LAMELAMI	34
4.7 PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR HULA-HOOP	35
4.8 PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR PRACUJÍCÍ NA PRINCIPU PIEZO LEGS	38
4.8.1 CHODÍCÍ PRINCIP (THE WALKING PRINCIPLE)	40
4.8.2 ŘÍZENÍ PIEZO LEGS MOTORU	42
4.8.3 KONSTRUKCE PIEZO LEGS MOTORU	43
5. VÝKONOVÉ BUDIČE	44
6. PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR PIEZOWAVE™	46
6.1 OVLÁDÁNÍ PIEZOWAVE MOTORU:	47
6.1.1 RUČNÍ OVLADAČ:	48
6.1.2 PC OVLÁDÁNÍ	48
6.1.3 KOMPAKTNÍ OVLÁDÁNÍ	49
6.2 APLIKAČNÍ PŘÍKLADY	50
6.3 PŘÍKLADY HNACÍCH STUPŇŮ	50
6.4 ROZBOR CHARAKTERISTIKY UDÁVANÝCH VÝROBCEM	52

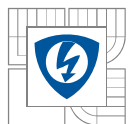


6.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY	55
7. VYUŽITÍ PIEZOMOTORŮ V PRAXI	59
7.1 V POLOVODIČOVÉ TECHNICE.....	59
7.2 V POLOHOVACÍ TECHNICE	59
7.3 VE SPOTŘEBNÍ ELEKTRONICE	59
7.4 ZÁMKY DVEŘÍ.....	59
7.5 V LETECKÉM PRŮMYSLU	59
7.6 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	60
7.7 TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE	60
8. ZÁVĚR.....	61
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62

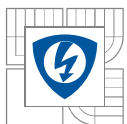


SEZNAM OBRÁZKŮ:

<i>Obrázek 1-1: Pohled na piezomotor „PiezoWave“ v reálné velikosti.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2-1: Obecný průběh deformace na intenzitě elektrického pole při elektrostripci.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2-2: Obecný průběh elastické deformace na intenzitě elektrického pole u piezoelektrického jevu</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2-3 : A)Schematizovaná struktura křemene B)Vznik nábojů při stlačení C)Při roztažení elementární krystalové buňky.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2-4: Rozložení vektorů elastického napětí působící na stranách elementární krychle....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2-5: Jednorozměrná deformace</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 4-1: Wiliamsův & Walterův piezoelektrický motor [5]</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4-2:Střídavě polarizovaná piezoelektrická vrstva</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4-3:Deformace vlivem přiloženého napětí.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4-4:Struktura piezoelektrického měniče (měnič tvoří dvě vrstvy)</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 4-5:Zobrazení postupné elastické vlny</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 4-6: Znárodnění vzniku eliptického pohybu bodu B na povrchu elastické vrstvy.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 4-7: Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru (měnič tvoří dvě vrstvy).....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4-8:Prstenec statoru Piezoelektrického motoru</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4-9 :Rozvinutý prstenec statoru piezoelektrického motoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4-10:konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru (měnič tvoří jedna vrstva).....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4-11: Struktura piezoelektrického měniče</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4-12:Princip vzniku eliptického pohybu na styčné ploše (vícevrstvý měnič).....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4-13: Mechanická konstrukce piezoelektrického motoru s lamelami.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4-14 :Princip činnosti piezoelektrického motoru s lamelami</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 4-15: Princip činnosti piezoelektrického motoru hula-hoop</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 4-16 : Trojfázové buzení piezoelektrického měniče.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 4-17: znázorňuje dva režimy pohybu, expanzi/kontrakci a ohnutí řídicích nohou.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 4-18: Prostor, ve kterém se vrchol řídicí nohy může pohybovat libovolně</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 4-19: Ukázka trajektorií v závislosti na druhu přiloženého napětí</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 4-20: Schematické znázornění chodícího principu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 4-21: Fázový posuv mezi řídicím napětím</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 4-22: Konstrukční provedení piezo legs motoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 4-23: element motoru složený z dvou párů řídicích noh.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 5-1: Buzení měniče s postupnou elastickou vlnou</i>	<i>44</i>



<i>Obrázek 5-2: Buzení měniče s postupnou elastickou vlnou (měnič se skládá z jedné vrstvy)</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 5-3: Buzení měniče kmitajícího radiálně</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 6-1: Části PiezoWave motoru</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 6-2: Základní schéma motoru</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 6-3: Hodnoty napětí</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 6-4: Resonanční LC obvod ovladače</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 6-5: Ruční ovladač motoru PiezoWave™</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 6-6: Řídící program</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 6-7: Řídící princip s induktorem v sérii s fází motor</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 6-8: Řídící obvod pro PiezoWave motor</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 6-9: Nízkonapěťové řízení pro PiezoWave motor</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 6-10: Grafická závislost rychlosti na frekvenci při různých zatíženích, napětím 8 V a teplotě 20°</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 6-11: Grafická závislost rychlosti na frekvenci při různých napětích, zatížením 0,1 N a teplotě 20°</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 6-12: Grafická závislost rychlosti na frekvenci při různých teplotách, napětí 8V a zatížení 0,1N</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 6-13: Grafická závislost rychlosti v_3 na daném zatížení</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 6-14: Grafická závislost rychlosti v_3 na daném zatížení</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 6-15: Laboratorní sestava Piezowawe motoru</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 6-16: Záběr z rychlostní kamery</i>	<i>58</i>



SEZNAM TABULEK:

<i>Tab. 6-1: Charakteristiky motoru.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6-2: Optimální elektrické hodnoty</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6-3: Minimální/maximální elektrické hodnoty</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6-4: Mechanická data</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6- 5: naměřené hodnoty pro v_3.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 6- 6: naměřené hodnoty pro v_2.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6- 7: naměřené hodnoty pro v_1.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6-8: Přehled rychlosti a řídicí frekvence jednotlivých stupňů při zatížení $F = 0.01$ N.....</i>	<i>58</i>

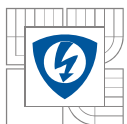
1. ÚVOD

Piezoelektrické motory jsou známy více jak čtyřicet let, avšak v posledních letech došlo k jejich velkému rozvoji v rozmanitém konstrukčním provedení, a to jak v rotačním, tak i lineárním.

Díky trendu dnešní elektrotechniky, kdy je snaha vyrábět součástky stále menších rozměrů, dochází k využívání piezoelektrických motorů stále častěji a to téměř ve všech jejích oblastech. Je pravda, že i běžné konvenční motory lze dnes realizovat v miniaturních rozměrech, ale jejich obrovskou nevýhodou ve vývoji těchto motorů, jsou příliš velké výrobní náklady oproti piezomotorům. Díky tomu jsou dnes piezomotory nejen levnější než běžné konvenční motory, ale díky letitému vývoji mají mnoho výhod, jako je menší hmotnost, snazší ovladatelnost a preciznost provedení. Proto většina světových společností snaží zavádět právě piezomotory do svých komerčně vyráběných produktů. Kladem jsou zejména malé geometrické rozměry, uspořádání, které umožňuje translační pohyb bez přídavných mechanických převodů a hlavně jednoduché a velmi přesné řízení pomocí standardní počítačových sběrnic (USB, IEEE488, sériový port). Tyto vlastnosti je předurčují k začlenění do přesných polohovacích zařízení.



Obrázek 1-1: Pohled na piezomotor „PiezoWave“ v reálné velikosti.



2. ZÁKLADNÍ POJMY PIEZOELEKTŘINY

2.1 Definice pojmů

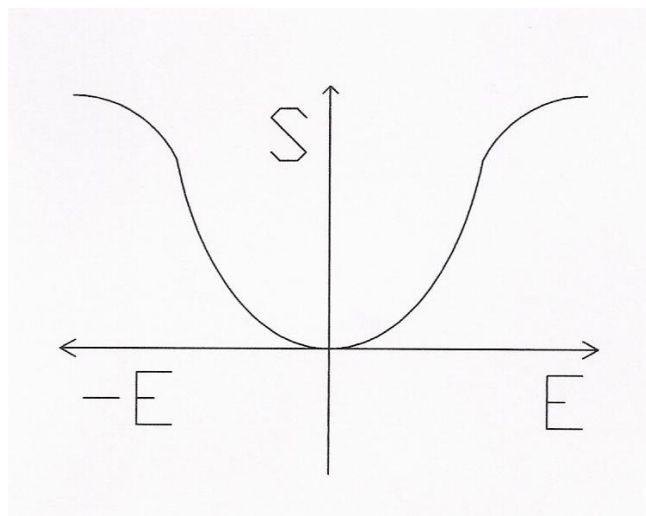
Piezoelektrické látky jsou zvláštní skupinou dielektrik, ve kterých existuje piezoelektrický jev jako určitý druh jejich elektrické deformace. Piezoelektrický jev v nejobecnějším vysvětlení je schopnost krystalu vlivem mechanické deformace generovat elektrické napětí. Existuje i jev opačný, který má praktické využití, kdy se krystal vlivem elektrického napětí deformuje. Tento jev se může vyskytovat pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen známý pod názvem „křišťál“. Vznik tohoto jevu se vysvětluje následovně. Mechanickou deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí. Tím se na určitých plochách krystalu vytvoří elektrické napětí. Napětí bývá řádově 10^{-7} V/Pa.

Při obráceném piezoelektrickém jevu způsobí elektrické pole posunutí iontů opačným směrem, což vede k deformaci krystalu.

Piezoelektrinu lze tedy definovat elektrickou polarizací vyvolanou mechanickou deformací krystalů náležících do určitých tříd. Polarizace je úměrná deformaci a mění s ní shodně znaménko. Vyvolání elektrické polarizace mechanickou deformací krystalu se nazývá přímý piezoelektrický jev. Převrácený jev je charakterizován deformací krystalu působením přiloženého elektrického pole [3].

2.2 Elektrostrikce

Je třeba poznamenat, že polarizace jakéhokoliv dielektrika je spojena s jeho určitou deformací. Deformace dielektrika se nazývá elektrostrikce. Elektrostrikce je obecnou vlastností látek a není podmíněna žádnou zvláštní atomovou strukturou dielektrika. Vzhledem k tomu, že deformace dielektrika při elektrostripci souvisí s energií elektrického pole, je s určitým přiblížením elektrostriční deformace úměrná čtverci vektoru intenzity elektrického pole $\vec{E}$ a není tedy závislá na její orientaci. Převrácený jev k elektrostripci však neexistuje. Deformace dielektrika při elektrostripci je znázorněna **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



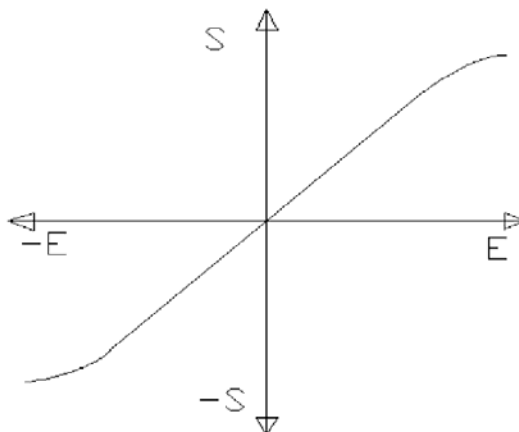
Obrázek 2-1: Obecný průběh deformace na intenzitě elektrického pole při elektrostripci

2.3 Piezoelektrický jev

Na rozdíl od elektrostriktce lze piezoelektrický jev pozorovat jen u některých látek a závislost elastické deformace je úměrná velikosti intenzity přiloženého elektrického pole a mění s ní shodně znaménko, jak znázorňuje obrázek 2-2. Současně s piezoelektrickým jevem se objevuje i jev elektrostriktce. Vzhledem k tomu, že u používaných piezoelektrických materiálů pracujeme z pravidla s malými hodnotami intenzity elektrického pole, je elektrostriktční deformace řádově menší než deformace způsobená piezoelektrickým jevem a můžeme ji zpravidla zanedbat. Základním rozdílem mezi piezoelektrickým a restrikčním jevem je fakt, že piezoelektrický jev lze pozorovat pouze u některých látek se specifickou krystalovou strukturou.

Bylo prokázáno, že piezoelektrickými mohou být výhradně krystaly, které nemají střed symetrie. Z 32 krystalografických tříd, do nichž byly zařazeny krystalografické látky dle symetrie, kterou vykazují, 20 tříd splňuje tuto podmínku. Je třeba říci, že u mnohých krystalických látek byl piezoelektrický jev sice prokázán, ale technicky je nepoužitelný.[4]

Vzhledem k tomu, že krystalické látky patří mezi tzv. látky anizotropní, tedy látky, které vykazují v různých směrech různé vlastnosti, lze u těchto látek vyvolat piezoelektrickou polarizaci deformací krystalu pouze ve vhodném směru. Piezoelektrickou deformaci lze vyvolat tlakem, tahem, ohybem, stříhem, nebo kombinací těchto mechanických deformací. Je důležité, že v určitém intervalu velikostí intenzit elektrického pole je piezoelektrická deformace na intenzitě závislá lineárně. Právě tato oblast se prakticky nejčastěji využívá.

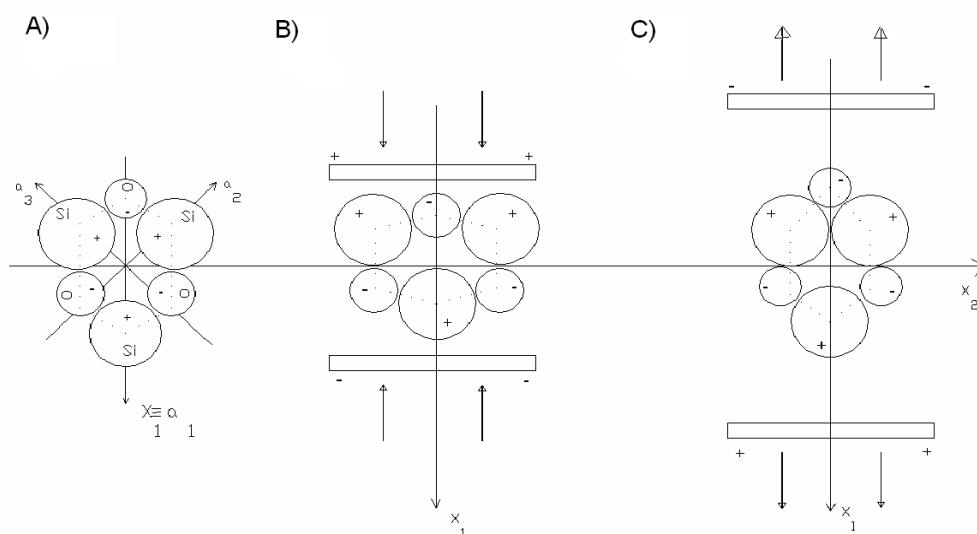


Obrázek 2-2: Obecný průběh elastické deformace na intenzitě elektrického pole u piezoelektrického jevu

Naproti tomu, vystavíme-li krystal působení vnějšího elektrického pole, může dojít ke vzniku podélné nebo střížné elastické deformace. Za jiných podmínek může působící elektrické pole způsobit deformaci krystalu danou superpozicí výše jmenovaných deformací.

Vznik elektrických nábojů na deformovaném krystalu a objasnění anizotropních vlastností lze vysvětlit pomocí obrázku 2-3. Z tohoto obrázku je zřejmý jak mechanismus elementární krystalové buňky, tak i rozdíl náboje bude-li buňka deformovaná v různých směrech.

Vzhledem k anizotropním vlastnostem piezoelektrických látek je nutné zcela jednoznačně popsat krystalovou strukturní mřížku a k této přidat soustavu souřadnic. Prvotně zavedená soustava souřadnic respektuje tvar elementárních buněk mřížky a tzv. Krystalografické osy se volí ve směru hran elementární buňky. Krystalografické osy označujeme shodně s hranami elementární buňky a, b, c , a úhly, které tyto osy vzájemně svírají, se označují α, β, γ [3].



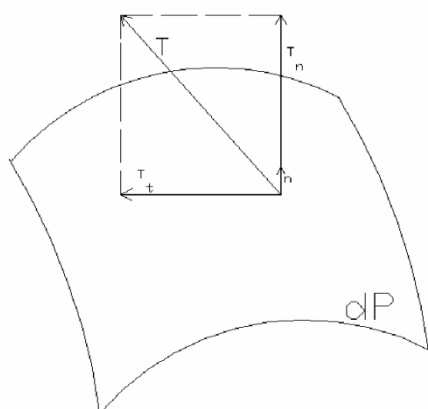
Obrázek 2-3 : A)Schematizovaná struktura křemene B)Vznik nábojů při stlačení C)Při roztahení elementární krystalové buňky

2.4 Tenzor elastického napětí

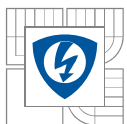
Předpokládejme, že na uvažované těleso působí jistá síla v libovolném směru. Přepočteme-li tuto sílu na jednotku plochy, na kterou působí, můžeme ji vyjádřit pomocí vektoru elastického napětí, resp. pomocí složek tohoto vektoru k elementární ploše dS bude působit normálové elastické napětí T_n . Podle směru působení se za kladný smysl uvažuje směr kladné normály a potom hovoříme o tahovém napětí.

Umístíme-li objemový element uvažovaného tělesa do ortogonálního systému os dle obrázku 2-4 můžeme na stěnách krychle popsat jednotlivé složky elastického napětí. Tyto složky lze napsat ve tvaru matice:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$



Obrázek 2-4: Rozložení vektorů elastického napětí působící na stranách elementární krychle



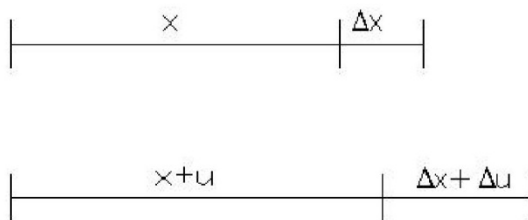
Jednotlivé složky byly označeny tak, že první index odpovídá směru, ve kterém složka napětí působí a druhý index označuje rovinu, která protíná příslušnou osu, ve které složka napětí působí. Obecně můžeme pro jednotlivé elastického napětí psát T_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$). Existuje tedy celkem 9 složek. Lze dokázat, že symbolem T_{ij} je označen tenzor druhého řádu a nazývá se tenzor elastického napětí.

2.5 Tenzor elastické deformace

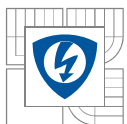
Základní definice elastické deformace si můžeme provést pro jednorozměrnou deformaci dle obrázku 2-5.

Mějme úsečku o délce x a sní elementární úsek Δx . Složka síly působící ve směru úsečky způsobí její prodloužení (nebo zkrácení) o hodnotu posunutí u a u elementárního úseku o hodnotu Δu . Jednorozměrná deformace bude definována vztahem:

$$e = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \quad (1.2)$$



Obrázek 2-5: Jednorozměrná deformace



3. PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY

3.1 Přírodní piezoelektrické materiály

3.1.1 Křemen

Křemen je nejpoužívanějším přírodním piezoelektrickým materiálem. Chemickým složením je to kyslíčník křemičitý SiO_2 . V přírodě se vyskytuje v několika modifikacích. Pro piezoelektrické účely se používá nízkoteplotní křemen, který se krystalizuje v soustavě trizonální, oddělení trizonálně trapezodrickém. V přírodě se nachází jako čistý křišťál, nebo v barevných odrůdách jako fialový ametyst a žlutá záhněda. Pro technické aplikace se téměř výhradně používá křišťál.

3.1.2 Turmalín

Turmalín je po chemické stránce složitý křemičitan. Krystalizuje v soustavě trigonální v oddělení ditrigonálně pyramidálním. Orientuje se k jediné elektrické ose Z (Z – řez)

3.1.3 Vinány

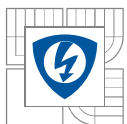
Vinány jsou soli kyseliny vinné. Typickým představitelem je tzv. Seignetova sůl – vínan sodnodraselný $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$. Označuje se zkratkou KNT (kaliumnatriumtartrát). Dále do této skupiny patří vínan ethylendiamantový (ethylendiamintartrát), ETD a vínan draselný (dikaliumpartrát) DKT.

3.1.4 Síran lithitý

V technických aplikacích se používá monohydrát síranu lithitého $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ označovaný zkratkou LSH.

3.1.5 Fosforečnany

Do této skupiny patří především fosforečnan amonný NH_4PO_4 , (kaliumdihydrofosfát) KDp.



3.1.6 Lithium niobát

Lithium niobát LiNbO_3 krystalizuje v soustavě trigonální, oddělení trizonálně pyramidálním. Teplota Curricova bodu je $(1195 \pm 15)^\circ\text{C}$. Monokrystaly mají hustotu $\rho = 4,63 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Pěstují se zpravidla Czochralského metodou tažení z taveniny při teplotě 1300°C .

3.1.7 Lithium tantalát

Lithium tantalát LiTaO_3 krystalizuje v soustavě trigonální v oddělení trizonálně pyramidálním. Teplota Currieva bodu je $(610 \pm 10)^\circ\text{C}$. Monokrystaly mají hustotu $\rho = 7,454 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Pěstují se zpravidla Czochralského metodou tažení z taveniny při teplotě 1680°C . Pro získání jednodoménových krystalů je nutné ohřát krystaly nad teplotu Currieho bodu a ochlazovat je při současném působení elektrického pole o intenzitě několik V na cm ve směru osy C.

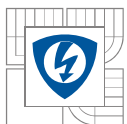
3.1.8 Germanium vizmut

Monokrystaly germania vizmutu Bi_{12}O_3 a GeO_{20} krystalizují v soustavě krychlové v oddělení pentagontritetráedrickém. Monokrystaly mají hustotu $\rho = 9,23 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Pěstují se Czochralského metodou tažení z taveniny při teplotě $(950 \pm 10)^\circ\text{C}$. Výchozím materiálem je čistý Bi_{12}O_3 a GeO_2 v poměru 6 : 1. Tavení výchozích složek se provádí v platinovém kelímku. Rychlost růstu je 5 až 20 mm za hodinu.

3.2 Keramické piezoelektrické materiály

První skupinu tvoří materiály na základě titaničitanu barnatého -BaTiO_3 , tyto materiály byly pro svoje negativní vlastnosti, jako je nízká provozní teplota, špatná časová i teplotní stabilita v podstatě vyřazeny z výrobního sortimentu všech výrobců piezokeramiky.

Druhá skupinu piezokeramických materiálů tzv. niobičnanová keramika je odvozena v postatě od dvou niobičnanů a to niobičnanu sodného (NaNbO_3) a olovnatého (PbNb_2O_6). Čistý NaNbO_3 nemá piezoelektrické vlastnosti a proto je nutné iont Na^+ částečně substituovat jiným iontem.



3.3 Zvláštní piezoelektrické materiály

Označení zvláštní není zcela vhodné, ale jedná se o materiály netradiční, u nichž existence piezoelektrického jevu je závislá na technologii výroby materiálů.

Piezoelektrické vlastnosti byly pozorovány např. na polovodičových materiálech CdS a ZnO jsou piezoelektrické v krystalické formě. Piezoelektrické vlastnosti mohou vykazovat, za určitých podmínek, i napařené vrstvy CdS nebo napařené vrstvy ZnO.

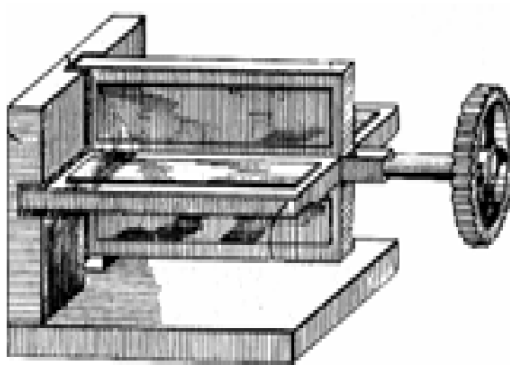
4. PIEZOELEKTRICKÉ MOTORY

4.1 Úvod

V současné době mnoho firem a výzkumných pracovišť pracuje na vývoji nových motorů využívající nepřímý piezoelektrický jev. Podstatou funkce piezoelektrických motorů je vyvolání deformace povrchové vrstvy statoru, která se v rozmanitém konstrukčním provedení motoru převádí na rotační pohyb rotoru.

4.2 Historie vývoje piezomotorů

Počátek vývoje piezoelektrických motorů začíná od roku 1942. V tomto roce Alfred L.W.Wiliams a Walter J. Brown založili společnost, která oznámila výrobu prvního piezoelektrického motoru, za který obdrželi patent od US patentové kanceláře v roce 1948. Jejich vynález obsahoval proces převedení vícefázového signálu na mechanický pohyb využívající piezoelektrického jevu. Použili rozdílné typy piezoelektrických ohybových akčních členů tak, aby vibrační pohyb byl převeden na pohyb rotační působící na rotor motoru.



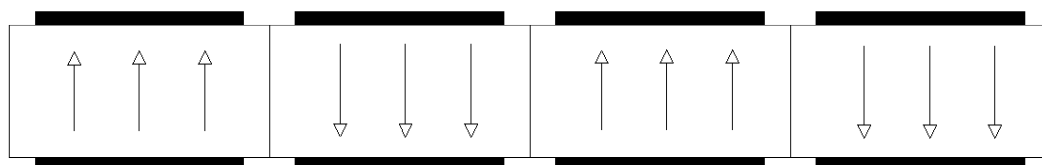
Obrázek 4-1: Wiliamsův & Walterův piezoelektrický motor [5]

4.3 Základní rozdělení typů piezoelektrických motorů

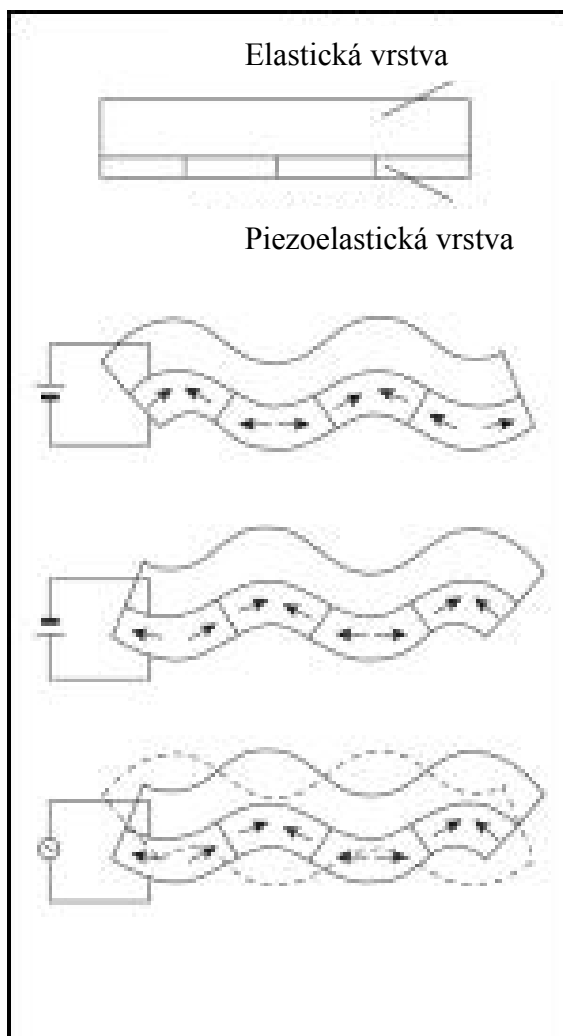
- Piezoelektrické motory využívající stojaté vlny
- Piezoelektrické motory využívající postupnou elastickou vlnu
- Piezoelektrické motory využívající mód dvojité vibrace (využívá se konverze k získání dvou vibračních módů, které jsou vyvolány jedním piezoelektrickým prvkem, motor je buzen pouze jedním harmonickým signálem, a nelze tedy realizovat reverzaci chodu motoru)
- Piezoelektrické motory využívající vícenásobný vibrační mód (motor používá jeden tzv. multi-mode vibrátor, který je buzen jedním nebo dvěma piezoelektrickými prvky – pro konstrukci motoru mohou být využívány různé vibrační módy)
- Piezoelektrické motory hybridní (využívají se dva oddělené vibrační systémy, které pracují zcela nezávisle)
- Piezomotory využívající principu piezolegs

4.4 Piezoelektrický motor s postupnou vlnou

Existuje několik způsobů jak vyvolat postupnou elastickou vlnu. Předpokládejme piezoelektrickou vrstvu, v které se střídají opačně polarizované úseky (viz Obrázek 4-2). Přiložením stejnosměrného napětí mezi elektrody nastane objemová deformace piezoelektrického elementu. Předpokládejme, že úseky, které jsou polarizovány v jednom smyslu, zvětší svoji tloušťku, zatímco úseky polarizované opačně se zeslabí. Spojíme-li pevně s piezoelektrickým prvkem elastickou vrstvu, nastane při přiložení napětí sinusové prohnutí elastické vrstvy podle obrázku 4-3 [1].

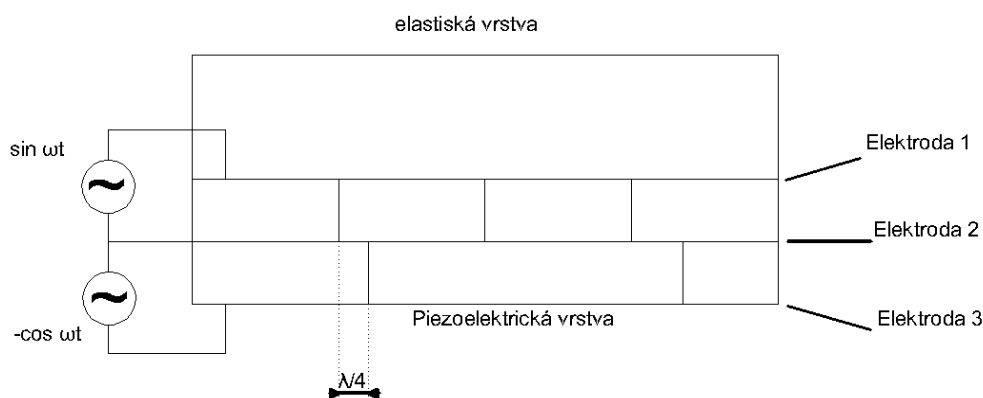


Obrázek 4-2: Střídavě polarizovaná piezoelektrická vrstva



Obrázek 4-3: Deformace vlivem přiloženého napětí

Při přiložení střídavého napětí vznikne stojatá elastická vrstva. V elastické vrstvě se vybudí stacionární ohybové deformace. Spojíme-li dvě piezoelektrické vrstvy se střídajícími se úseky opačné polarizace podle obrázku 4-4 (délka úseku je $\lambda/2$) tak mezi úseky jedné a druhé vrstvy bude posuv o polovinu délky úseku (tj. $\lambda/4$) dostaneme piezoelektrický měnič, který je schopen generovat postupnou povrchovou elastickou (akustickou ultrazvukovou) vlnu.



Obrázek 4-4: Struktura piezoelektrického měniče (měnič tvoří dvě vrstvy)

Přiložíme-li na elektrodu 1 střídavé napětí $u_1(t) = U_1 \sin(\omega t)$ s vhodně voleným kmitočtem ω , jehož vlnová délka λ odpovídá délce dvou úseků, vybudí piezoelektrický prvek pod elektrodou 1 stojaté vlny. Zvolíme-li orientaci piezoelektrického měniče tak, že osa z bude kolmá k povrchu měniče, lze elastické posunutí povrchového bodu A piezoelektrické vrstvy pod elektrodou 1 ve směru osy z popsat rovnicí :

$$u_z^{(1)} = U \cdot \sin(kx) \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

kde

Umaximální rozkmit povrchového bodu, který je závislý na velikosti napětí U_1

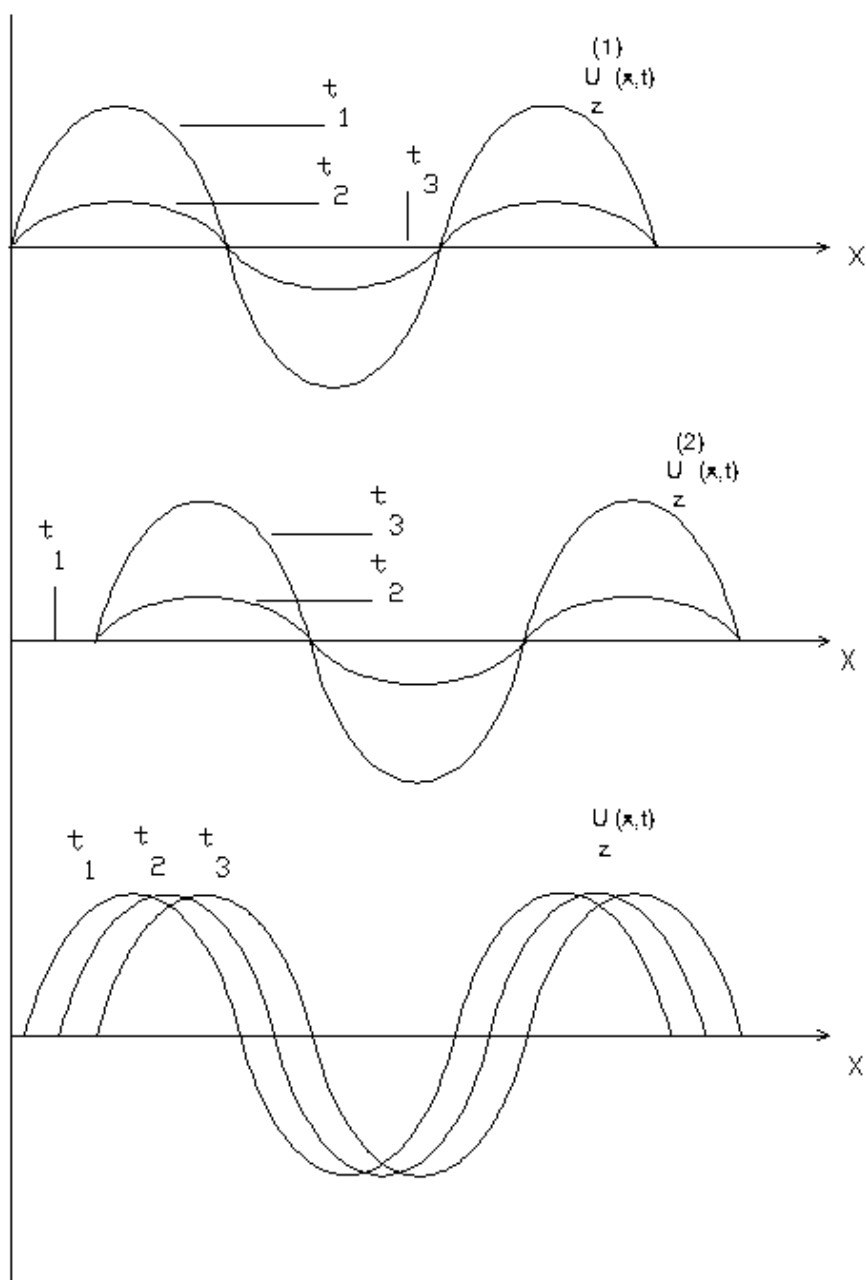
vrychlost postupné elastické vlny ve směru x ,

$k = \omega/v$ je vlnové číslo.

Přiložíme-li na elektrodu 2 střídavé napětí $u_2(t) = -U_1 \cos(\omega t)$, vybudí piezoelektrický prvek pod elektrodou 2 také stojaté vlny. Elastické posunutí povrchového bodu B piezoelektrické vrstvy pod elektrodou 2 ve směru osy z bude

$$u_z^{(2)} = U \cdot \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

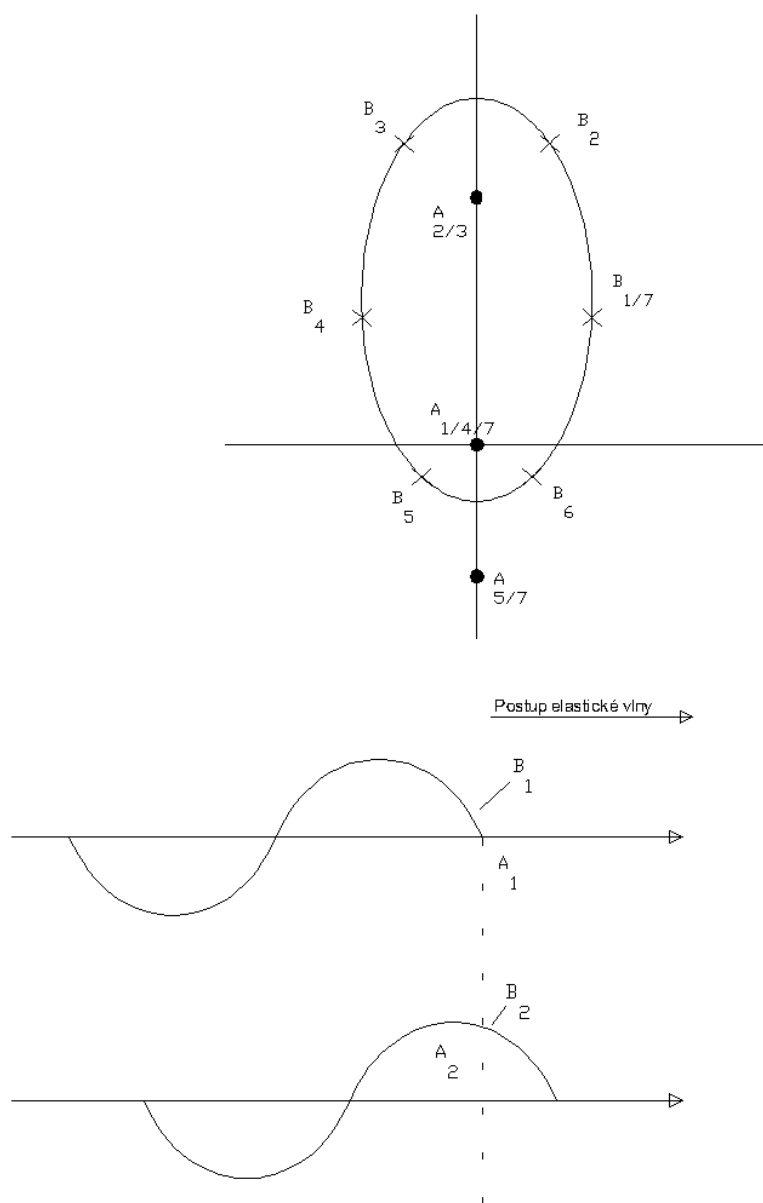
Fázový posuv mezi jednotlivými průběhy ohybové deformace je $\lambda/4$. Složením obou posunutí získáme výsledné elastické posunutí $u_z(x, t)$, které má charakter posunuté elastické vlny postupující ve směru osy x . (Obrázek 4-5).



Obrázek 4-5:Zobrazení postupné elastické vlny

$$u_z = u_z^{(1)} + u_z^{(2)} = U \cos[k(x-vt)] \quad (3.3)$$

Pro unášení rotoru motoru postupnou elastickou vlnou, která se šíří na povrchu statoru je nezbytné, aby povrchové částice statoru vykonávaly eliptický pohyb v rovině tvořené směrem šíření elastické vlny a normálou k povrchu statoru. Stator je tvořen piezoelektrickou vrstvou, na které jsou na vhodných místech umístěny elektrody a elastickou vrstvou pevně spojenou s piezoelektrickým prvkem. Na obrázku 4-6 je znázorněn pohyb bodu A, který je na povrchu piezoelektrického prvku a vykonává pouze vertikální pohyb, a bodu B, který je na povrchu elastické vrstvy a který již vykonává požadovaný eliptický pohyb.

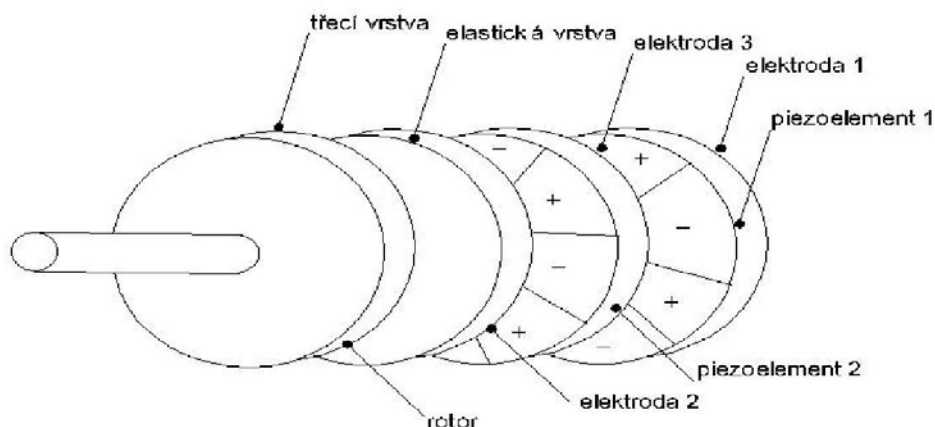


Obrázek 4-6: Znázornění vzniku eliptického pohybu bodu B na povrchu elastické vrstvy

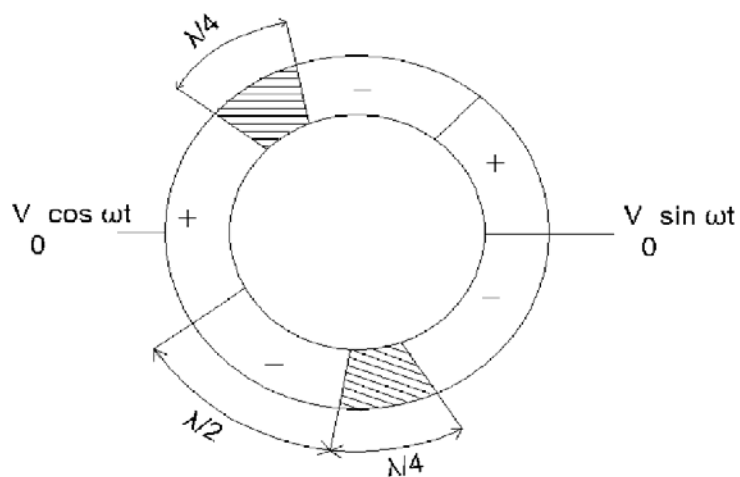
Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru používaného v praxi, který pracuje na uvedeném principu, je na obrázku 4-7. Motor se skládá z rotoru a statoru, které mají tvar budící frekvencí (desítky kilohertzů) a zdvihem (jednotky mikrometrů). Rotor se tedy během jedné periody budícího signálu pootočí o jeden obvod elipsy. Piezoelektrický měnič a indukčnost budícího elektrického obvodu představují rezonanční obvod naladěný na vlastní frekvenci statoru. Maximální otáčky rotoru leží v blízkosti vrcholu rezonanční křivky.

Další způsob vytvoření postupné elastické vlny spočívá v použití pouze jedné piezoelektrické vrstvy, v níž se střídají opačně polarizované úseky. Délka úseku je rovna $\lambda/2$. S touto piezoelektrickou vrstvou je pevně spojena elastická vrstva. Systém elektrod je vytvořen tak, aby mezi elektrodou 1 a 2 byla vzdálenost poloviny úseku (tj. $\lambda/4$) (obrázek 3-7 a obrázek 3-8).

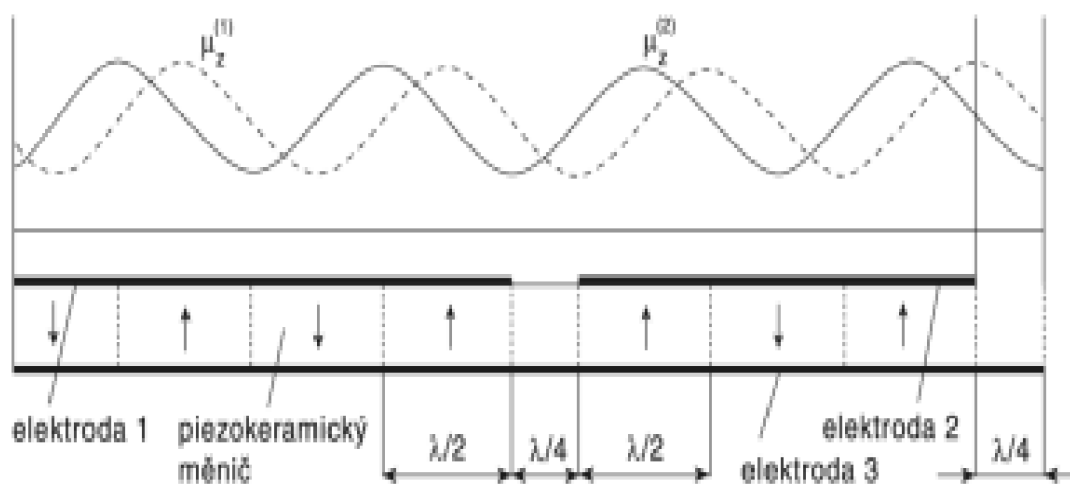
Přiložíme-li na elektrody jednotlivých piezoelektrických měničů napětí s harmonickým průběhem vzájemně posunutým o 90° budou rozkmitány jednotlivé měniče stojatými kmity. Působením dvou budících systémů navzájem prostorově (o $\lambda/4$) a časově ($T/4$) posunutých stojatých vln ohybových kmitů dostaneme v elastické vrstvě postupnou povrchovou vlnu. Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru v praxi, který pracuje na uvedeném principu, je na obrázku 3-9.



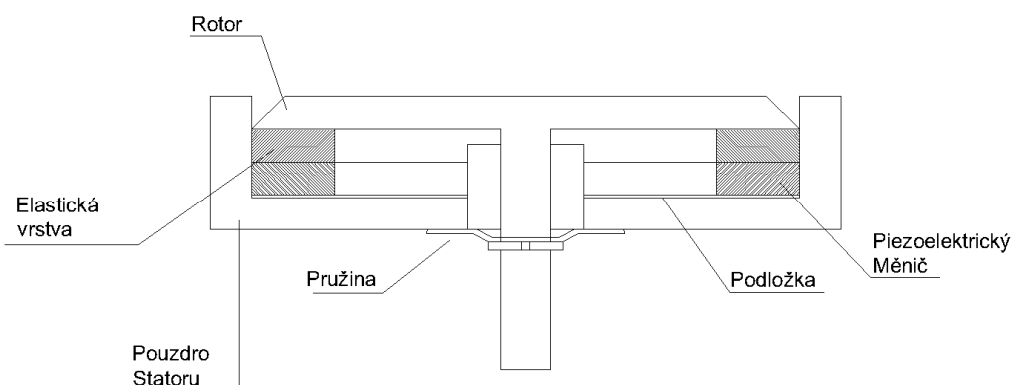
Obrázek 4-7: Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru (měnič tvoří dvě vrstvy)



Obrázek 4-8: Prstenec statoru Piezoelektrického motoru



Obrázek 4-9 : Rozvinutý prstenec statoru piezoelektrického motoru

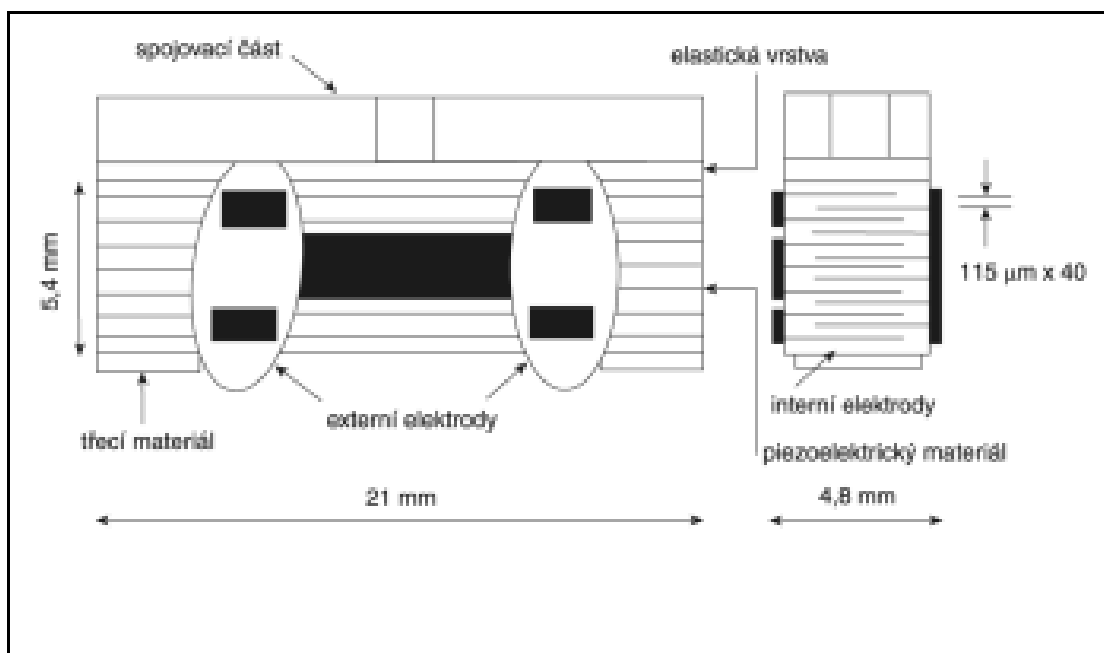


Obrázek 4-10: konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru (měnič tvoří jedna vrstva)

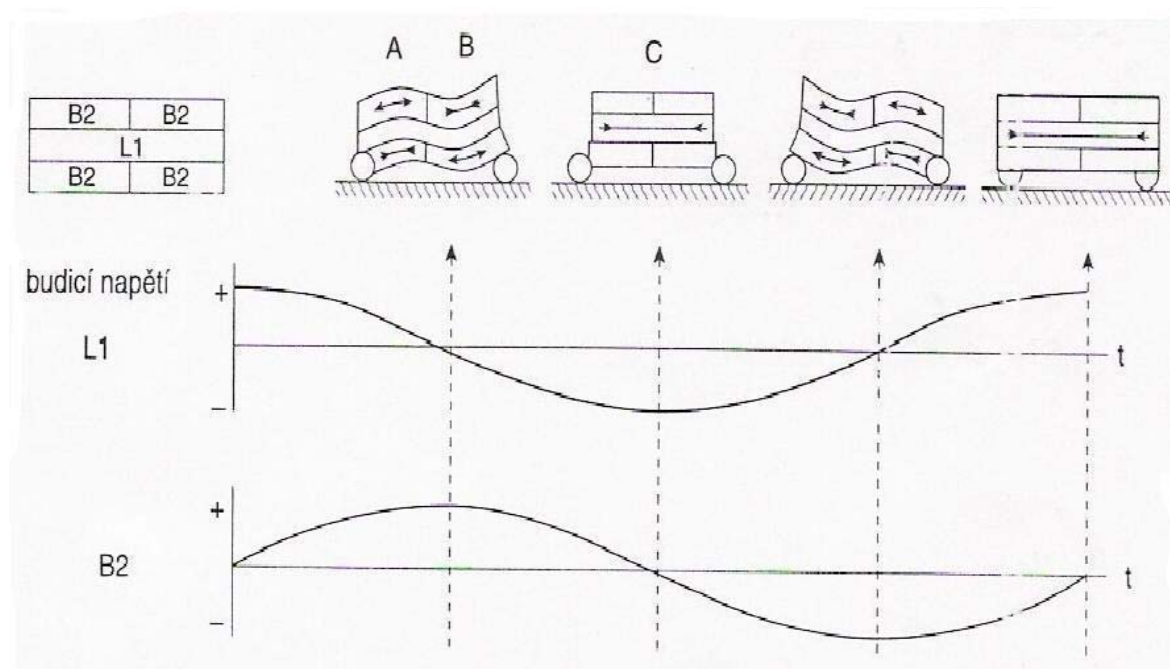
4.5 Piezoelektrický motor s vícevrstvou piezoelektrickou strukturou

Piezoelektrický měnič s vícevrstvou strukturou je znázorněn na obrázku 4-11. Je použito čtyřicet vrstev piezoelektrického materiálu, každá o tloušťce $115\mu\text{m}$ s nalepenými plošnými interními elektrodami. Horní a dolní stranu vibrátoru pokrývá vrstva izolačního materiálu. Boční strany obsahují nalepené externí elektrody. Na jedné straně je pět samostatných elektrod (podle volby módu měniče). Na druhé straně je společná zemnicí elektroda. Rozměry jsou voleny tak, aby rezonanční frekvence byla 75kHz . Uvedená struktura měniče je vhodná pro konstrukci lineárních motorů.

Princip vzniku pohybu je uveden na obrázku 4-12. Podélné kmity L_1 jsou generovány expanzí a kontrakcí části označené C. Příčné kmity B_2 vznikají rozdílným pohybem čtyř prvků označených A a B, které jsou umístěny v rozích měniče. Protichůdných pohybů částí označených A a B je dosahováno opačnou polarizací. Shodně polarizované jsou části v protilehlých rozích. K napájení slouží dvě střídavá napětí s fázovým posunem 90° . Jedno napětí je určeno pro buzení kmitů L_1 a druhé pro buzení kmitů B_2 . Frekvence těchto napětí musí být blízká hodnotě rezonanční frekvence podélných a příčných kmitů. Sloučením podélných a příčných kmitů jednotlivých částí budou povrchové body styčných ploch vykonávat eliptický pohyb s extrémním zdvihem, který umožní unášení rotoru.[1]



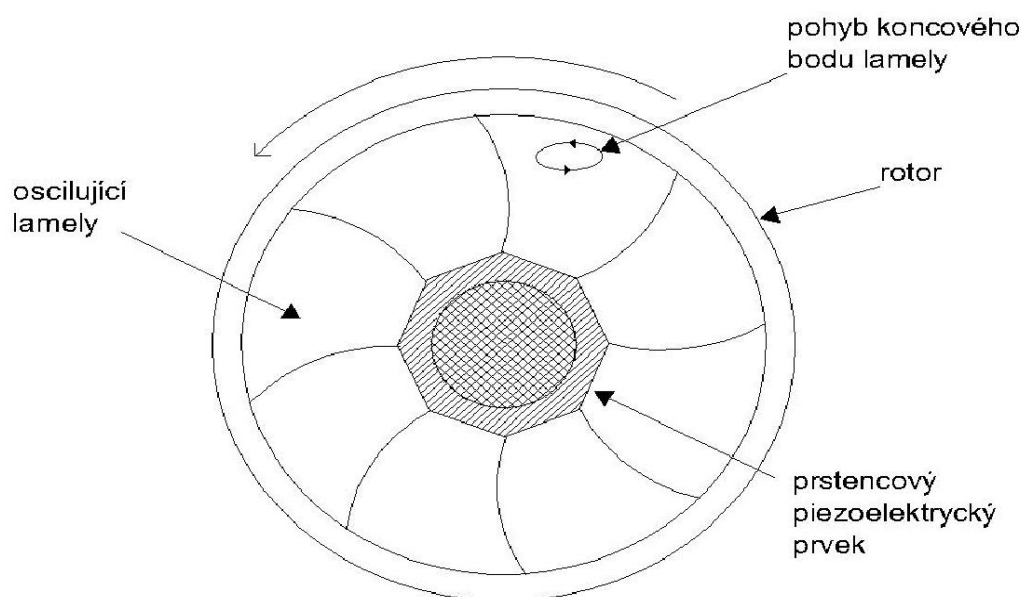
Obrázek 4-11: Struktura piezoelektrického měniče



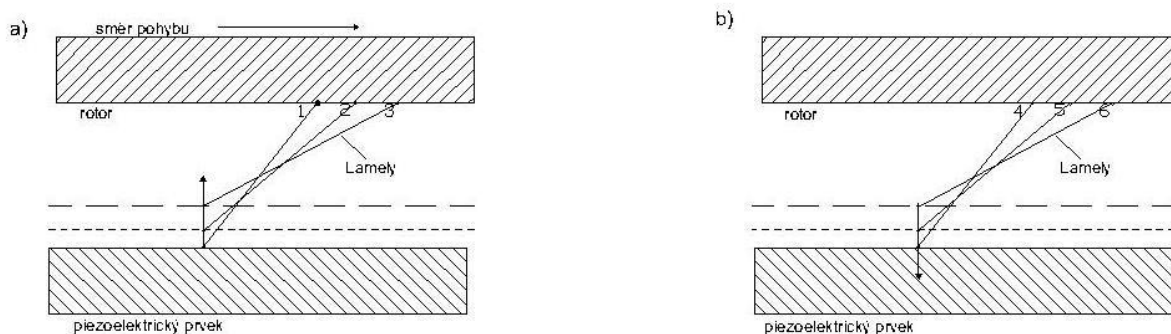
Obrázek 4-12: Princip vzniku eliptického pohybu na styčné ploše (vícevrstvý měnič)

4.6 Piezoelektrický motor s pevnými nebo elastickými lamelami

Mechanická konstrukce je znázorněna na obrázku 4-13. Lamely jsou pevně uchyceny na prstencovém piezoelektrickém prvku, který je součástí statoru, a jsou vějířově rozloženy po jeho obvodu. Rotor je ve tvaru prstence, který je nasazen na lamely tak, aby na ně vykonával radiální mechanický tlak. Stator vibruje kolmo na pohyb rotoru. Každá lamela je fixována pod určitým úhlem Φ , který se mění v závislosti na zdvihu povrchu piezoelektrické vrstvy. Na obrázku 4-14a) je znázorněn pohyb lamely při zvětšování tloušťky piezoelektrického prvku. Volný konec lamely vykonává pohyb, při němž posunuje rotor ve směru pohybu (pozice koncového bodu 1,2,3). Na obrázku 4-14b je znázorněn pohyb, při němž se vrací zpět do výchozí pozice bez silového působení na rotor (pozice koncového bodu 4,5,6). V této fázi nastává prokluz mezi rotorem a lamelami. Tyto dvě sekvence se opakují, a tak vzniká otáčivý pohyb rotoru.



Obrázek 4-13: Mechanická konstrukce piezoelektrického motoru s lamelami



Obrázek 4-14 :Princip činnosti piezoelektrického motoru s lamelami

4.7 Piezoelektrický motor Hula-hoop

Tento motor využívá radiální kmity a osově nesymetrický vibrační mód. Na obrázku 4-15a) je znázorněn průběh deformace piezoelektrické vrstvy, která je v tomto případě v radiálním směru. Tyto motory se budí také pomocí dvou harmonických signálů s fázovým posuvem 90° . V důsledku působení dvou budících harmonických signálů vzájemně posunutých o 90° vznikají pod jednotlivými elektrodami piezoelektrického měniče stojaté kmity v radiálním směru. Elastická posunutí povrchového bodu v radiálním směru v závislosti na úhlu natočení Φ a času t jsou popsány těmito rovnicemi:

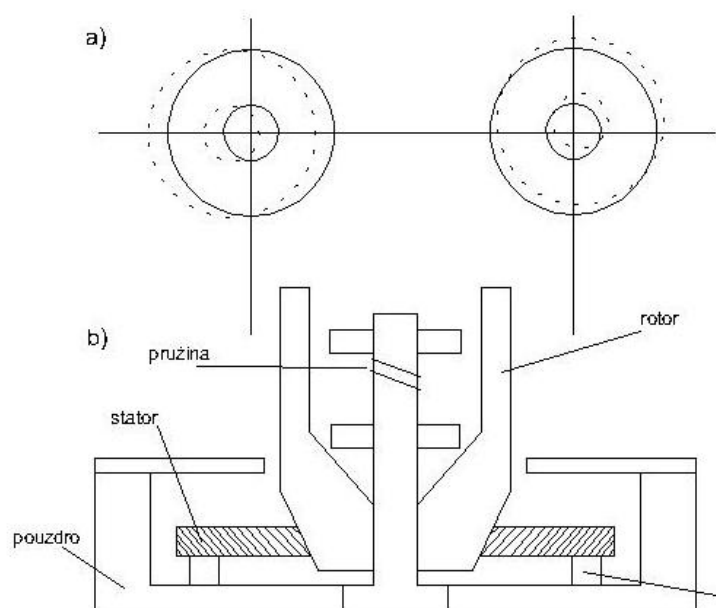
$$u_a(\Phi, t) = U \sin(n\Phi) \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

$$u_b(\Phi, t) = U \cos(n\Phi) \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

Složením těchto kmitů dostaneme vztah pro průběh elastického posunutí v radiálním směru, který má charakter postupné elastické vlny.

$$u_a(\Phi, t) = U \cos(\omega t - n\Phi) \quad (3.6)$$

Výsledkem působení těchto dvou signálů je rotující elastická vlna, která umožňuje unášení rotoru. Konstrukční uspořádání motoru, který pracuje na uvedeném principu, v praxi je na Obrázek 4-15b.



Obrázek 4-15: Princip činnosti piezoelektrického motoru hula-hoop

Teoreticky je možné realizovat i trojfázové buzení piezoelektrického motoru. Předpokládejme, že měnič je uspořádan podle obrázku 3-15. V důsledku působení tří harmonických signálů vzájemně posunutých o $2/3\lambda$ vzniknou pod jednotlivými elektrodami stojaté kmity v radiálním směru. Elastická posunutí povrchového bodu v radiálním směru jsou popsána těmito rovnicemi:

$$u_1(\Phi, t) = U \sin(n\Phi) \sin(\omega t) \quad (3.7)$$

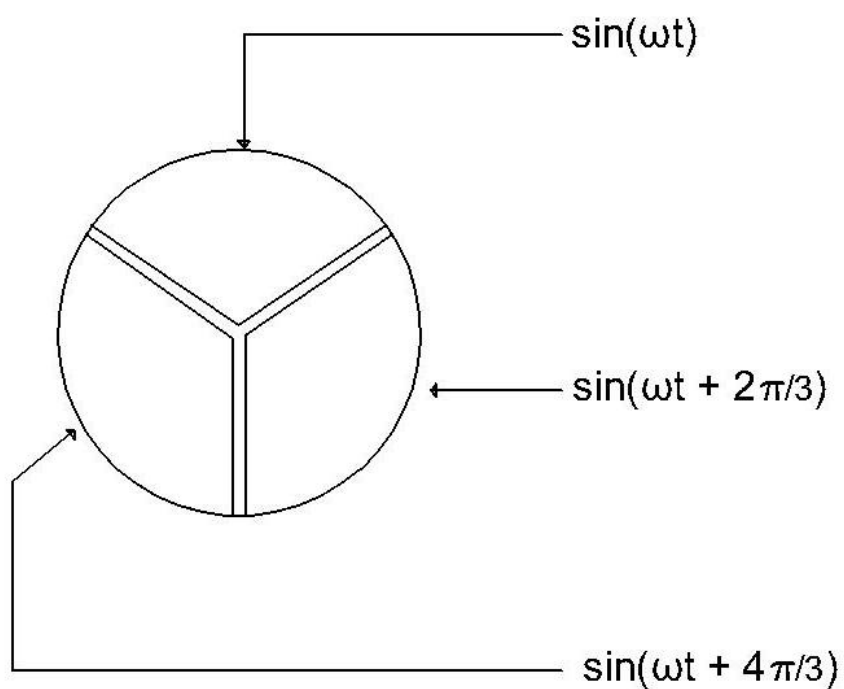
$$u_2(\Phi, t) = U \sin(n\Phi + 2\pi/3) \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (3.8)$$

$$u_3(\Phi, t) = U \sin(n\Phi + 4\pi/3) \sin(\omega t + 4\pi/3) \quad (3.9)$$

Složením všech kmitů dostaneme vztah pro průběh elastického posunutí povrchového bodu na obvodu statoru. [1]

$$n(\Phi, t) = 3U/2 \cos(\omega t - n\Phi) \quad (3.10)$$

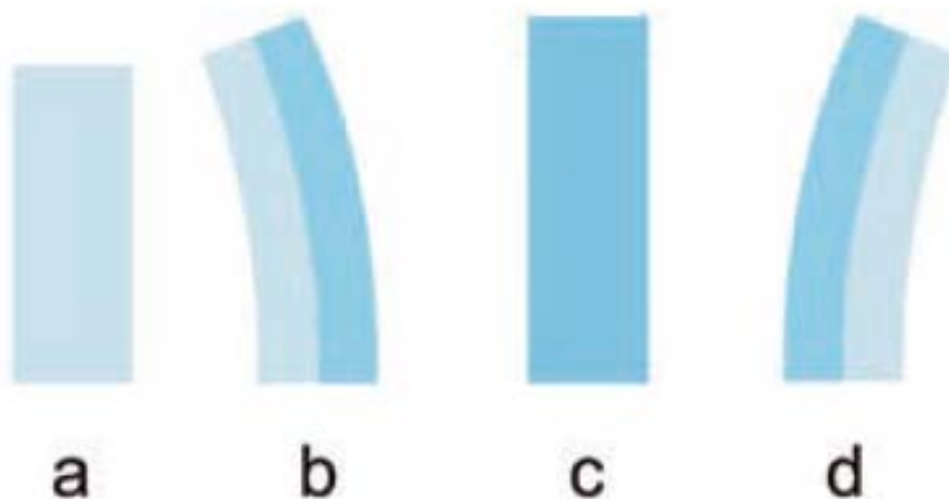
Jde o postupnou elastickou vlnu, kde n závisí na zvoleném vibračním módu.



Obrázek 4-16 : Trojfázové buzení piezoelektrického měniče

4.8 Piezoelektrický motor pracující na principu piezo legs

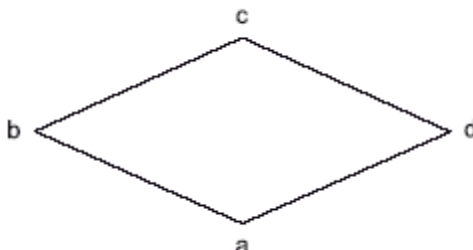
Motory piezo legs obsahují soustavu piezokeramických řídicích nohou (piezo legs). Počet těchto řídicích nohou je závislý na konfiguraci motoru. Tyto nohy mohou být považovány za bimorfnní krystalickou piezokeramiku. Tuto keramiku můžeme popsat jako dvě piezokeramické vrstvy s jednou střední a dvěma vnějšími elektrodami vzájemně elektricky odděleny od sebe. Díky tomuto provedení je přiloženým napětím možné aktivovat každou vrstvu zvlášť. Tyto pohyby znázorňuje Obrázek 4-17.



Obrázek 4-17: znázorňuje dva režimy pohybu, expanzi/kontrakci a ohnutí řídicích nohou.

- a) znázorňuje řídicí nohu bez přiloženého napětí
- b) řídicí napětí je přiloženo na pravou část řídicí nohy (přiložené napětí je v obrázku vyznačeno tmavě)
- c) zobrazuje výsledné napětí přiložené na obě strany. Ve srovnání s případem a) se celá noha lineárně prodlouží
- d) zobrazuje stejný děj jako v případě a) s přiloženým napětím na druhou stranu řídicí nohy

Vrchol řídicí nohy se může libovolně pohybovat v určité oblasti, jestliže není připojena žádná zátěž. Při ideálním prohnutí a malých zdvizech, tento prostor představuje kosočtverec. Obrázek 3-17 zobrazuje pozici vrcholu řídicí nohy s přiloženým napětím.



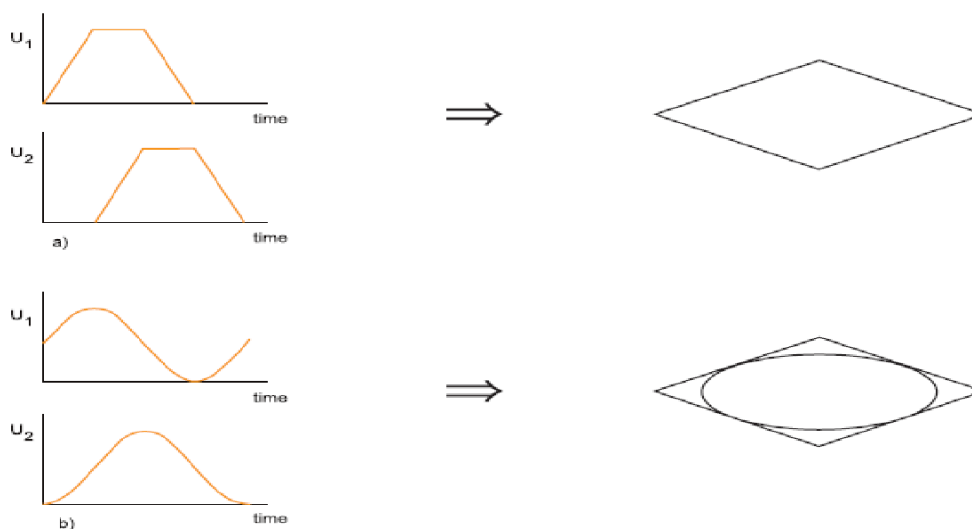
Obrázek 4-18: Prostor, ve kterém se vrchol řídicí nohy může pohybovat libovolně

Ohyb v ose x a expanze/kontrakce v ose z řídicího elementu popisují následující rovnice:

$$\begin{aligned}x(t) &= k_1[u_1(t) - u_2(t)] \\ z(t) &= k_2[u_1(t) + u_2(t)]\end{aligned}\tag{3.11}$$

k_1 a k_2 jsou konstanty závislé na druhu materiálu, geometrii, řídicích podmínkách atd. Jestliže přiložíme fázově posunutý opakující se napěťový signál k příslušné straně řídicí nohy, vrchol této nohy se bude pohybovat podél určité trajektorie, kterou určuje pohybový prostor. Jako příklad, přiložené řídicí fázově posunuté napětí u_1 a u_2 lichoběžníkového průběhu jak znázorňuje obrázek 3-18a. Vrchol řídicí nohy bude opisovat strany kosočtverce. V druhém případě (obrázek 3-18b) řídicí napětí je opět fázově posunuté avšak sinusového průběhu, což má za následek eliptickou trajektorii pohybu vrcholu řídicí nohy.

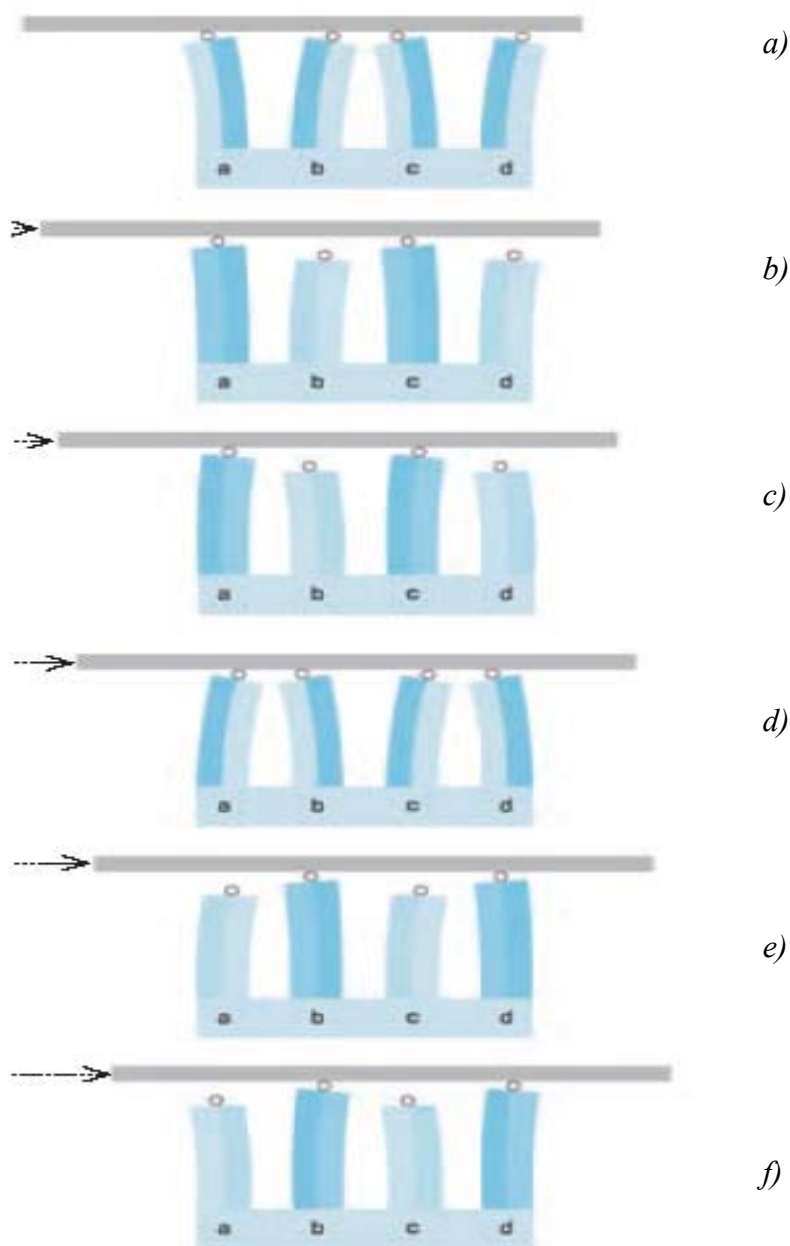
Optimální fázový posuv závisí na řídicích podmínkách, geometrii, materiálu noh, atd., a musí být přizpůsobený pro jednotlivou aplikaci.



Obrázek 4-19: Ukázka trajektorií v závislosti na druhu přiloženého napětí

4.8.1 Chodící princip (The Walking principle)

Využití řídicího principu motoru je statického typu, což znamená, že pozice řídicích nohou je známa v každém daném momentu. Obrázek 4-20 popisuje tento chodící princip. Tmavější odstín na stranách řídicích nohou představuje vyšší přiložené napětí. Za element motoru považujeme dva páry řídicích nohou, které pracují nezávisle. Řídící nohy a) a c) představují první pár, který pracuje synchronně. Stejně tak nohy b) a d) tvoří druhý pár, který pracuje rovněž synchronně.[7]



Obrázek 4-20: Schematické znázornění chodícího principu

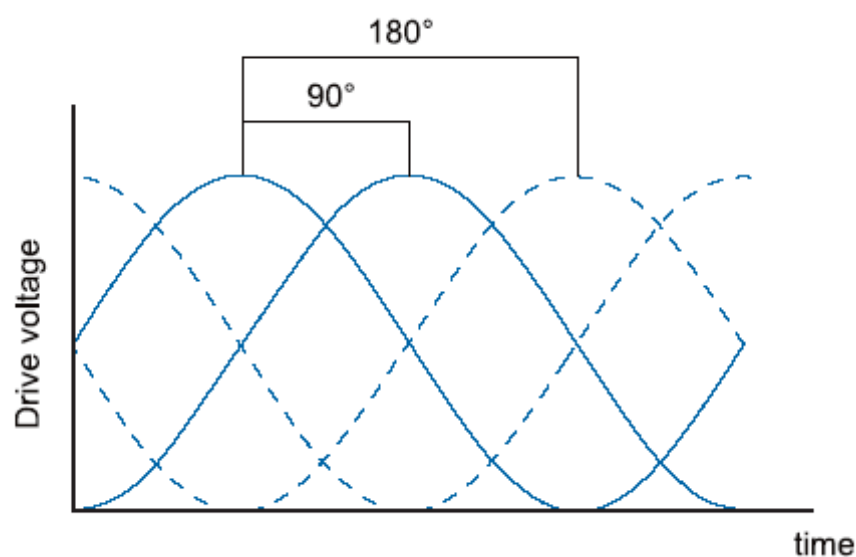
a) Řídicí cyklus začíná s oběma páry v kontaktu s řídicí tyčí. Nohy prvního páru (a,c), jsou ohýbány doleva a druhý pár (b,d) je ohýbán směrem doprava.

b) U prvního páru dochází k expanzi a zároveň k prohnutí směrem doprava. Druhý pár je smršťován a ohýbán doleva. Což má za následek, že první pár ztrácí kontakt s řídicí tyčí a tyč se posouvá ve směru ohybu druhého páru.

- c) Po čase, kdy řídící nohy změni svůj záběr, nohy prvního páru jsou smršťovány a ohýbány doprava druhý pár je vysouván vzhůru a ohýbán doprava.
- d) Změna záběru dvou párů znamená, že druhý pár se znovu dostane do kontaktu s řídící tyčí ale v jiné pozici.
- e) Nohy druhého páru (b, d) jsou vysouvány vzhůru s prohnutím vpravo, v okamžiku kdy nohy prvního páru jsou smršťovány. Výsledek je, že první pár ztrácí kontakt s řídící tyčí a tyč se pohybuje v záběru druhého páru.
- f) Řídící nohy opět změni svůj záběr. Nohy prvního páru jsou smršťovány a ohýbány vpravo.

4.8.2 Řízení piezo legs motoru

Chodící princip nám říká, že je potřeba užít dvou fází, protože motor obsahuje dva nezávislé páry řídících nohou. Každá jednotlivá noha potřebuje svůj řídící signál. Jednotlivé signály jsou řazeny do fází. Fázový posuv mezi nohami v páru je 90° a fázový posuv mezi dvěma páry řídících nohou je 180° . Obrázek 4-21 schematicky znázorňuje fázový posuv mezi řídícím napětím, v tomto případě při sinusovém průběhu. Plné čáry znázorňují průběh prvního páru řídících nohou přerušované průběh druhého páru [7].

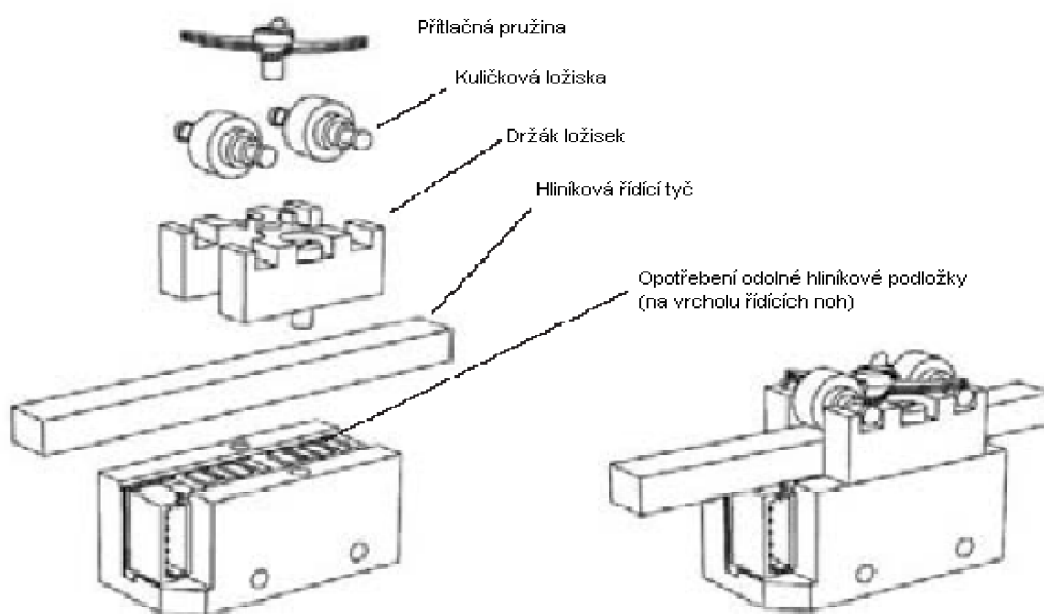


Obrázek 4-21: Fázový posuv mezi řídícím napětím

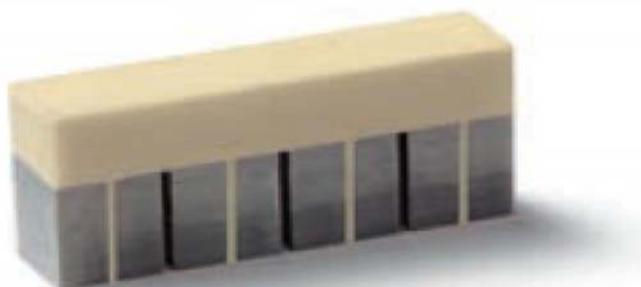
4.8.3 Konstrukce piezo legs motoru

Princip je založen na třecí síle vzniklé mezi řídicí tyčí a řídicími nohami. Aby došlo k potřebnému tření je zapotřebí síly přitlačné, která je u tohoto typu motoru zajišťována přitlačnou pružinou. Na obrázku 4-22 je znázorněno celé konstrukční řešení tohoto motoru. Tato konstrukce je názorným příkladem lineárního piezoelektrického motoru, který může být využit v nejrůznějších aplikacích.

Tento lineární piezoelektrický motor je složený z minimálního množství komponentů, což dává motoru výslednou jednoduchost a robustnost celé konstrukci.



Obrázek 4-22: Konstrukční provedení piezo legs motoru

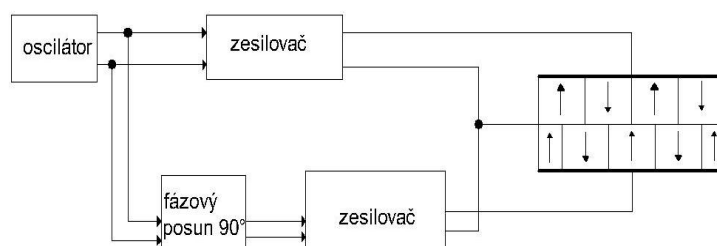


Obrázek 4-23: element motoru složený z dvou párů řídicích noh

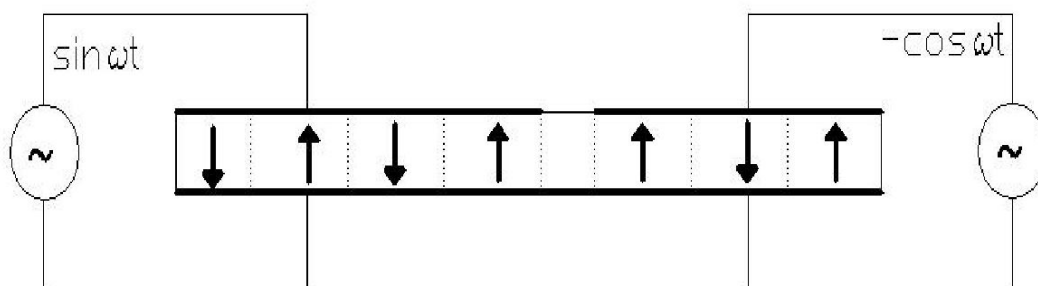
5. VÝKONOVÉ BUDIČE

Každý piezoelektrický motor musí být vybaven speciálním výkonovým budičem, jehož zapojení závisí na typu motoru, jeho výkonu a dalších požadavcích kladených na funkci pohonu. Budič musí zajistit generování jednotlivých signálů, jejich správný kmitočet, fázový posuv, výstupní impedanci a výstupní výkon. Při návrhu budiče je nutné správně navrhnout impedanční přizpůsobení, protože impedance piezoelektrického motoru (piezoelektrického měniče) je silně frekvenčně závislá. Při návrhu zapojení budiče je nutné zohlednit požadavky na řízení piezoelektrického motoru. Pracuje-li motor s postupnou vlnou a piezoelektrický měnič se skládá ze dvou vrstev, v nichž se střídají opačně polarizované úseky, a měnič kmitá příčnými kmity, je možné budič realizovat podle obrázku 5-1 [1].

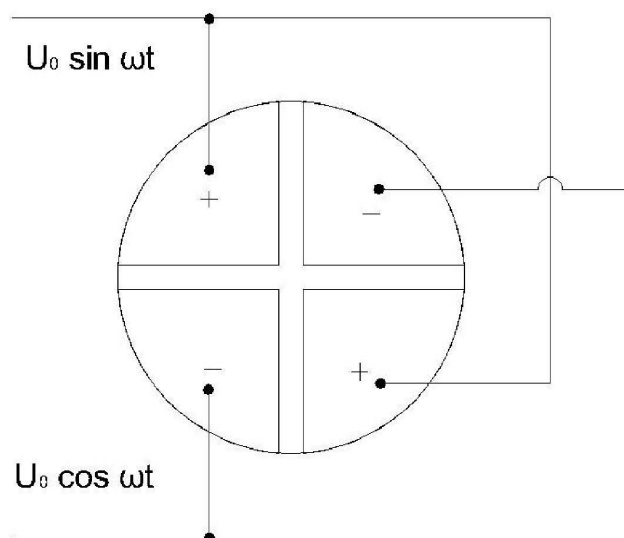
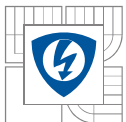
Skládá-li se měnič z jedné piezoelektrické vrstvy, v níž se střídají opačně polarizované úseky, a měnič kmitá příčnými kmity, je možné měnič budit podle obrázku 5-2 (buzení měniče s postupnou elastickou vlnou). Kmitá-li měnič radiálními kmity, je možné jej budit podle obrázku 5-3.



Obrázek 5-1: Buzení měniče s postupnou elastickou vlnou



Obrázek 5-2: Buzení měniče s postupnou elastickou vlnou (měnič se skládá z jedné vrstvy)

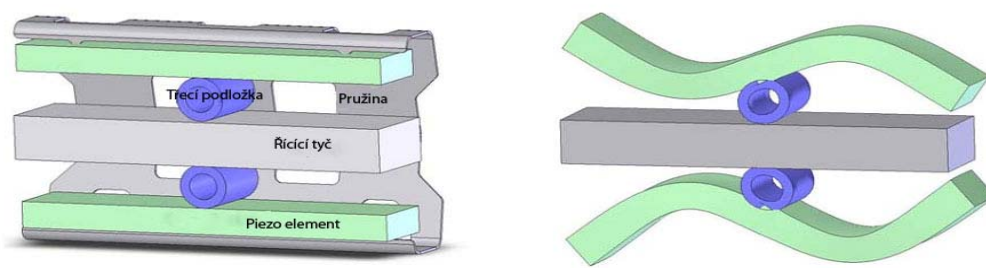


Obrázek 5-3: Buzení měniče kmitajícího radiálně

6. PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR PIEZOWAVE™

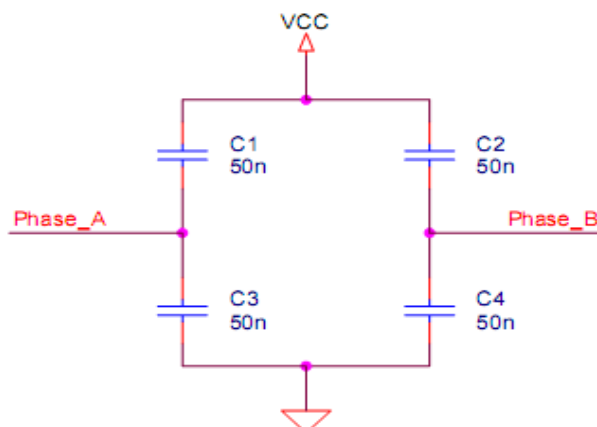
Motor PiezoWave™ byl původně navržený, pro nejrůznější aplikace v spotřební elektronice, například v mobilních telefonech. Časem byl ovšem tento produkt zařazen do mnoha dalších aplikací v různých oblastech elektroniky, např. medicínské elektroniky, zabezpečovacích systémů a dalších.

Skládá se z malého počtu částí a všechny komponenty motoru jsou zhotoveny pomocí nejnovějších výrobních technologií. Elektronické zapojení je velmi jednoduché – dva nízkonapěťové signály v podstatě různých tvarů, přičemž závislost na frekvenci je malá.



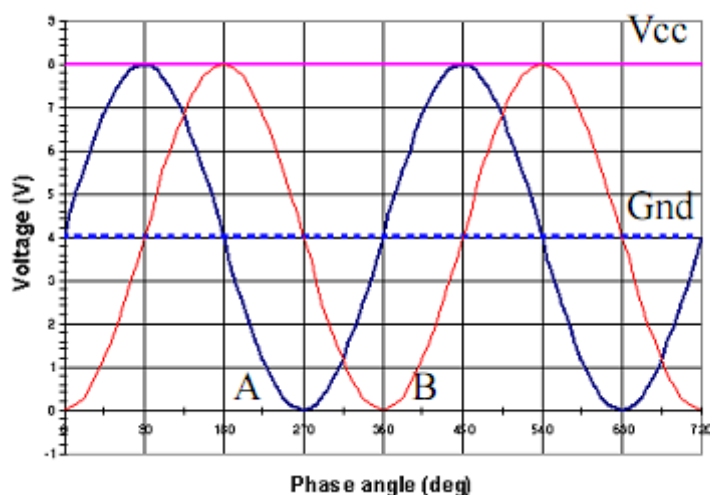
Obrázek 6-1: Části PiezoWave motoru

Motor se skládá z několika částí (Obrázek 6-1). Po přiložení napětí začnou piezoelementy oscilovat ultrazvukovou frekvencí (okolo 93kHz). Třecí podložky, které slouží k převedení pohybu z piezoelementu na jezdec, začnou vytvářet eliptický pohyb, díky zvlněnému prohnutí piezoelementu. Třecí podložka je v kontaktu s jezdcem po dobu polovinu cyklu a proto se jezdec začne pohybovat krok dopředu nebo dozadu podle způsobu zapojení. Pružina slouží k vytvoření třecí síly mezi třecí podložkou a jezdcem.



Obrázek 6-2: Základní schéma motoru

Každý piezoelement obsahuje dvě nezávislé části, které můžeme schematicky znázornit jako dva kondenzátory (Obrázek 6-2). Ze schématu je patrné, že obě části jsou vzájemně v paralelním zapojení. Na obě části přivádíme dva vzájemně o 90° posunuté signály. Fázový posuv mezi signály způsobí pohyb ve směru jezdce. Při pohybu motoru v kladném směru fáze A je o $+90^\circ$ posunutá oproti fázi B (Obrázek 6-3). Pohyb v opačném směru umožňuje opačné zapojení fází.

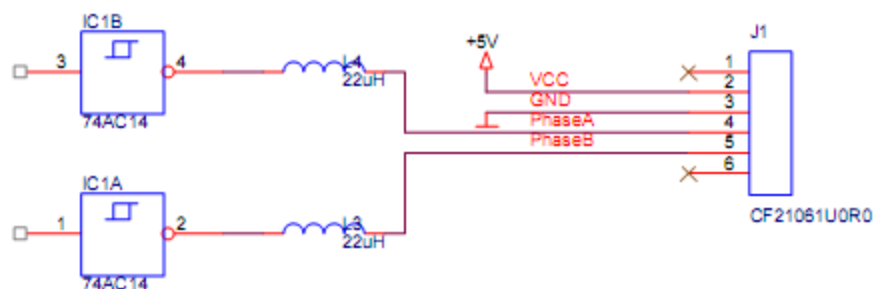


Obrázek 6-3: Hodnoty napětí

Typické hodnoty napětí pro obě fáze, napájecího napětí (V_{cc}) a zemního vodiče (Gnd), jsou znázorněny v obrázku 5-3. Je důležité, aby špička fázového napětí nepřesahovala o více jak 2V nad V_{cc} a zároveň nebyla menší než 2V od zemního vodiče. Změna časového průběhu fázového napětí od sinusového průběhu nemá příliš velký vliv na činnost motoru [7].

6.1 Ovládání piezowave motoru:

Motor PiezoWave™ lze ovládat pomocí dvou ovladačů: a) ručním ovladačem, b) ovládáním pomocí PC. Oba ovladače využívají stejný typ buzení s rezonančním LC obvodem.



Obrázek 6-4: Resonanční LC obvod ovladače

6.1.1 Ruční ovladač:

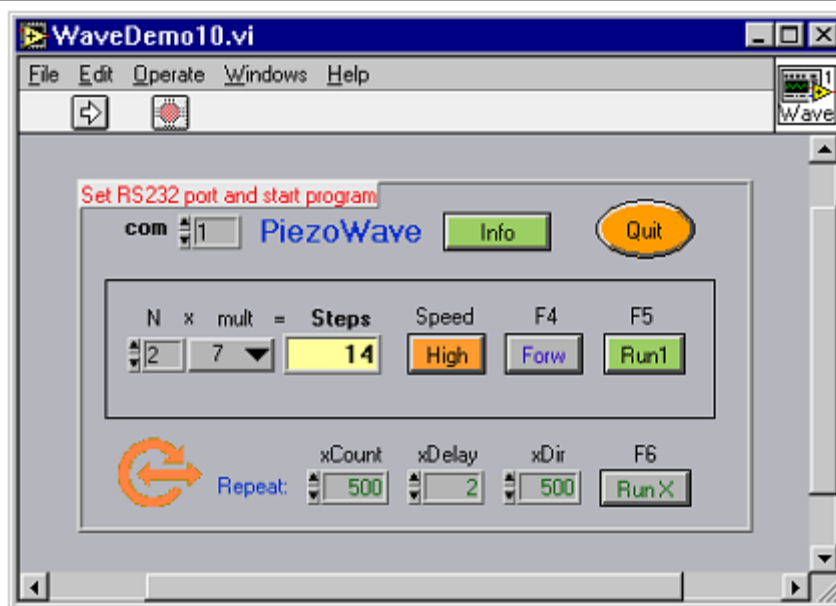


Obrázek 6-5: Ruční ovladač motoru PiezoWave™

Ruční ovladač je napájen 12V získaných z baterií. Napětí je sníženo na 3,4V pomocí stabilizačního obvodu. Řízení motoru je možné provést ve dvou různých módech. První mód umožňují čtyři ovládací tlačítka. Prvními dvěma řídíme směr otáčení, zbylé dvě slouží ke změně rychlosti. Pomocí ručního ovladače můžeme motor řídit třemi různými rychlostními stupni.

6.1.2 PC ovládání

Druhý řídicí mód je umožněn pomocí PC programu LabView Application. K použití PC módu je zapotřebí zapojit RS232 Interface card, se kterou se propojí ruční ovladač. Při tomto zapojení je ovládání pomocí tlačítek nemožné.



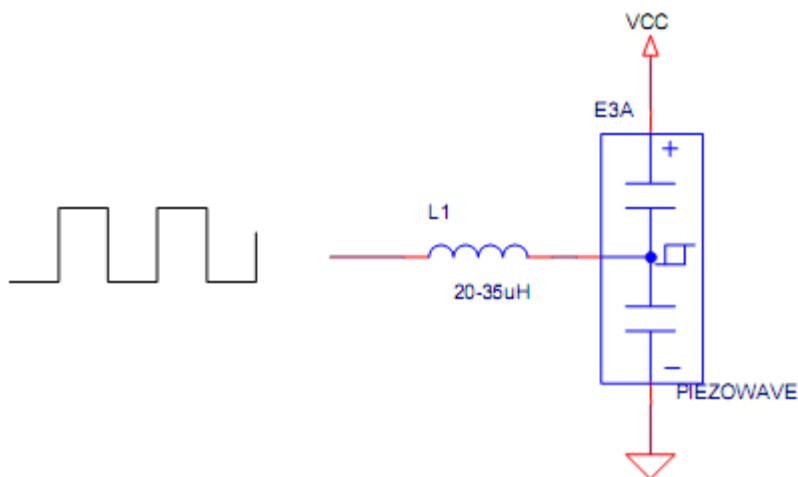
Obrázek 6-6: Řídící program

6.1.3 Kompaktní ovládání

Tento ovladač je řízen pomocí jednoduchého ovládacího rozhraní. Chod dopředu (forward) se aktivuje pomocí F-signálu, zpětný chod (reverse) pomocí R-signálu. Ovladač umožňuje řídit motor ve čtyřech rychlostech. Napájecí stejnosměrné napětí by mělo být v rozmezí 6,5-12,5V. Proudový odběr by měl být přibližně 10mA a kroková frekvence okolo 92kHz při maximální rychlosti. Při nižších rychlostech dochází ke krokování v pulsech např. 80 kroků s 3-10ms čekací periodou mezi jednotlivými pulsy. Avšak, pro možnost vytvoření správné pozice bez mikrosekundového časování, první impuls vyvodí pouze 8 kroků.

6.2 Aplikační příklady

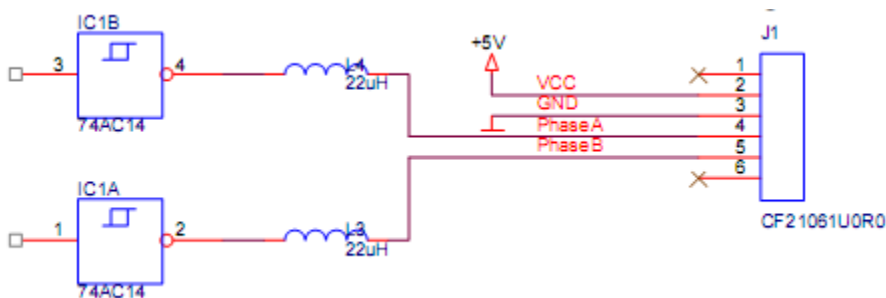
Nejjednodušším způsobem řízení je vysílání obdélníkových impulsů přes sériově zapojený induktor na vlastní kapacitu, kterou tvoří piezoelementy. Vzniklý sériový LC obvod z pravoúhlých impulsů vytvoří signál, podobný sinusovému průběhu (6-7). Důležitým předpokladem pro správnou činnost motoru jsou přibližně stejné amplitudy, které jsou rovny napájecímu napětí V_{cc} .



6-7: Řídící princip s induktorem v sérii s fází motor

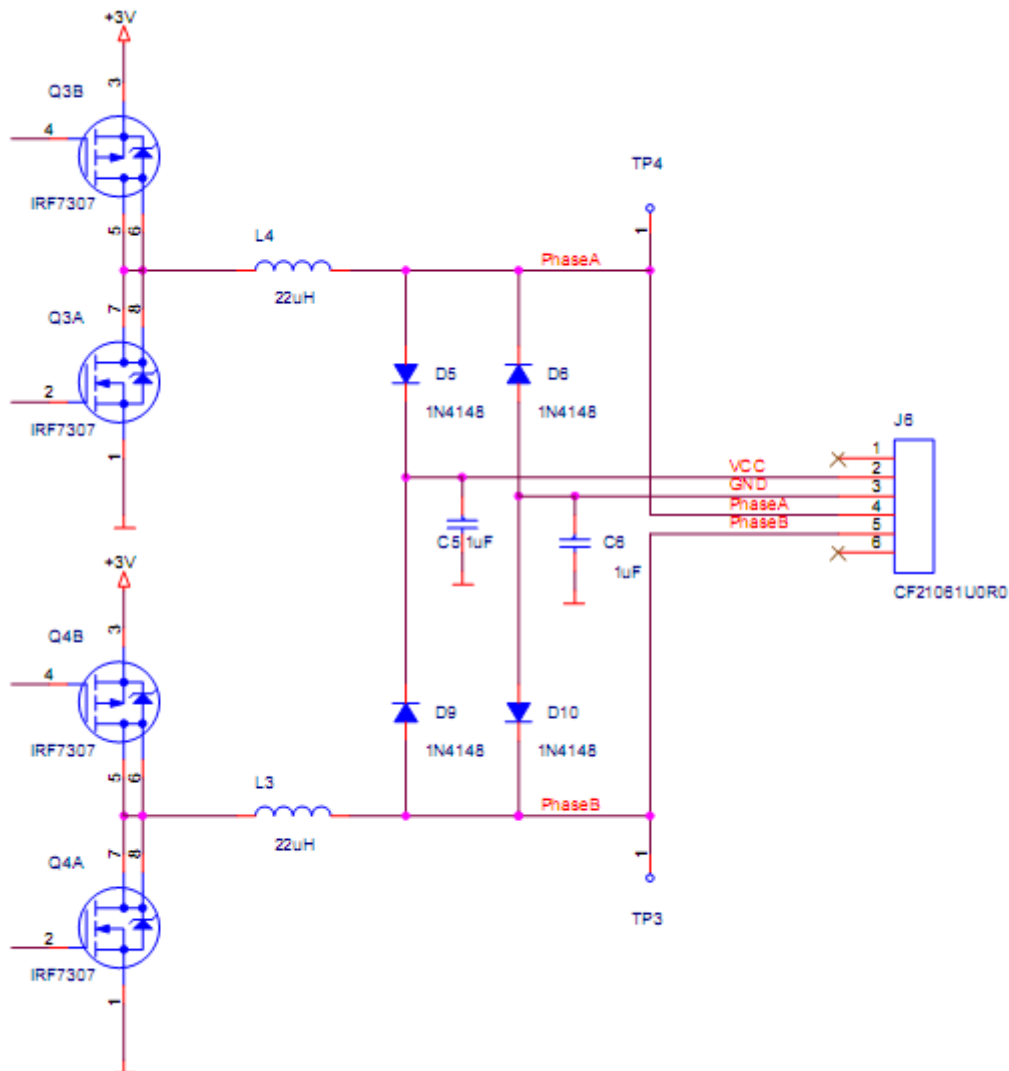
6.3 Příklady hnacích stupňů

V prvním příkladu (Obrázek 6-8) je využito jednoduchého TTL Schmidtova klopného obvodu. Toto jednoduché ovládání může být využito v aplikacích, kde není zapotřebí velké účinnosti, řízení piezomotoru je prostřednictvím PC. Kontrolní signály jsou obdélníkového průběhu s 90° vzájemným fázovým posuvem. Změna směru pohybu je umožněna pomocí přepnutí fází.



Obrázek 6-8: Řídící obvod pro PiezoWave motor

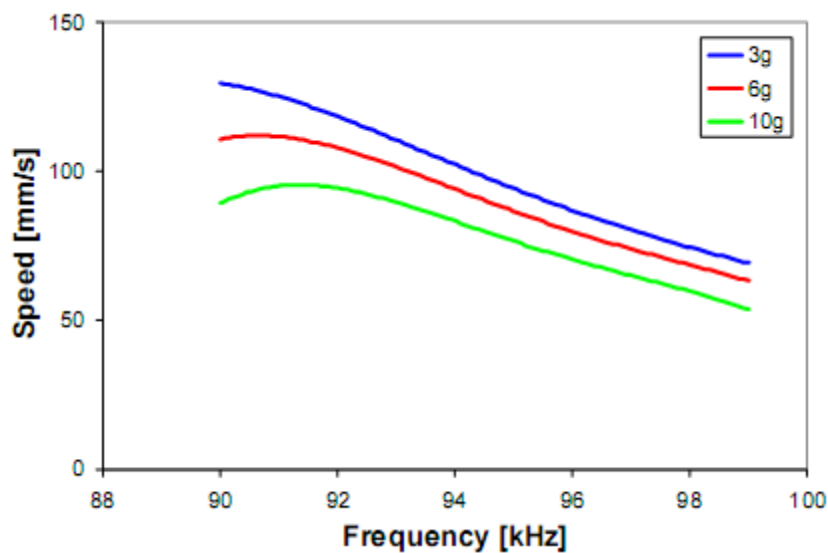
Druhý příklad je znázorněn schématem na Obrázek 6-9, jde o obvod s větší účinností, který může být napájen v rozsahu 2,7-3,3V. Toto zapojení je použito v ručním ovladači, který je napájen tužkovou baterií.



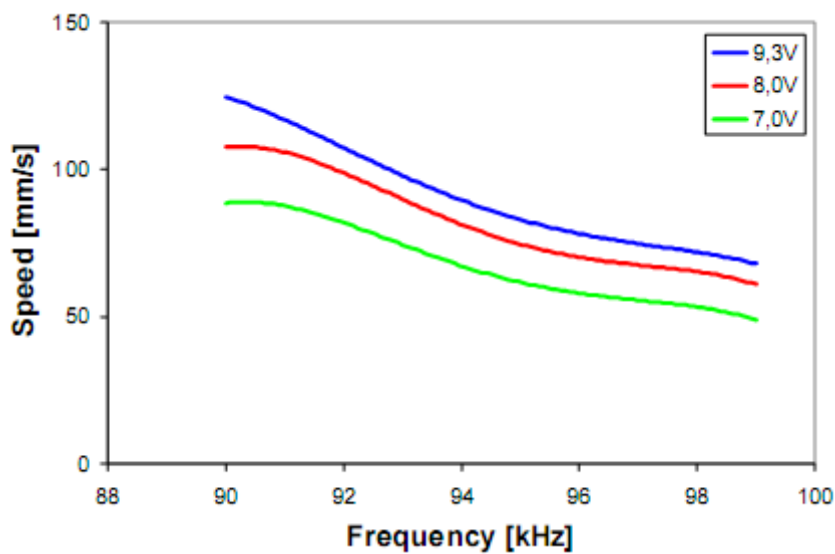
Obrázek 6-9: Nízkonapěťové řízení pro PiezoWave motor

Při návrhu přepínání je velice důležité umožnit dostatečný dlouhý “mrtvý čas“ mezi zapnutím a vypnutím přepínacího signálu vysoké a nízké úrovně. Návrh uvedený schématem na obrázku 5-9 využívá virtuálního potenciálu a řídicí napětí obvodu (V_{CC}) je generováno fázovým napětím zdroje. Podobný návrh může být ovšem použit společně s řídicími obvody na bázi TTL logiky. Oba tyto uvedené návrhy jsou založeny na rezonančním LC-obvodu. Je samozřejmě možné řídit motor pomocí sinusového průběhu vygenerovaného pomocí jiného obvodu, ale energetická spotřeba se zvýší, použijeme-li nerezonančního typu ovládání.

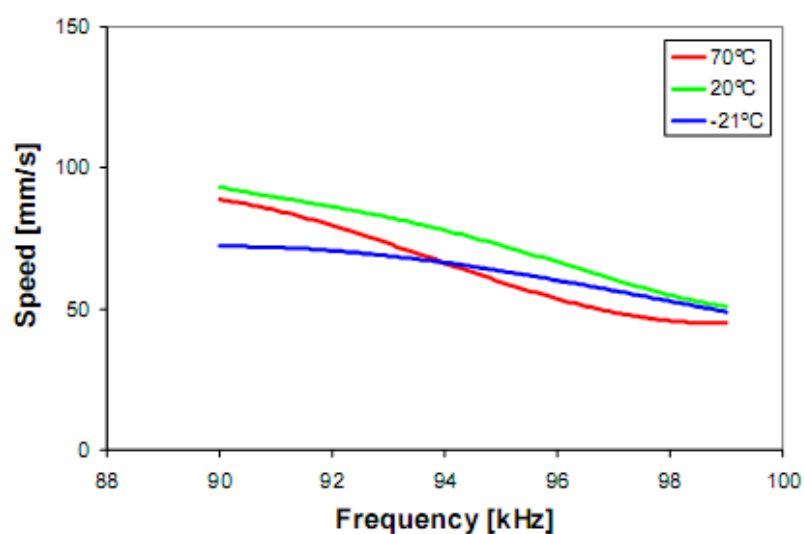
6.4 Rozbor charakteristiky udávaných výrobcem



Obrázek 6-10: Grafická závislost rychlosti na frekvenci při různých zatíženích, napětím 8 V a teplotě 20°



Obrázek 6-11: Grafická závislost rychlosti na frekvenci při různých napětích, zatížením 0,1 N a teplotě 20°



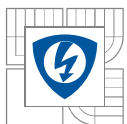
Obrázek 6-12: Grafická závislost rychlosti na frekvenci při různých teplotách, napětí 8V a zatížení 0,1N

Tab. 6-1: Charakteristiky motoru

Rychlost bez zátěže	150mm/s
Rychlost s 0.1N zatížením	50mm/s
Maximální síla	0.15 N
Přidrzná síla	0.3 N
Zdvih	8 mm
Průměrná délka kroku	0.5-1 μ m
Životnost, (8 mm cyklus)	>100.000

Tab. 6-2: Optimální elektrické hodnoty

Fázové napětí U_{pp}	8 V
Fázové napětí, DC level	4 V
Fázový posuv A-B	$\pm 90^\circ$
V_{cc} (DC napětí)	8 V
Kapacita/fáze	100 nF
Frekvence	91 - 93 kHz



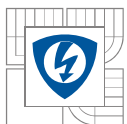
Tab. 6-3: Minimální/maximální elektrické hodnoty

Fázové napětí U_{pp}	0 - +9 V
Rozdíl $U_{max} - U_{CC}$	< +2 V
Rozdíl $U_{max} - U_{CC}$	> -2 V
Frekvence	90 - 98 kHz

Tab. 6-4: Mechanická data

Rozměry motoru	14x7,2x4,4mm
Hmotnost motoru	0,6 g
Rozměry piezoelementu	8,1x1,4x0,6 mm

Klasickými příklady pro různé řídicí podmínky udávají grafy (Obrázek 6-10 – 5-9). Odchylka mezi jednotlivými motory je $\pm 10\%$. Činnost motoru může být nestabilní při frekvenci nižší než 90 kHz, proto se tyto pracovní podmínky nedoporučují.

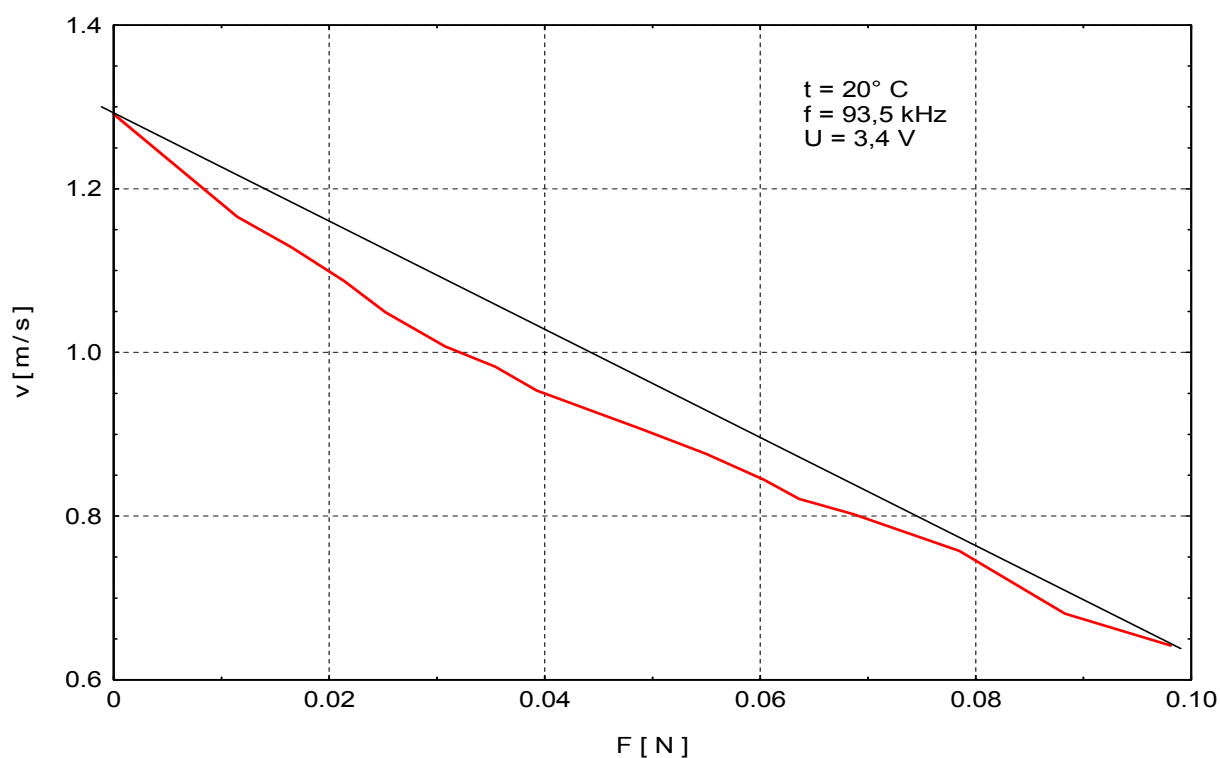


6.5 Naměřené hodnoty

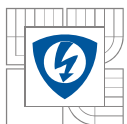
V prvním měření jsme změřili závislost rychlosti na zatížení motoru. Motor byl řízen pomocí ručního ovládání, které umožňuje nastavení tří rychlostních stupňů. První rychlostní stupeň se nám v této části nepodařilo z technických důvodů změřit (motor dosahoval příliš velké rychlosti, proto je změřen až rychlostní kamerou) $f_{v1} = 92,6$ kHz. Závislosti zbylých dvou rychlostních stupňů uvádí následující tabulky a jím příslušející grafy. Rychlostní stupeň v_2 není možný zatížit v takovém rozsahu jako stupně v_1 a v_3 . Délka pojezdové dráhy je 8mm.

Tab. 6- 5: naměřené hodnoty pro v_3

V_3																
m[g]	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10
t[s]	6,58	6,91	7,08	7,95	7,54	8,12	8,18	8,12	8,97	9,59	9,68	9,78	10,19	10,74	11,26	12,62
	6,06	7,01	7,13	7,64	7,84	7,89	8,34	8,54	9	9,33	9,59	9,84	10,1	10,3	12	12,76
	6,06	7,24	7,06	7,76	7,82	8,15	8,16	8,16	8,62	9,43	9,63	9,93	9,96	10,5	12,28	12,37
	6,08	6,94	7,26	7,64	7,76	8	8,28	8,46	8,73	9,42	9,57	9,81	9,63	10,7	11,45	12,15
tp[s]	6,20	7,09	7,16	7,70	7,74	8,04	8,24	8,39	8,83	9,44	9,62	9,84	9,97	10,56	11,75	12,48

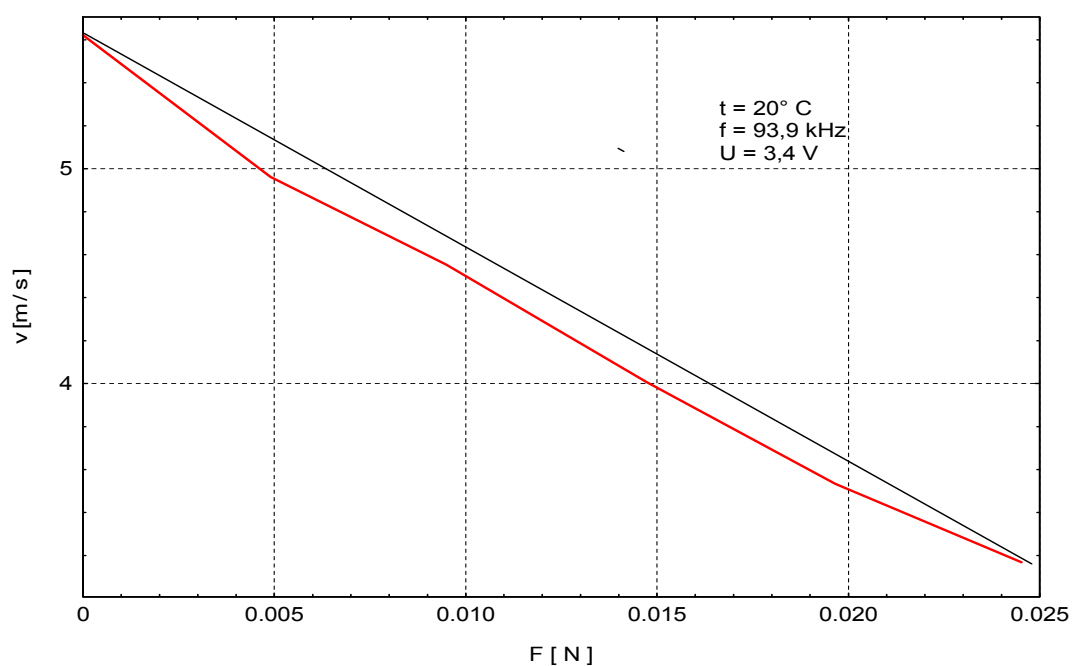


Obrázek 6-13: Grafická závislost rychlosti v_3 na daném zatížení

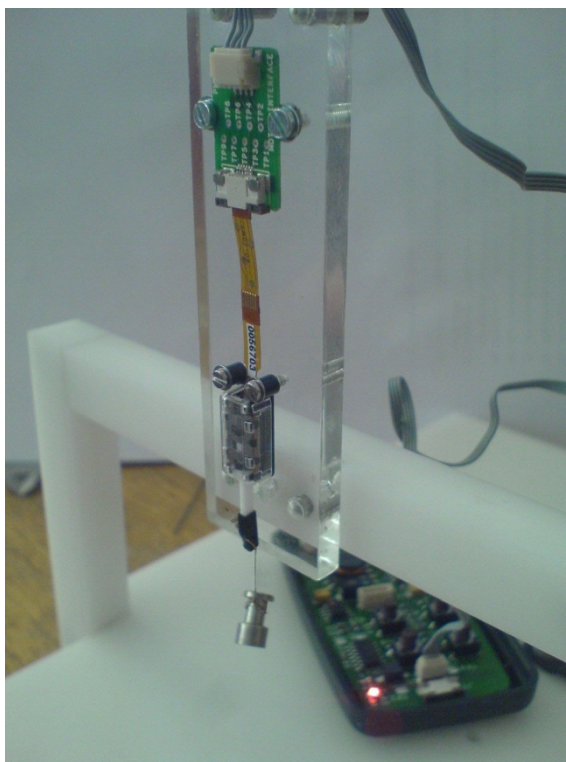


Tab. 6- 6: naměřené hodnoty pro v_2

V_2						
$m [g]$	0	0,5	1	1,5	2	2,5
$t [s]$	1,42	1,54	1,44	1,94	2,39	2,48
	1,36	1,56	1,76	2,2	2,28	2,6
	1,47	1,59	1,9	1,94	2,51	2,44
	1,44	1,76	1,56	1,9	2	2,58
$t_p [s]$	1,423333	1,6125	1,665	1,995	2,295	2,525



Obrázek 6-14: Grafická závislost rychlosti v_3 na daném zatížení

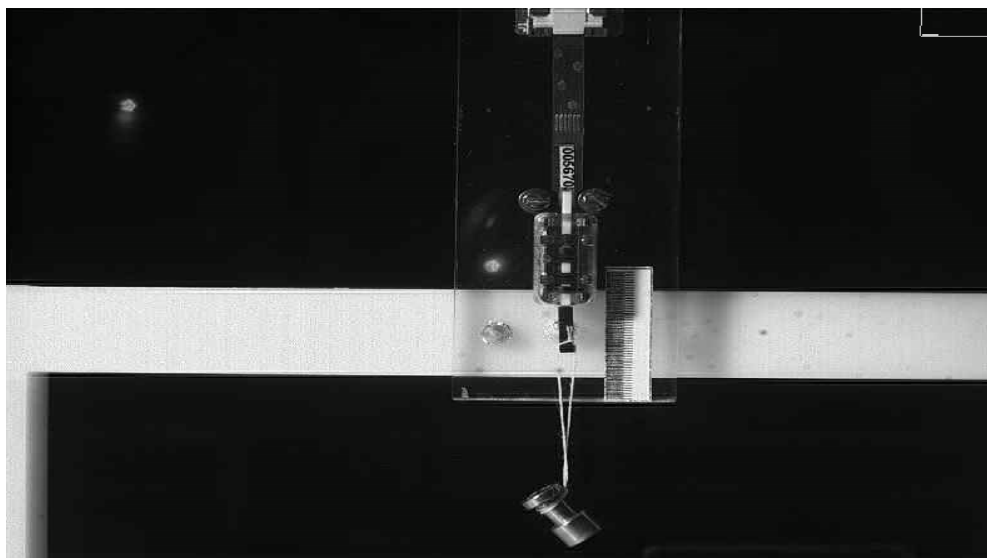


Obrázek 6-15: Laboratorní sestava Piezowave motoru

Nejvyšší rychlostní stupeň jsme změřili pomocí rychlostní kamery. Rychlosti byly změřeny pro tři zátěže (0g , 1g, 5g) při frekvenci 92,6 kHz a napětí 3,4V.

Tab. 6- 7: naměřené hodnoty pro v_1

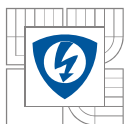
m [g]	0	1	5
t [s]	0,102	0,119	0,122
v [m / s]	78,4	67,2	65,5



Obrázek 6-16: Záběr z rychlostní kamery

Tab. 6-8: Přehled rychlosti a řídicí frekvence jednotlivých stupňů při zatížení $F = 0.01 \text{ N}$.

rychlostní stupeň	$f[\text{kHz}]$	$v[\text{m/s}]$
v1	92,6	67,2
V2	93,5	1,96
V3	93,9	1,12



7. VYUŽITÍ PIEZOMOTORŮ V PRAXI

7.1 V polovodičové technice

Piezomotory jsou využívány v mnoha náročných polohovacích aplikacích v polovodičové výrobě. Počet těchto aplikací stejně jako jejich náročnost se rapidně zvyšuje, protože průmysl vyhledává nové spolehlivé manipulátory v moderních technologiích, které mohou pomoci ve výrobě splnit jejich další rozměrové milníky – 65nm nebo 45nm procesy. Ke splnění těchto požadavků jsou piezomotory dostupné v UHV (Ultra high vacuum), nebo nemagnetických verzích. Masové využití se předpokládá zejména v nanometrologii, kde piezoelementy tvoří nosné manipulační nástroje s rozlišením jednotek nanometrů.

7.2 V polohovací technice

Mikroskopy, metrologické a biomedicínské zařízení jsou typickými příklady, kde jsou vyžadovány stále lepší a lepší polohovací vybavení. Proto se v tomto odvětví využívají piezomotory. Jejich využití je z důvodu vytvoření přesného pohybu v rozsahu nanometrů.

7.3 Ve spotřební elektronice

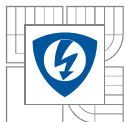
Piezomotory umožňují zákazníkům elektronických společností navrhnout menší, lehčí, produkty se zvýšenou funkcí, jako například zoom a automatické zaostření v mobilních telefonech stejně jako zlepšují funkci v digitálních kamerách. Velice malý příkon piezomotoru je velkou výhodou v mnoha zařízeních kde se klade důraz na kapacitu baterie

7.4 Zámky dveří

Zámkový průmysl čelí výzvě dělat bezpečnostní systém více inteligentní, což znamená například automaticky zamezit přístup mimo úřední hodiny, nebo udělat ztracený klíč nefunkčním. To vyžaduje rozvoj pohotového velice malého a energeticky účinného elektromechanického systému. Piezomotory otevírají nové možnosti pro tento průmysl.

7.5 V leteckém průmyslu

V leteckém průmyslu, snížení váhy komponentů znamená snížení vlastní váhy letadla, což má za následek snížení množství paliva.

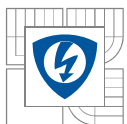


7.6 Automobilový průmysl

V automobilovém průmyslu se stále zvyšuje potřeba nejrůznějšího automatického nastavení se zvyšujícími se požadavky na bezpečnost, komfort a spolehlivost. Malé opotřebení, nízká cena a velikost ovládacích komponentů jsou hlavními důvody použití v tomto odvětví.

7.7 Telekomunikační technologie

Optická vlákna v kombinaci se zvyšujícím se provozem v sítích, dávají úplně nové požadavky na mikro-mechanické, dynamické nastavení a obrovskou přesnost. Nanometrová přesnost a malá velikost piezomotoru jsou ceněné vlastnosti v tomto odvětví.



8. ZÁVĚR

Bakalářská práce tvoří komplexní rozbor včetně experimentálního vyhodnocení nejdůležitějších charakteristik piezoelektrických miniaturních motorů vhodných pro mikro a nano pohony.

V první části této práce je popsána fyzikální podstata piezoelektrického jevu, na jehož principu všechny piezomotory pracují. Pozornost je věnována i analýze nejrůznějších piezoelektrických materiálů, jejich vlastnostem a zejména praktickému využití s důrazem kladeným na vhodné parametry.

Druhá část je věnována hlavnímu rozdělení piezoelektrických motorů a jejich funkčním principům.

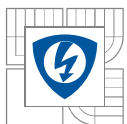
Hlavní část bakalářské práce je určena piezoelektrickému motoru Piezowawes, vyrobeným firmou Uppsala AB. Je zde uveden podrobný popis jeho funkčního principu, způsoby jeho řízení a jeho charakteristiky udané výrobcem i naměřené na pořízeném vzorku.

Tento motor byl dle zadání uveden do laboratorní sestavy a proběhly na něm dva druhy měření. Cílem bylo změřit rychlost posuvu motoru v závislosti na tažné síle.

Při prvním měření jsme zjišťovali tuto závislost mechanickými stopkami a motor byl řízen pomocí ručního ovladače, který umožňuje chod ve třech rychlostech. Tato metoda se ukázala jako poměrně přesná pro měření závislostí druhého a třetího rychlostního stupně. První rychlostní stupeň, při němž se dosahuje rychlosti posuvu řádově 70 m.s^{-1} , nebylo možné touto metodou změřit. Pro tento účel bylo řešitelem navrženo uspořádání s rychlou záznamovou kamerou. Výsledky těchto měření uvádí tabulky 6-5 až 6-7 a jim příslušející grafy. Lze konstatovat, že interpretované výsledky korespondují s hodnotami, které uvádí výrobce ve svých katalogových listech.

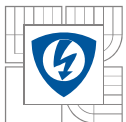
Dalším záměrem při měření pomocí rychlostní kamery bylo sestavit pracovní charakteristiku motoru $v = f(t)$, tato charakteristika se však z důvodů nízké rozlišovací schopnosti výsledných snímků nepodařila sestavit.

Hlavní přínos piezomotorů v dnešním elektrotechnickém světě je možnost jejich realizace ve stále menších rozměrech a oproti klasickým motorům mají řadu výhod např. nevytváření elektromagnetického rušení, snadné řízení otáček, velká polohovací přesnost, větší jmenovitý moment na hřídeli oproti klasickým motorům stejného objemu. Jejich nevýhodou je obtížné udržení konstantního koeficientu tření mezi piezoelementy a jezdce popřípadě rotorem a statorem, což snižuje jejich životnost.



9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Rydlo, P. -Richter, A.:Piezoelektrické motory. Liberec: Automa 2000.
- [2] Kasap, S.O.: Principles of Electronic Materials and Device, Third edition, McGraw-Hill, 2006 , ISBN: 0-07-310464-7
- [3] Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy. BEN-technická literatura, Praha, 2006. ISBN 80-7300-189-6
- [4] Kazelle, J.:Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů. Brno: Editační středisko VUT 1976
- [5] Spanner, K.: Survey of the various operating principle of ultrasonic piezomotory. Karlsruhe, Germany: Physik Instrumente 2006
- [6] Firemní listy společnosti Uppsala AB, <http://www.piezomotor.se>
- [7] www.piezo-motor.net



PŘÍLOHY:

- a) Elektrické schéma ručního ovladače motoru PiezoWave
- b) Ovladačí schéma PiezoWave motoru F629
- c) CD obsahující tuto práci v pdf.-souboru

[illegible]