

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za matematiko in fiziko  
Oddelek za fiziko

# Piezoelektrični motorji

pripravil: Franc Lap  
mentor: dr. Primož Zihel

Ljubljana, 10. maj 2007

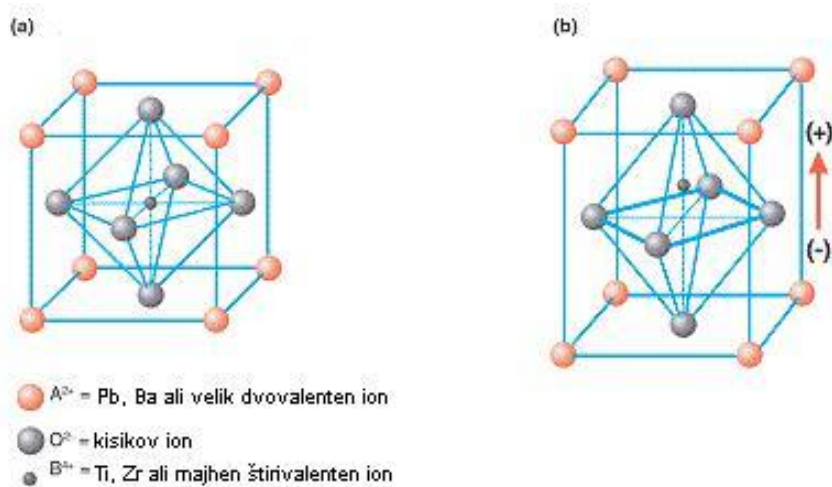
# 1 Malo zgodovine o piezoelektrikih

Leta 1880 sta brata Curie opazila nenavaden pojav pri nekaterih kristalnih strukturah [1]. Ko sta določen kos kristala obremenila s površinsko silo, se je le-ta električno polariziral v določeni smeri. Prav tako sta opazila, da se generira električna napetost v nasprotni smeri kot polarizacija in da je sorazmerna sili, s katero stiskata kristal. To odkritje so nato poimenovali piezoelektričnost (sestavljena iz grške besede “piezien”, kar pomeni pritiskati oz. stiskati in pojma elektrike) [2]. Leto kasneje je Lippmann iz termodinamičnih zakonov pokazal, da obstaja tudi obrnjen piezoelektrični pojav, torej da se piezoelektrik v električnem polju mehanično deformira, nakar sta brata Curie to dejstvo potrdila z eksperimentom. Nato je v naslednjih petindvajsetih letih je sledilo preučevanje piezoelektričnih kristalov s fizikalnega vidika, pravtako so našli smiselne razlage v matematičnih izračunih. S preučevanjem lastnosti naravnih piezoelektričnih kristalov so našli razlike med vrstami in so jih zato razvrstili v 20 razredov. Prvo uporabno aplikacijo je izdelal Langevin med prvo svetovno vojno v Franciji leta 1917 in sicer delujoči ultrazvočni detektor, s katerim so detektirali podmornice. Detektor je bil sestavljen iz mozaika tankih ploščic kvarčnega kristala in dveh jeklenih plošč, prilepljenih na kristal. Ta sistem je deloval pri resonančni frekvenci 50 kHz [1]. Zatem se je uporaba piezoelektričnih naprav razširila na mnoga področja.

## 2 Piezoelektrični učinki

Piezoelektriki so kristali posebne vrste. Poleg strukturnih, mehaničnih in tudi dielektričnih lastnosti, s katerimi opisujemo kristale, imajo še posebno lastnost, namreč piezoelektričnost. Piezoelektrike sicer najdemo v naravi, vendar je piezoelektrični učinek prešibek, da bi jih koristno uporabili. V ta namen izdelujejo posebne kristale.

Da razumemo piezoelektrični učinek, je potrebno preučiti obnašanje električnega polja v snovi in zakonitosti mehanične deformacije. Raziskovanje usmerimo na atomski in molekularni nivo. Običajne piezoelektrične keramike so ortorombski perovskitni kristali, ki se zaradi anizotropij v kubični mreži lokalno obnašajo kot dipoli, ki so pri spontani polarizaciji, ki povzroča piezoelektrični učinek, naključno usmerjeni. Namreč, v mreži večjih divalentnih kovinskih in kisikovih ionov je vmeščen manjši tetravalentni kovinski ion (slika 1). Če sedaj piezoelektrik postavimo v močno električno polje, se domene v kristalu, v katere se združujejo enako orientirani dipoli, pretežno uredijo v smeri polja, tako da se negativno nabiti del domen usmeri proti pozitivni



Slika 1: Običajna kristalna struktura piezoelektrične keramike nad Curiejevo temperaturo (a) ter pri operativnih pogojih (b) [2].

elektrodi. Ker v električnem polju na naboje in dipole delujejo električne sile, se hkrati s polarizacijo dipoli tudi raztezajo, kar je edinstvenost piezoelektrikov. Ko polje ugasnemo, se kristal zrelaksira v prvotno obliko, vendar ostane polariziran. Če sedaj obrnemo smer jakosti električnega polja, se kristal skrči brez učinka na polarizacijo pri majhnih jakostih polja. Če povečamo jakost polja do koercitivne vrednosti, uničimo polarizacijo kristala, ko spet izklopimo polje. Piezoelektričnost se pojavi samo do neke kritične temperature, Curiejeve temperature, nad katero kristal postane popolnoma izotropen (slika 1). Samo polariziran piezoelektrik je pripravljen za dejansko uporabo.

## 2.1 Piezoelektrična enačba

Matematični opis začnimo s Hookovim zakonom, ki ga zapišemo v naslednji obliki:

$$\delta_i = S_{ij}\sigma_j, \quad (1)$$

kjer smo z  $\delta$  označili relativni vektor raztezka,  $\sigma$  vektor mehanične napetosti in  $S_{ij}$  tenzor, ki povezuje deformacijo v odvisnosti od napetosti. Vektorja imata šest dimenzij, saj ločimo razteg in strižne deformacije<sup>1</sup>. Tenzor ima

<sup>1</sup>V fiziki sicer govorimo o tenzorju deformacije in tenzorju napetosti, ki imata šest neodvisnih elementov. Diagonalni elementi so sorodni prvim trem, torej linearnim raztezkom, izvendiagonalni pa ostalim trem, ki podajajo velikost striga.

6 × 6 elementov [3]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} = 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Ker je v piezokristalih zaradi polarizacije izpostavljena ena izmed smeri (v tem seminarju bo to tretja komponenta, ki kaže v smeri polarizacije), se vse dogajanje vrti okrog te smeri. Druga enačba, ki jo potrebujemo, da vključimo v izračune še polarizacijo, je Gaussova konstitutivna relacija med gostoto in jakostjo električnega polja:

$$D_i = \epsilon_{ij}\epsilon_0 E_j. \quad (3)$$

Tokrat imata vektorja le po tri elemente.  $\epsilon$  je dielektrični tenzor, ki je za piezoelektrike v splošnem diagonalen, ker nima izvendiagonalnih dielektričnih konstant. Za večino materialov obravnavamo Hookov zakon in Gaussovo relacijo neodvisno. Ker pa piezoelektriki transformirajo mehanično energijo v električno in obratno, moramo v enačbe vstaviti tudi to odvisnost. Nove relacije vpeljemo z novo matriko, ki bo povezovala šest dimenzij Hookovega zakona in tri iz Gaussove relacije. Definiramo piezoelektrični tenzor (modul), ki ima 3 × 6 elementov:

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

ki ima samo 5 od 0 različnih elementov s tremi neodvisnimi vrednostmi. Zanimivo pri elementih tenzorja je, da so lahko nelinearno odvisni od napetosti (slika 2). Modul neposredno povezuje gostoto električnega polja in vektor mehanične napetosti:

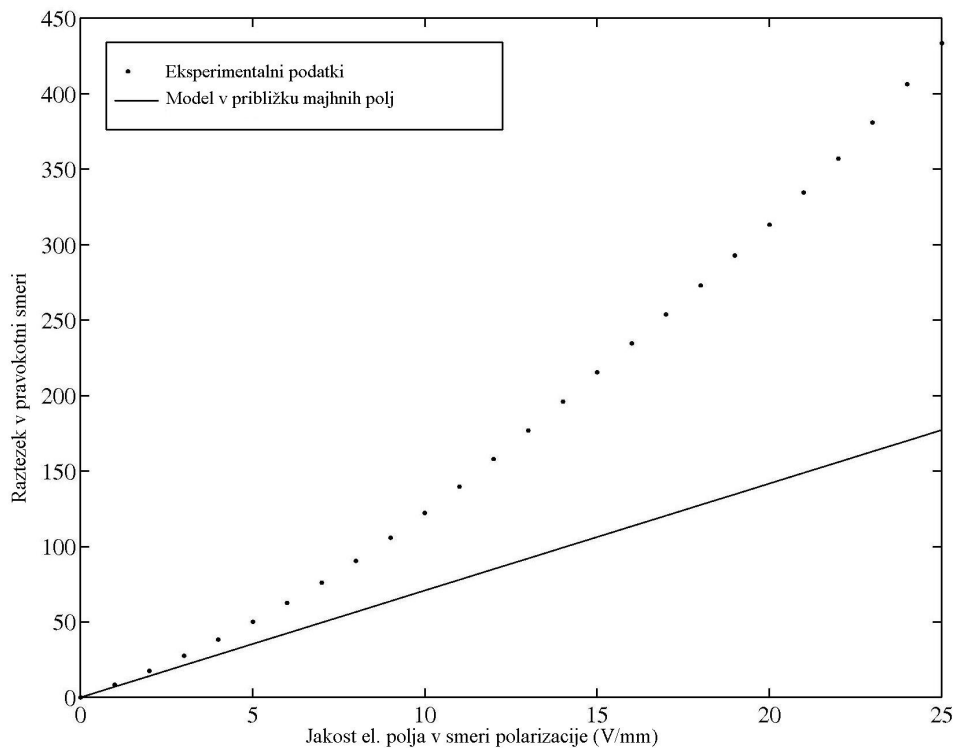
$$D_j = d_{ij}\sigma_j. \quad (5)$$

To enačbo imenujemo piezoelektrična enačba [4].

Če sedaj želimo koristno izračunavati sile in premike v odvisnosti od napetosti, moramo enačbama (1) in (3) dodati še dielektričnost in dobimo dve osnovni združeni enačbi:

$$\delta_i = S_{ij}\sigma_j + d_{ik}E_k, \quad (6)$$

$$D_i = \epsilon_{ik}\epsilon_0 E_k + d_{kj}\sigma_j. \quad (7)$$



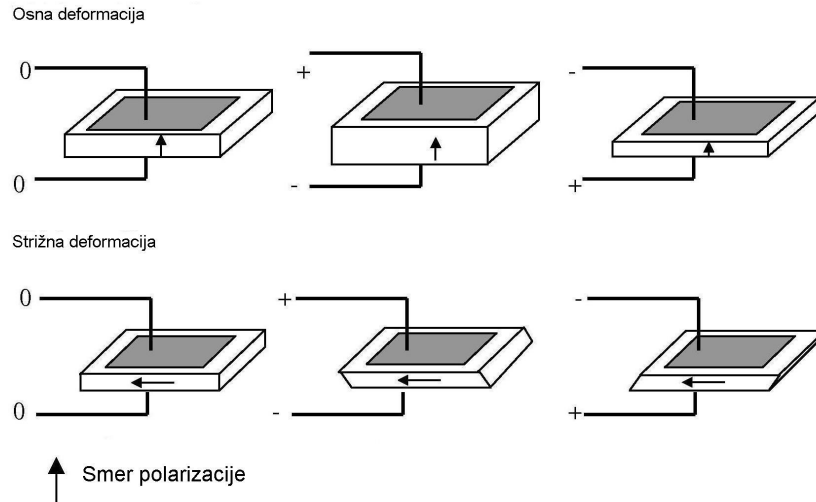
Slika 2: Nelinearna odvisnost deformacije, ko večamo napetost; koeficient  $d_{31}$  kaže nelinearno odvisnost [3].

S še dvema relacijama, podobnima (6) in (7), lahko izrazimo poljubni vektor v odvisnosti od ostalih. V novih relacijah ne nastopajo enake podmatrike, ampak kombinacije le-teh, ko jih transformiramo z ustreznimi matematičnimi operacijami.

## 2.2 Deformacija piezoelektrika v električnem polju

Imamo dvoje možnosti orientacije polarizacije kristala v električnem polju; vzporedno ali pravokotno [4]. Element  $d_{33}$  naslavlja deformacijo vzporedno smeri polarizacije, ko je tudi polje vzporedno. Pravokotno deformacijo nam določata elementa  $d_{31}$  in  $d_{32}$ , ki imata zaradi simetrij v kristalih enako vrednost ( $d_{32} = d_{31}$ ). Če apliciramo električno polje pravokotno polarizaciji, se kristal strižno deformira. Velikost striga nam definirata elementa  $d_{15}$  in  $d_{24}$ . To sta še poslednja od 0 različna elementa. Opisane deformacije so prikazane na sliki 3. S primernimi kombinacijami teh načinov in tehničnimi rešitvami lahko izvedemo tudi svojevrstne načine gibanja. S cikličnim ponavljanjem

## Načini deformacije



Slika 3: Odvisnost smeri in načina deformacije od orientacije notranje polarizacije kristala in polov napetosti [4].

gibov omogočamo translacijsko in krožno gibanje.

## 3 Piezomotorji

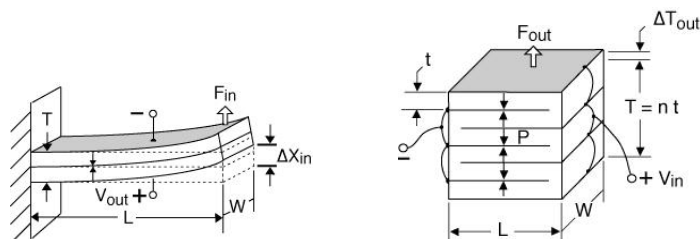
Piezomotor je v najpreprostejši obliki piezoelektrični kristal, ki ga deformiramo z električnim poljem, saj lahko spreminja razdaljo med deli kristala. To pa pomeni, da se dve točki kristala gibljeta ena proti drugi z neko hitrostjo. Premikanja sicer na oko ni moč videti, vendar vseeno piezokristal opravlja delo. Za izrazitejše deformacije in posledično večjo gibljivost se uporablja tanke piezoelektrične lističe ali nekoliko debelejše ploščice, ki se v prečni smeri mnogo bolj deformirajo kot v smeri električnega polja. Te uvrščajo med enoslojne motorje zaradi uporabe samo enega lističa. Lahko se uporabljata tudi dva ali več slojev lističev. Vsaka vrsta se uporablja za specifičen namen. Dvoslojni imajo to posebnost, da se uporabljajo za upogibne trakove in imajo enako lastnost kot bimetalna ploščica. Za ta namen se v enostavnem primeru obrneta polarizaciji kristalov v nasprotnih smereh. Da se ena ploščica skrči in druga podaljša, mora zato imeti električno polje v obeh isto smer in zato uporabimo dve elektrodi. Če pa usmerimo polarizacijo v isto smer, mora imeti električno polje nasprotni smeri, kar dosežemo s tremi elektrodami. Zunanji povežemo z istim potencialom, na vmesni pa ga spreminjamo. Zato upogibne piezomotorje delimo še po smeri polarizacije na X-polarne in slednje

Y-polarne, kot je predstavljeno na sliki 4.



Slika 4: Smeri polarizacije v posameznem traku dvoslojne ploščice piezoelektrika. Levo so X-polarni, desno Y-polarni [1].

Načeloma lahko zlepimo poljubno število ploščic (slika 5). Več ploščic nam poveča skupen razmik med nasprotnima površinama kristala. Velikosti deformacije segajo v mikrometrsko področje. Ti so uporabni predvsem za natančne nastavitve delov naprav v mikroelektroniki.

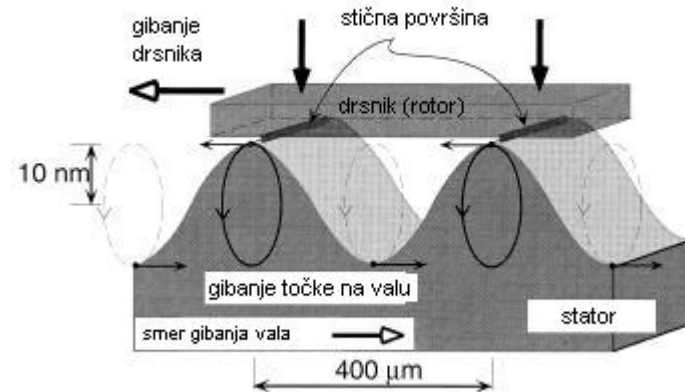


Slika 5: Zgled upogljivega in večslojnega motorja (aktuatorja) [1].

### 3.1 Linearni piezomotor

Piezoelektrični pojav so znali izkoristiti že med in po drugi svetovni vojni. Ker pa se vsakdanje naprave manjšajo v velikosti, se je potreba po miniaturnih motorjih, ki izvajajo mikroskopske premike, znatno povečala. Klasičnih elektromotorjev ni mogoče izdelati v miniaturnih dimenzijah. Rešitev se je ponudila v raziskovanju in razvoju ter posledično v uporabi piezoelektričnih kristalov.

Princip delovanja piezomotorjev temelji na neposrednem kontaktu piezoelektrika s premikajočim mehanskim delom. Vsi premiki se ustvarjajo s pomočjo lepenja dveh površin. Piezokristal lahko ustvari veliko silo lepenja, hkrati pa s strižno deformacijo premakne telesi, ki se dotikata kristala, vzdolž kontaktnih površin. Da motor resnično deluje, se določene deformacije izvajajo ciklično. Poleg tega se lahko uporablja več kristalov hkrati na različnih mestih ali na različnih mestih reguliramo smer in jakost polja. Ta način se imenuje princip potujočega vala, ker premikamo posamezno točko na statorju eliptično in tako ustvarimo na statorjevi površini val (slika 6), s katerim premikamo drsnik v linearnem motorju ali v primeru rotacijskega



Slika 6: Primer delovanja pogona linearnega piezoelektričnega motorja [5].

motorja rotor. Amplituda eliptičnega gibanja ima velikost do 10 nm [5].

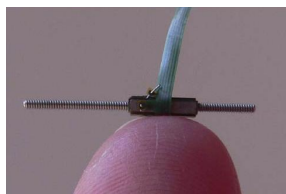
Premikajoči del linearnih motorjev se imenuje drsnik. Drsnik namreč navidezno drsi skozi ohišje, ko ga premikajo piezo kristali s tehniko potujočega vala. Velikost hoda drsnika je odvisna od njegove dolžine, tipično od nekaj milimetrov do reda nekaj decimetrov tudi do enega metra. Neposredno linearno gibanje omogočajo samo piezoelektrični motorji v tem velikostnem redu. Linearni motorji imajo to prednost, da ne potrebujejo pretvorbenih mehanizmov iz krožnega v linearno gibanje, kar pomeni posledično manjšo porabo prostora.

### 3.2 Rotacijski piezomotor

Če piezoelektrične kristale razporedimo v krogu in drsnik zamenjamo z okroglo ploščo, na katero pritrdimo os, smo spremenili premo gibanje v krožno. Plošča, ki oddaja mehanično delo, se imenuje rotor in je edini gibljivi del te vrste motorja.

Mnogokrat piezoelektrične motorje povezujejo z izrazom “ultrazvočni motorji”, kar je logično, saj se morajo kristali deformirati z ultrazvočnimi frekvencami – tja do 100 MHz [5], da dosegaajo znatne hitrosti. Pri tako hitrem gibanju seveda nastaja zvočno valovanje, ki pa ga ljudje ne slišimo.

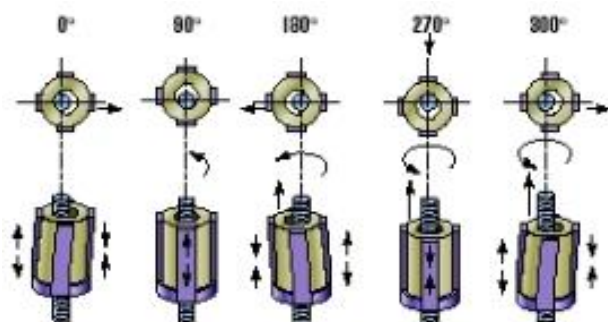




Slika 7: Velikost – “Squiggle” motor na konici prsta [6].

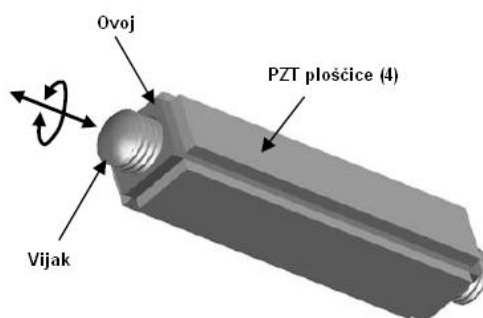
### 3.3 Vijačni “Squiggle” motor

Motor “Squiggle” [6] je velik posebnost med motorji, saj hkrati opravlja linearno in krožno gibanje, poleg tega pa je še izredno majhen (slika 7). Sestavljen je iz okrogle paličice z vijačnim navojem in ovoja, ki se krivi in zvija ter tako premika paličico (slika 8). Ovoj ima ponavadi obliko kvadra (slika 9), ni



Slika 8: Faze operativnega cikla motorja “Squiggle” [7].

pa nujno, saj so na površini vsake stranice prilepljene piezoelektrične ploščice, da mu spreminjajo obliko. “Squiggle” motor je najmanjši med piezoelektri-



Slika 9: Sestavni deli motorja “Squiggle” [6].

čnimi motorji. Izdelali so že motorček s presekom  $2.4 \times 2.4 \text{ mm}^2$  in dolžino 1 cm.

### 3.4 Tehnične lastnosti piezomotorjev

Piezomotorji so zapolnili potrebo po majhnih izvorih mehničnega dela. Glavna prednost je vsekakor vsestranska uporaba, ker lahko uporabimo linearni motor za premo gibanje. V uporabi so že motorji, ki ne presegajo prostornine kubičnega centimetra, zato nimajo veliko sestavnih komponent in ne predstavljajo velikega bremena mase tam, kjer ni potrebno. Veliko prostora nam prihrani dejstvo, da ne potrebujejo večstopenjskega prenosa hitrosti. Uporabljajo se v neposrednem stiku s premično napravo. Ne ustvarjajo elektromagnetnega valovanja. So zelo enostavni za upravljanje. Linearni motorji razvijajo velike sile v območju 100 do 1000 N [8]. Njihove hitrosti dosegajo do 800 mm/s, pospeški pa impresivnih  $250 \text{ m/s}^2$ , kar je  $25 g$  [9]. Ker so majhni in zato tudi lahki, imajo kratek odzivni čas pri zagonu ( $< 10 \text{ ms}$ ) in tudi zaustavitev je hitra, ker ne potrebujejo dodatne zavore. Uporabljajo se za natančno premikanje in določanje lege predmetov do nanometerskega nivoja.

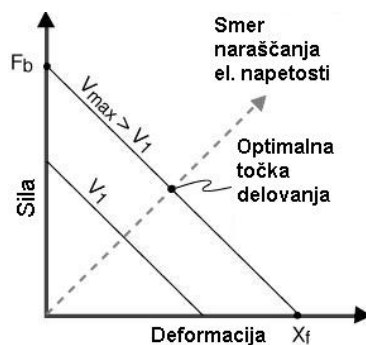
Rotacijski motorji dosegajo specifični navor v območju 0.1 Nm na kubični centimeter prostornine motorja [10]. Njihova posebnost je tudi ta, da navor z večanjem kotne hitrosti pada. Nekatere izvedbe dosegajo vrtilne hitrosti do 1000 vrtljajev v minuti.

Iz zvez med fizikalnimi količinami je razvidno, da sta si velikost sile in deformacija v nasprotju pri konstantni napetosti. Če želimo delovati z veliko silo, nam motor izvaja zelo majhne premike, v nasprotnem primeru lahko delamo z majhnimi silami in ustvarjamo velike premike, saj se kristal maksimalno deformira, če ga z ničemer ne obremenjujemo. Piezomotorji poganjajo z največjo močjo pri ne največji možni sili, vendar zmernimi premiki in zato ne veliko hitrostjo (slika 10).

Veliko težo k pozitivni oceni piezoelektričnih motorjev prispeva dolga doba izrabe in so tudi z ekonomskega vidika zelo upravičeni.

### 3.5 Uporaba

Mnoga podjetja so stoodstotno specializirana za izdelavo raznih vrst piezomotorjev za različne namene, kar priča o njihovi množični uporabi in hitrem razvojnem napredku v sedanjem času. Piezomotorji so izrinili na smetišče zgodovine elektromotorje na področjih, kjer zaradi majhnosti, neslišnosti, hitrega odziva, zadrževanja lege in nemagnetnih lastnosti ne moremo uporabiti večjih elektromotorjev. Postali so nepogrešljivi del naprav kot so [11]:



Slika 10: Optimalna točka delovanja piezokristala leži med maksimumom tlačne napetosti in deformacije [1].

- naprave za slikanje z magnetno resonanco (MRI) in druge medicinske naprave;
- avtomatsko izostrevanje slike na fotoaparatih in snemalnih kamerah;
- odpiranje in zapiranje projekcijskih platen;
- najrazličnejše nastavljanje pozicije delov avtomobilov kot so vzratna ogledala, naslonjala, predalniki, različne sprejemne antene, prispevajo k aktivni varnosti avtomobila (zategovanje pasov), za senzorske aplikacije, ki sicer nimajo vloge motorjev (ABS, proženje zračnih blazin, ultrazvočni oddajniki), kontrola vbrizga goriva;
- mikrorobotske aplikacije in tudi za izvajanje gibov večjih robotov;
- v raziskovalnih napravah.

Ker so v osemdesetih letih dvajsetega stoletja našli v piezokristalih alternativo majhnih aplikacij, so v današnjih napravah že dobro zasidrani. Če vzamemo za zgled svoje mobilne telefone, ki imajo vgrajene leče za fotoaparate in kamere, bomo kaj kmalu ob pogledu na notranjost opazili ob leči piezomotor, ki spreminja lego leče ter tako izostruje sliko. Moderne kamere in fotoaparati so ostali brez značilnega brnenja ob odpiranju objektiv in ročnem izostrevanju slike.

V računalništvu se uporabljajo za premikanje bralno-pisalne glave na magnetnih nosilcih podatkov, kar omogoča natančnejše branje magnetnega zapisa in zato večjo gostoto zapisa ter večje kapacitete. Ker ne ustvarjajo magnetnega polja, je zato zanesljivost trdih diskov večja. V brizgalnih tiskalnikih kontrolirajo zapiranje in odpiranje šob na kartušah. Piezomotorji poganjajo robotizirane naprave, s katerimi se izdelujejo integrirana vezja,

mikro-elektro-mehanske sisteme (MEMS) in druge polprevodniške naprave, kjer je potrebna nanometrsko natančnost. Nenadomestljivi so pri robotiziranih napravah, ker omogočajo statično lego npr. robotove roke, ne da bi bilo potrebno za to trošiti električno moč. Prodor miniaturnih piezomotorjev je privedel do izvajanja zahtevnejših gibov robotov.

Uporabljajo se v medicini za pogon črpalk. Nepogrešljivi so pri slikanju z magnetno resonanco, ker ne motijo detektorjev z oddajanjem elektromagnetnega valovanja. Uporabljajo se še kot akusto-optični modulatorji, za natančno določanje frekvence. Uporabljajo se v mikroskopiji, predvsem mikroskope na atomsko silo in tunnelske mikroskope sestavlja množica aktuatorjev, ki skrbijo za lego detekcijske igle. V tovarnah jih uporabljajo za daljinsko zapiranje ventilov na ceveh, že omenjeni robotiki. Tudi letalska industrija jih je testirala za kontroliranje oblike rotorjev helikopterjev [3] in druge aerodinamične izboljšave. Pogosto se uporabljajo v optičnih napravah. V laserjih urejajo zrcala, da le-ta sploh lahko delujejo. Izdelujejo jih za ovoje optičnih vlaken, po katerih se širi svetloba. S stiskanjem in raztezanjem se spremeni lomni količnik sredice ter posledično faza valovanja [12].

Piezomotorji se uporabljajo tudi v razikavah v astrofiziki. Izdelali so namreč prilagodljive leče za detektorje, s katerimi detektirajo visokoenergijske delce energij od 200 keV do 1,3 MeV [13]. S fokusiranjem leče premikajo vrh občutljivosti detektorja na omenjenem območju.

## 4 Druge vrste uporabe piezokristalov

Piezokristalov ne najdemo samo v motorčkih majhnih dimenzij, saj so uporabni tudi za druge namene. K že omenjenim senzorskim aplikacijam lahko dodamo mikrofone in piezoelektrične ojačevalce zvoka električnih kitar, kjer zvočno valovanje zaradi deformacije sensorja ustvarja izmenično napetost. Glasbena industrija pozna tudi električne bobne, ko se ob udarcu na piezokristal ustvari napetost, ki je nato vir za zvok bobnov visokih frekvenc. V sisteme zvočnikov vgrajujejo večje in manjše zvočnike. Manjši so dobili ime "piezo" zaradi tega, ker je piezokristal kot gradnik membrane izvor visokofrekvenčnega zvoka. Piezokristale so poznali že naši dedje, saj so bile gramofonske igle iz piezoelektričnega kristala.

Uporabljajo se tudi kot vir (visokih) napetosti. Kot takšni so uporabni v najrazličnejših vžigalnikih za proženje iskre, ki nato vžge gorivo. Ameriška vojska še testira tako imenovani projekt *Energy Harvesting* [14], kjer želijo orožje in opremo na bojišču oskrbovati z elektriko iz škornjev vojakov, opremljenih z piezoelektričnimi generatorji. Piezoelektrični transformatorji so pretvorniki amplitude izmenične napetosti. Medtem ko navadni trans-

formatorji izkoriščajo magnetno indukcijo med tokokrogoma, se v piezoelektričnih uporablja akustična sklopitev. Tu primarni tokokrog vzbuja piezoelektrično ploščico, ki se zato trese, to tresenje pa vzbuja drugo ploščico, ki generira višjo napetost. Razmerje amplitude napetosti je lahko tudi večje kot 1000.

Ker ima piezoelektrični kos kristala točno določeno resonančno frekvenco, ki je sicer odvisna od velikosti in oblike, se jih uporablja za generiranje urinih pulzov. Resonančna frekvenca, ki jo generira kristal, je še vedno prenizka, zato jo z multiplikatorji povečajo do frekvenc računalniških komponent, kjer se jih uporablja. Po enakem principu se uporabljajo kot oddajniki in sprejemniki v radijski tehniki; tudi tu je navadno potrebno frekvenco pomnožiti.

## 5 Zaključek

Piezoelektrični motorji so se že dobro zasidrili v vsakdanjem svetu. Kljub poplavi elektronskih naprav se ne zavedamo, kako pomembno vlogo so imele raziskave in razvoj piezoelektričnih motorjev ob koncu 20. stoletja. Vsaka bolj ali manj žepna naprava premične dele premika s pomočjo miniaturnih piezomotorjev. Piezokristali so bolj kot nadomestili majhne elektromotorje odprli novo poglavje tehnološkega napredka zaradi edinstvenih lastnosti (npr. hiter odziv, delovanje pri nizkih hitrostih, brez efektov elektromagnetnega polja). Posegli so v “nanogibanje” in tako pripomogli k težnji po majhnih in zanesljivih napravah.

## Literatura

- [1] *Piezo Systems Inc.* ([www.piezo.com](http://www.piezo.com))
- [2] APC International, *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications* (APC International, Mackeyville, 2002) ([www.americanpiezo.com](http://www.americanpiezo.com)).
- [3] E. F. Prechtel, *Development of a Piezoelectric Servo-Flap Actuator for Helicopter Rotor Control* (Massachusetts Institute of Technology, 1994).
- [4] J. R. Phillips, *Piezoelectric technology primer* (CTS wireless components, Albuquerque, New Mexico).
- [5] M. Kuribayashi Kurosawa, *Ultrasonics* **38**, 15 (2000).
- [6] D. A. Henderson, New Scale Technologies Inc. *Simple Ceramic Motor . . . Inspiring Smaller Products* (Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators, 14-16 June 2006, Bremen, Germany).
- [7] *MachineDesign* ([www.machinedesign.com](http://www.machinedesign.com))
- [8] *Mad City Labs Inc.* ([www.madcitylabs.com](http://www.madcitylabs.com))
- [9] *Nanomotion* ([www.nanomotion.com](http://www.nanomotion.com))
- [10] *Flexmotor* ([www.flexmotor.com](http://www.flexmotor.com))
- [11] *Shinsei Corporation Inc.* ([www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/English/](http://www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/English/))
- [12] L. Zhou in G. Ping, *Modeling of An Optical Fiber Sensor with Piezoelectric ZnO Coating* (Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, 10-14 June 2002, Shanghai, P.R.China).
- [13] A. Kohnle, R. Smither, T. Graber, P. von Ballmoos, P. Laporte, J.-F. Olive, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **408**, 553 (1998).
- [14] *Wikipedia* ([en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity](http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity)).