

Piezoelektrické motory

Maroš Mudrák, Ing. Marian Klúčik¹
FEI STUBA, maros.mudrak@gmail.com

Abstrakt

V nasledujúcich riadkoch sa budeme venovať piezoelektrickým motorom. Tieto pohony sa všeobecne radia medzi nekonvenčné pohony. Na pohyb využívajú piezoelektrický jav v kombinácii s trením. Vyznačujú sa predovšetkým veľmi malým jednotkovým krokom, samosvornosťou vysokou hustotou výkonu, ale bohužiaľ aj náročnosťou riadenia, ktoré však pri dnešných výpočtových výkonoch a rozlišovacích schopnostiach senzorov približujú ku veľmi vysokým hodnotám presnosti kroku.

1. Úvod

Pohony a pohonné systémy patria ku neodmysliteľnej časti všetkých regulačných procesov. Každý návrh systému s pohonnými jednotkami zohľadňuje potreby daného regulačného obvodu. Taktiež úlohu pri výbere toho správneho pohonu zohráva prostredie v ktorom sa daný pohon má nachádzať. Taktiež nesmieme zabúdať, že pri mnohých aplikáciách je potrebné využiť prevodovku alebo napríklad brzdu, ktoré nám do systému privádzajú vôľu, znižujú účinnosť a spôsobujú viacero nelinearit. Ak by sme sa zamerali na pohony mikro až nano rozmerov určite by sme dosiahli malé účinnosti, nízke hustoty výkonu a nižšie rozlišovacie schopnosti.

V súčasnej dobe sa mnoho spoločností po celom svete zaoberá vývojom miniatúrnych motorov na báze nepriameho piezoelektrického javu. Piezoelektrický jav bol objavený a zdokumentovaný v roku 1880 Pierrom Curie, kedy dokázal, že po privedení elektrického napätia, rádovo stoviek voltov, na keramické materiály alebo niektoré kryštály je možné dosiahnuť mechanickú deformáciu daného materiálu. Deformácia tohto typu nebýva vysoká, jedná sa o približne 0,1% celkovej veľkosti daného materiálu, ale už takéto deformácie v súčasnej dobe dokážeme využiť pre svoj prospech a premeniť pomocou rôznych mechanizmov na pohyb.

2. Základné vlastnosti piezoelektrických motorov

Piezoelektrické motory majú mnoho vhodných vlastností pre nasadenie do systému. Za zmienku určite stojí obrovská hustota výkonu, adaptivita a kompaktnosť. Svoje uplatnenie nachádzajú v pohone malých robotov, keď je potrebná presná regulácia polohy alebo ako pohonné jednotky v pružne reagujúcich automatických nastavovaniach polohy optických zariadení (autofokus).

Nevýhodou týchto pohonov je potreba zaistovania optimálnej pracovnej frekvencie a taktiež optimálneho súčiniteľa trenia. Tieto parametre sú citlivé na zmenu teploty, preto je potrebné navrhnuť vhodný regulátor. Ďalšou nevýhodou je, že na motor väčších rozmerov s väčšími výchylkami by sme potrebovali materiál neúnosných rozmerov pre použitie, čiže napríklad pre výchylku 1mm by sme potrebovali keramický materiál o veľkosti 1m.



Obr. 1. Piezoelektrický motor spoločnosti New Scale.

Princíp pohonu spočíva na základe piezoelektrického javu, kedy vlastne niektoré nesymetrické kryštály vytvárajú elektrickú polarizáciu v dôsledku mechanických deformácií. Tento fyzikálny jav je vratný, čiže ak my privedieme napätie na kryštál, tak kryštál sa dôsledkom elektrického poľa začne mechanicky deformovať. Ak sa nám za pomoci regulácie podarí zladiť vlastné kmity statora motoru s privedeným periodickým elektrickým napätím, tak v tomto kryštáli vzniknú stojaté kmity.

¹ Vedúci práce

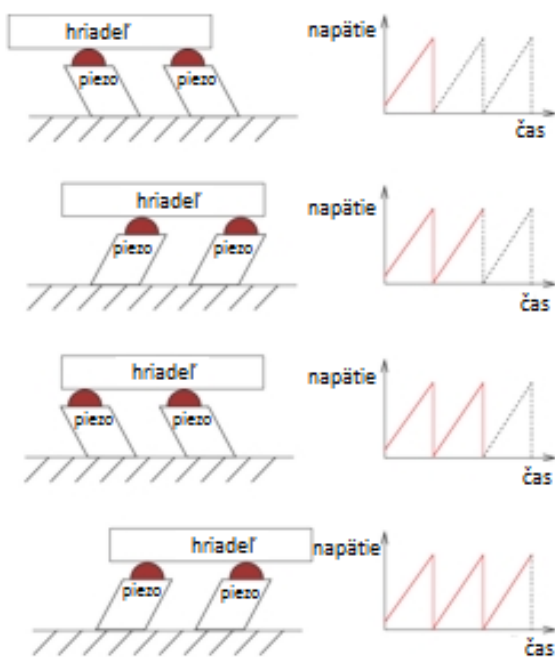
3. Typy piezoelektrických motorov

V nasledujúcich riadkoch si bližšie popíšeme vybrané druhy piezoelektrických motorov a to typy stick-slip, push-pull a piezoelektrický motor s postupnou vlnou.

3.1. Stick-slip

Ako už bolo spomínané, piezoelektrické motory pracujú ako jedny z mála zariadení, ktoré používajú adhézne trenie, ako svoj základný princíp fungovania. Jedno z možných inžinierskych vyhotovení a technológií vyvinula brnenská spoločnosť Delong instruments.

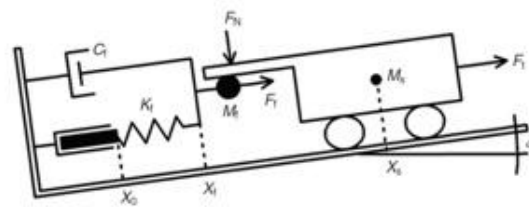
Tento princíp ako je možné vidieť na obrázku **Obr. 2.** využíva deformačné vlastnosti piezoelektrického keramického materiálu.



Obr. 2. Princíp stick-slip spoločnosti Delong Instruments.

Technológia tejto českej spoločnosti spočíva v privedení lineárne rastúceho napätia na materiál, kedy sa tento materiál začína deformovať a posúva voľne položený hriadeľ, ktorý sa vplyvom trenia materiálu pohybuje doprava. Napätie postupne rastie do veľkosti niekoľko voltov a následne prudko klesne. Hriadeľ vplyvom svojej zotrvačnosti nezareaguje na spätný pohyb keramiky a zostane v tejto novej polohe. Týmto spôsobom dokážeme hriadeľ ľubovoľne posúvať v smere osi hriadeľa. Dĺžka jedného kroku sa môže pohybovať v závislosti od veľkosti napätia od 10 do 100nm.

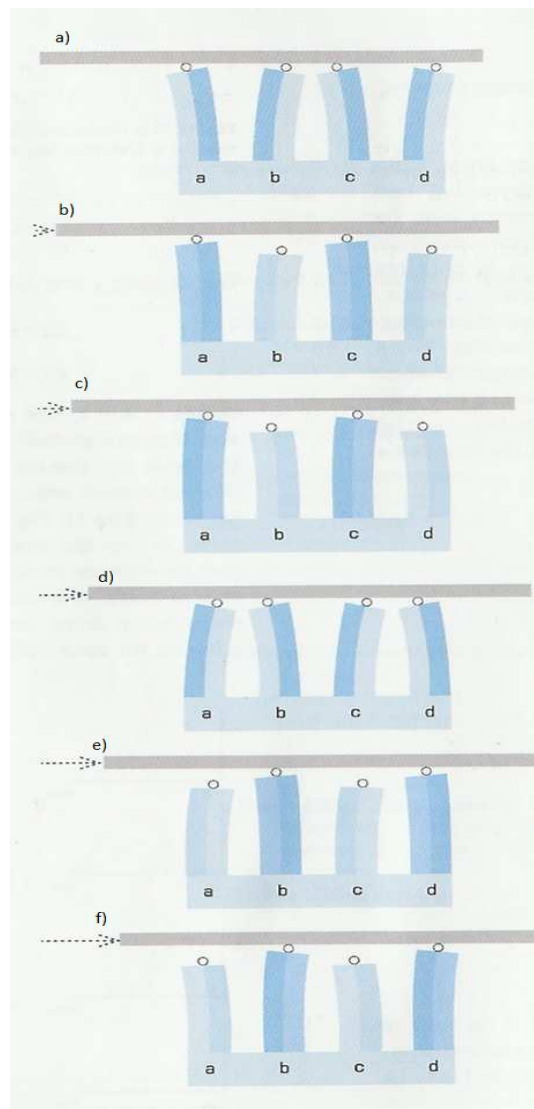
Tieto motory sa dajú pochopiť aj ako krokové motory, avšak na verejnosti sa často pomenúvajú aj ako ultrazvukové motory, pretože pracujú na frekvencii 30 až 50 kHz. Dynamický matematický model tohto piezoelektrického motora je možné odvodiť na základe **Obr. 3.**



Obr. 3. Model pre matematický opis dynamiky motora.

3.2. Push-pull

Princíp pohonu push-pull využíva švédská spoločnosť Piezomotor, avšak tento princíp využíva dva páry keramik, ktoré sú fázovo posunuté o $\pi/4$. Čiže ako je možné vidieť na **Obr. 4.** keramiky a a c pracujú synchronne a keramiky b a d pracujú synchronne avšak posunuté o periódu. Na spomínanom obrázku je možné vidieť, že na časti keramiky s tmavo modrou farbou je privedené vyššie napätie a na bledo modrú nižšie napätie.



Obr. 4. Princíp pohybu push-pull.

Na **Obr. 4. a)** sú hnacie keramiky prvého páru v uchopovacom režime. Pohyb začína pri dotyku hnacích nôh s hnaným hriadeľom. Nohy prvého páru sú ohnuté doľava a nohy druhého páru sú ohnuté doprava.

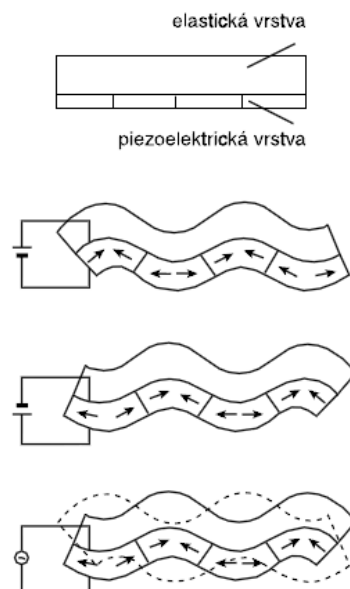
Ako je možné vidieť na **Obr. 4. b)** keramiky prvého páru sa pohybujú hore a doprava. Druhý pár keramik sa pohybuje dolu a doľava. Z tohto nám vyplýva, že hnacie keramiky druhého páru strácajú kontakt s hnaným hriadeľom a tým pádom sa bude hriadeľ pohybovať v rovnakom smere ako prvý pár keramik.

Po niekoľkých mikrosekundách kedy sa dostaneme v polohe za os keramiky sa nám mení pohyb prvého páru, kedy sa začínajú pohybovať dolu a druhý pár sa začína pohybovať smerom nahor. Podľa tohto istého princípu sa začne správať aj druhý pár keramik a tak vznikne kontinuálny pohyb hnaného hriadeľa a dosiahneme lineárny pohyb.

podobnom princípe taktiež pracuje rotačný piezoelektrický motor Piezo rotary motor 80, ktorý sa vyznačuje nízkou a premenlivou rýchlosťou. Táto rýchlosť sa pohybuje približne od 20 ot/min až po jednu otáčku za týždeň. Jeho obrovskou výhodou je, že daný motor nepotrebuje prevodovku a jeho maximálny moment 0,08 Nm s veľmi vysokou rozlišovacou schopnosťou, ktorá sa blíži až k jednej desať milióntine otáčky. Taktiež je motor takmer bez údržbový a disponuje samosvornosťou, čiže pri zablokovaní nedôjde ku mechanickému poškodeniu motora. Ďalej disponuje vysokou adaptibilitou ku poháňanému mechanizmu.

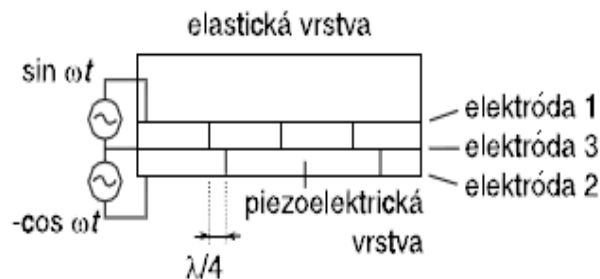
3.3. Piezoelektrický motor s postupnou vlnou

Postupnú elastickú vlnu je možné vyvolať rôznymi spôsobmi. Ak máme piezoelektrickú vrstvu so striedajúcimi sa opačne polarizovanými časťami a privedieme na túto vrstvu jednosmerné napätie medzi jej elektródy nastane deformácia piezoelektrického materiálu. Keďže úseky sú striedavo polarizované v jednom smere, tak časť s rovnakou polaritou sa rozťahne a druhú časť sa zmenší. Ak takýto materiál spojíme s elastickou vrstvou, ako na **Obr.5.**, tak nám nastane sínusové prehnutie, vlna.



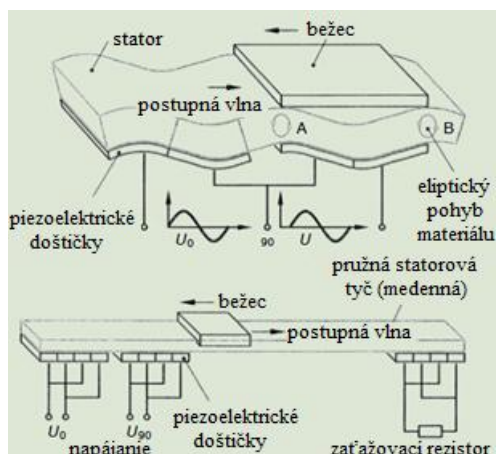
Obr. 5. Deformácia priloženým jednosmerným napätím.

Po privedení striedavého napätia nám vznikne tzv. stojatá vlna. Pri spojení dvoch piezoelektrických vrstiev so striedajúcimi sa úsekmi opačnej polarizácie, kedy dĺžka úseku bude $\lambda/2$ tak, že medzi úsekmi bude posuv o polovicu dĺžky $\lambda/4$ dostaneme piezoelektrický menič, ktorý je schopný generovať postupnú povrchovú elastickú vlnu po ktorej sa pohybuje bežec.



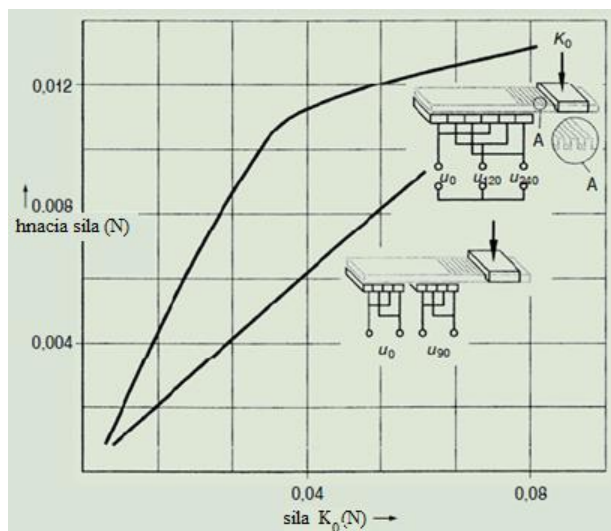
Obr. 6. Štruktúra piezoelektrického meniča.

Možnou variantou je použitie iba jednej piezoelektrickej vrstvy rozdelenej na rovnaké úseky. Každý druhý úsek je napájaný napätím U_0 a ostatné sú napájané U_{90} , čiže posunuté o 90° . Vlna postupuje pozdĺž statorového pásu pričom body A a B vykonávajú eliptický pohyb, **Obr. 7.** Bežec je prtláčaný vhodnou silou na podložku, čím vznikne trecia sila a bežec sa pohybuje.



Obr. 7. Lineárny dvojfázový motor.

S použitím trojfázového zapojenia, čiže vytvorenie troch skupín úsekov nasledujúc v rovnakom poradí za sebou je možné, dosiahnuť vyššieho výkonu piezoelektrického motora. Tieto úseky sú napájané zo symetrického zdroja, ktorý napája jednotlivé úseky s fázovým posunutím o 120° . Trojfázový typ zapojenia má oproti dvojfázovému takmer dvojnásobný výkon a taktiež lepšie dynamické vlastnosti.



Obr. 8. Závislosť hnacej sily na prítlačnej sile trojfázového a dvojfázového motora.

4. Riadenie piezoelektrických motorov

Jedným z problémom pri týchto motoroch je riešenie uzavretej regulačnej slučky. Hneď ako prvý sa vynára problém senzora, ktorý by mal dostatočne veľkú rozlišovaciu schopnosť aby vôbec dokázal využiť obrovský potenciál piezoelektrických motorov v zmysle nízkeho rozmeru jednotkového kroku. Rozmer týchto motorov taktiež určuje, že veľkosť snímača nesmie byť veľká, keďže sa jedná zväčša o malé motory. Je viacero spoločností, ktoré sa snažia o vývoj vhodných senzorov. Jednou z nich je spoločnosť NANOS Instruments GmbH, ktorá vytvorila inkrementálny snímač na

magnetickom princípe. O tomto snímači si povieme neskôr.

Výskumný projekt Golem Švajčiarskych a Českých vývojárov sa zaoberá viacsým kapacitným snímačom. Tento snímač bude uložený na jednom substráte a bude merať polohu pohyblivej časti a taktiež jej aktuálne natočenie.

Ako už bolo vyššie spomínané piezoelektrický motor dosahuje najvyšší výkon pri svojej rezonančnej frekvencii. Na veľkosť tejto frekvencie vplyva mnoho faktorov. Jedným z nich je teplota okolia, ktorú musíme kompenzovať a samozrejme aj samotné adhézne trenie a na jeho veľkosť vplyvajú ako poruchy na systém. Pre tento účel sa výborne hodí fuzzy logika, ktorá sa pomerne jednoducho dokáže vyrovnat' s poruchami vstupujúcimi do systému.

Ďalším problémom pri piezoelektrických motoroch sú oscilácie, ktoré vznikajú pri zastavení. Tieto oscilácie vznikajú na základe trenia, ktoré samozrejme nie je dokonalé, teda ak berieme za úvahu, že mechanicky neovplyvujú na systém vôle v spojoch. Jednou z možností, ako sa vyrovnat' s týmito osciláciami je aplikovanie regulácie posicast, čiže pred regulátor zaradíme filter, ktorý nám na základe parametrov vytvorí, takú žiadanú hodnotu, ktorá s tvarovačom zabezpečí, že tieto oscilácie budú minimálne a utlmené. Tento systém sa už používa napríklad aj pri portálových zariadeniach na utlmenie dokmitu háku.

5. Piezomotor SE

Jedným z popredných výrobcov piezoelektrických motorov je švédka spoločnosť Piezomotor. Táto spoločnosť disponuje širokou škálou týchto pohonov počnúc lineárnymi, rotačnými, motorov do vákuua a podobne. Jedným z týchto motorov je Piezo LEGS Linear 10N, Obr.9.. Spoločnosť ho vyrába v troch variantách a to ako motor do bežného prostredia, do nemagnetického prostredia a do vákuua.



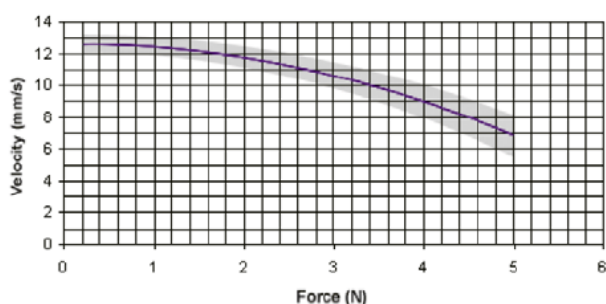
Obr.9. Piezo LEGS 10N

V Tab. 1. Sa nachádza pár vybraných parametrov tohto motora.

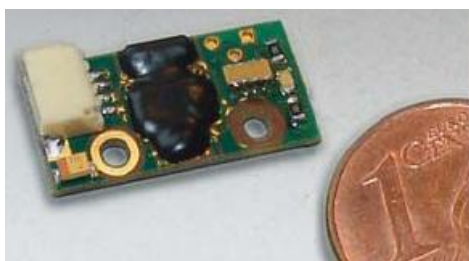
Tab.1. Vybrané parametre Piezo LEGS 10N

Parameter	Hodnota	Jednotky
Maximálny zdvih	55	mm
Maximálna rýchlosť	20	mm/s
Rozlíšenie	<1	nm
Maximálne napájanie	42	V
Maximálna sila pri státi	10	N
Maximálna prídržná sila	11	N
Rozmery	20x10,8x18,7	mm
Váha	20	g
Operačná teplota	od -20 do 70	°C

Závislosť rýchlosti od sily motora je znázornená na **Obr.10.**

**Obr.10.** Závislosť rýchlosti od vynaloženej sily motora.

Spoločnosť ku tomuto piezoelektrickému motoru dodáva taktiež inkrementálny snímač od už vyššie spomínanej spoločnosti NANOS Instruments GmbH, ktorý funguje na magnetickom princípe, **Obr. 11.**

**Obr.11.** Inkrementálny snímač polohy spoločnosti NANOS Instruments GmbH.

Vybrané parametre tohto snímača nájdeme v **Tab.2..**

Tab.2. Vybrané parametre senzora NANOS Linear encoder

Parameter	Hodnota	Jednotky
Rozlíšenie	250/122/61	nm
Maximálna rýchlosť	<250	mm/s
Maximálne napájanie	5	V
Maximálny prúd	25	mA
Rozmery	10x19x2,5	mm
Operačná teplota	od -25 do 100	°C

Ak by sme zostavu zloženú z tohto pohonu a senzora chceli použiť na reguláciu polohy, tak by sme ju museli ešte vybaviť vhodným regulátorom. Spoločnosť Piezomotor SE má vo svojom produktovom portfóliu, takéto regulačné jednotky, ktoré však bohužiaľ majú veľké rozmery a boli by pre použitie napríklad v mobilnom robotovi nepoužiteľné, čiže by sme museli vytvoriť vhodný regulátor, ktorý by dokázal uradiť takýto motor, či už fuzzy logikou, posicistom prípadne iným riadením a tým zmenšili rozmery na prijateľnej veľkosti.

7. Záver

Piezoelektrické motory zaraďujeme medzi nekonvenčné pohony, avšak ich nasadzovanie do technológií a výskum v tomto odbore neustále napredujú. Vedecké práce sa zaoberajú hlavne viacosými motormi, ktoré by boli použiteľné do priemyslu ako mikropohony. Ich momentálne nasadenie je hlavne v optike kedy zabezpečujú autofocus vo fotoaparátoch. Svojou vysokou rozlišovacou schopnosťou sa zaraďujú medzi najpresnejšie pohony na svetových trhoch, taktiež obrovská hustota výkonu je adekvátnym faktorom prečo by sme mali tieto pohony nasadzovať v dnešnej zelenej dobe.

Samozrejme, že tieto motory majú svoje nevýhody. Určite sa musíme vysporiadať s reguláciou na ktorú vplývajú vonkajšie poruchy ako teplota a adhézne trenie. Každopádne si myslím, že čas týchto motorov hlavne v biomedicíne, efektorov mobilných robotov, presnému polohovaniu a iných aplikáciách ešte len príde.

8. Odkazy na literatúru

- [1] Hurák, Z., a kol., "Řízení piezoelektrických motorů pro mikropohování" Automa, 2007 http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33904
- [2] Šíbl, O., „Electric drive with piezomotor“, Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering, 2008
- [3] Rydla, P., a kol., "Piezoelektrické motory", AUTOMA, 2000, http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27873
- [4] Černý, V., „Piezoelektrické motory – regulace a řízení“, AUTOMA, 2000, <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010408.pdf>
- [5] Piezomotor SE, Dostupné z: <http://www.piezomotor.se/>
- [6] New Scale: Dostupné z: <http://www.newscaletech.com/>