

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MECHATRONICKÉ AKTUÁTORY V PRŮMYSLU

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luděk KOLÁŘ**
Osobní číslo: **E12B0047K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Mechatronické aktuátory v průmyslu**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V úvodní části student objasní použití aktuátorů se zaměřením na konkrétní oblasti průmyslu.

1. Vysvětlete funkci a činnost rotačních a lineárních aktuátorů.
 2. Popište konstrukce základních typů těchto strojů (Sashidův klínový ultrazvukový motor (UM), ultrazvukový motor s postupnou vlnou, atd.)
 3. Popište princip návrhu tohoto typu stroje a materiály, které by jste na jeho výrobu použili.
 4. Popište trendy ve vývoji těchto strojů.
-

Abstrakt

Práce třídí a popisuje lineární a rotační mechatronické akční členy, využívané v dnešním světě. Zvláštní pozornost je věnována vývoji piezoelektrických aktuátorů. Je zde stručně popsán vývoj ultrazvukových motorů, základní princip na kterém pracují tzn. piezoelektrický jev nepřímý. Dále práce popisuje konstrukci, princip a vlastnosti Sashidova klínového ultrazvukového motoru a ultrazvukového motoru s postupnou vlnou. V případě UM s postupnou vlnou jsou zde shrnuty zásady návrhu tohoto typu motoru. V závěru jsou shrnuty oblasti současného komerčního využití UM a jeho potenciál pro využití v budoucnosti.

Klíčová slova

Aktuátor, akční člen, mechatronika, piezoelektrický jev, ultrazvukový motor, Sashidův klínový motor, motor s postupnou vlnou.

Abstract

Labour classifies and describes mechatronic linear and rotary actuators used in the world today. Special attention is paid to the development of piezoelectric actuators. It briefly describes the development of ultrasonic motors, the basic principle on which they are working, ie. indirect piezoelectric effect. It also describes the structure, principle and characteristics of Sashida wedge-type ultrasonic motor and ultrasonic motor of traveling wave. In the case of UM traveling wave are summarized principles of design of this type of engine. The conclusion summarizes contemporary commercial use of UM and its potential use in the future.

Key words

Actuator, mechatronic, Sashidas wedge-type motor, traveling wave motor, piezoelectric effect

...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Luděk Kolář

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	Úvod	8
	Seznam symbolů a zkratek	9
2	Mechatronické aktuátory	10
2.1	Ektromechanické aktuátory	11
2.1.1	Lineární aktuátory	11
2.1.1.1	Lineární asynchronní motor	12
2.1.1.2	Lineární synchronní motor	13
2.1.1.3	LSM a MAGLEV	13
2.1.1.4	Transrapid	15
2.1.2	Rotační aktuátory	16
2.1.3	Elektromechanické aktuátory s magnetickým polem	18
2.1.4	Elektromechanické aktuátory s elektrickým polem	18
2.2	Pneumatické akční členy	18
2.3	Hydraulické akční členy	19
3	Piezelektrické aktuátory	20
3.1	Piezelektrické aktuátory – vlastnosti	20
3.2	Piezelektrické materiály	21
3.3	Rozdělení piezelektrických materiálů	21
3.3.1	Krystalické materiály	22
3.3.2	Keramika PZT	22
3.3.3	Polymery	23
3.4	Konstanty piezelektrických materiálů	24
3.5	Deformace piezelektrických materiálů	27
3.6	Piezelektrické akční členy lineární – přímé	27
4	Ultrazvukové motory	30
4.1	Sashidův klínový motor	30
4.2	Motor na principu postupné vlny	31
4.2.1	Princip návrhu a vhodné materiály	34
5	Trendy ve vývoji ultrazvukových motorů	40
6	Závěr	43
	Literatura	44

1 Úvod

Mechatronické aktuátory vznikly jako logická odpověď na náročné požadavky dnešní dynamické doby, kdy jsou kladeny požadavky na rychlost, přesnost, produktivitu a efektivnost výroby. Příkladem mohou být CNC obráběcí stroje, poloautomaty, nebo v posledních dvou desetiletích zcela automatizované výrobní linky (např. v automobilovém průmyslu). V mechatronických systémech mechanických převodník vykonává přesný pohyb na základě řídicí veličiny generované inteligentními elektronickými obvody. V souvislosti s vývojem mikrorobotiky vyvstává potřeba elektromechanických převodníků na zcela nových principech, kdy dosažitelná hustota výkonu na jednotku objemu klasických elektromagnetických aktuátorů již není dostačující. Odpovědí mohou být motory založené na principu nepřímého piezoelektrického jevu. Pokud jsou piezoelektrické motory buzeny střídavým napětím s frekvencí vyšší než 20 kHz, mluvíme o ultrazvukových motorech. Jedná se o motory principiálně velmi malých rozměrů (řádově desítky mm, až mm). Některé jejich nenahraditelné vlastnosti jsou mimo jiné popsány v této práci.

Seznam symbolů a zkratk

s	Skluz
f	Frekvence [Hz]
v	Rychlost [$\frac{m}{s}$]
v_s	Rychlost postupné vlny v primární části motoru [$\frac{m}{s}$]
F	Tahová síla [N]
n_s	Synchronní otáčky [min^{-1}]
d_{ij}	Piezoelektrická nábojová konstanta
K^T	Dielektrická konstanta
E	Youngův modul pružnosti
$k.$	Piezoelektrický Coupling faktor
Q_m	Činitel jakosti
T_μ	Mechanické napětí
λ	Vlnová délka [m]
r_s	Střední poloměr [m]
ω	Úhlová rychlost [$\frac{rad}{s}$]
I	Moment setrvačnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
M	Moment motoru [Nm]
UM	Ultrazvukový motor
PCB	Motor desky plošného spoje

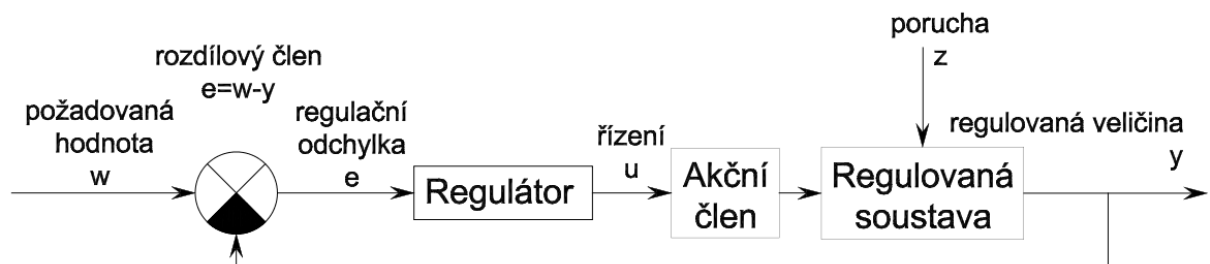
2 Mechatronické aktuátory

Mechatronika je relativně mladý vědní obor, rozvíjející se od sedmdesátých let dvacátého století. Tento interdisciplinární obor, zahrnující a koordinující poznatky mnoha vědních disciplín, nejen elektromechaniku, elektroniku a výpočetní techniku, dostal svůj název sloučením slov mechanika a elektronika (mechanics and electronics). Název byl prvně použit v japonské literatuře v roce 1976. Dnes se již dá chápat tento výraz nejen jako spojení elektromechanického prvku s inteligentními obvody, ale jako jakási hlubší filozofie zahrnující rovněž plánování výrobků do nejjemnějších detailů i strategii výroby.[4]

.Důležitými znaky mechatroniky jsou:

- Synergický efekt - výsledný technologický efekt je vyšší, než by byl pouhým součtem dílčích účinků.
- Produkce výrobků za užití sofistikovaně řízených mechanicko – elektronických převodníků.
- Návrh a užívání inteligentních systémů (samoregulace, samodiagnostika, samoopravitelnost atd.).

Spojením řídicích obvodů, akčních členů a senzorů zabezpečujících zpětnou vazbu vzniká mechatronický systém. Jedná se o systém dynamický s řízenými proměnnými síly, polohy, rychlosti momentu atd. Akční členy (aktuátory) provádějí akční zásah. Skutečná hodnota na výstupu je zaznamenána senzory. Signály senzorů $v(t)$ jsou v řídicím centru porovnány s požadovanou hodnotou $w(t)$. Poté je zpracována regulační odchylka $e(t)$. [4]



Obr. 2.1: Znárodnění regulační smyčky se zpětnou vazbou.

Může se jednat o systém s hardwarovou integrací, kdy jsou řídicí část a senzory integrovány do mechanické části, nebo softwarovou integrací – zpracovává informace zpětnovazební smyčky plus je zde další vliv již existujících znalostí a zpracování aktuálních hodnot, které lze využít v nadřazených úrovních řízení systému, například při diagnostice závad, kontrole a optimalizaci výroby. [4]

Mechatronickým aktuátorem, nebo také výkonovým měničem, či akčním členem nazýváme takový prvek mechatronické soustavy, kde na vstupu je řídicí informace převáděná na mechanický pohyb. Z funkčního hlediska je možné aktuátor považovat za opak senzoru, který ze snímaných hodnot získává informaci.

Podle řídicí veličiny můžeme aktuátory klasifikovat jako:

- elektromechanické (řídicí signál je elektrické napětí, či proud)
- pneumatické (řízené tlakovým plynným médiem),
- hydraulické (řízené tlakovým kapalným médiem),
- speciální (řízené např. teplotou, světlem, apod)[1]

2.1 Elektromechanické aktuátory

Vstupem je elektrická řídicí veličina, která je převedena na akční veličinu mechanického charakteru. Tou může zpravidla být, síla, deformace, točivý moment atd.

Podle druhu pohybu lze elektromechanické aktuátory rozdělit na:

- lineární,
- rotační,
- aktuátory s více stupni volnosti.

2.1.1 Lineární aktuátory

- nepřímé - u nepřímých dochází k pohybu např. vlivem elektrického ohřevu vhodně zvoleného dilatačního elementu. Zde se jedná o aktuátory termoplastické. Podle provedení dilatačního prvku se dále dělí na monometalické a bimetalické. Mezi lineární se řadí také aktuátory rotační, které však svou rotaci vzápětí převádí na translační pohyb. [4]

- přímé - kde lineární pohyb vzniká přímým působením elektromagnetické síly. Jedná se například o asynchronní motor s rozprostřeným statorem a rotorem, nebo o synchronní motor. Typickým představitelem tohoto typu technologie jsou rychlovlaky MAGLEV[4]

2.1.1.1 Lineární asynchronní motor

V některých aplikacích je výhodné použít přímý lineární motor. Je možné si ho představit jako motor klasický rotační, který je podélně z části rozříznutý a rozvinutý do roviny. Lineární motor přímý může v zásadě vycházet z jakékoliv klasické rotační konstrukce. Zdá se výhodné použít takový typ motoru, kde je postačující pouze jedno napájení. Tedy motor reluktanční, synchronní s permanentními magnety, nebo motor asynchronní.[4] Nejběžnější lineární aktuátory jsou skutečně odvozeny od asynchronního motoru s kotvou nakrátko a mohou být v provedení s pevným primárem, nebo s pevným sekundárem (klec nakrátko). Během pohybu se jedna část stroje dostává částečně mimo dosah magnetického pole. V případě, že se jedná o sekundár, v části mimo magnetické pole nevznikají silové účinky. V případě napájeného primáru, dochází k nárůstu proudu z důvodu poklesu magnetické vodivosti a tedy i reaktance. Z tohoto důvodu se primár a sekundár navrhují nestejně dlouhé. Varianta s krátkým pohyblivým primárem a dlouhým pevným sekundárem se používá v aplikacích vyžadujících pouze krátký pohyb. Druhá varianta s pevným krátkým primárem a dlouhým posuvným sekundárem je určena pro pohyby dlouhé. [5]

Rychlost postupné vlny v napájené části lineárního přímého motoru nezávisí na počtu pólů, ale pouze na pólové rozteči a na frekvenci.

$$v_s = 2t_p f, \quad (2.1)$$

skluz je definován:

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (2.2)$$

skutečná rychlost posunutí pak:

$$v = (1-s)v_s, \quad (2.3)$$

Zvýšit rychlost lze tedy zvýšením frekvence, či zvětšením pólové rozteče (což vede k nárůstu podílu neaktivní mědi). V praxi může z důvodu velké vzduchové mezery a velkému odporu kotvy skluz přesáhnout 50%.[7] Výsledná výstupní rychlost může tedy být mnohem menší, než rychlost postupného magnetického pole. Jednou z nevýhod je tzv. okrajový efekt, který obecně zhoršuje vlastnosti motoru. Souvisí se vznikem a zánikem postupné vlny v napájené části. [5]

2.1.1.2 Lineární synchronní motor

Také u lineárního synchronního motoru je patrná analogie s rotačním motorem. Synchronní rychlost motoru je dána frekvencí a pólovou roztečí. Lze ji určit ze vztahu:

$$v_s = \frac{2t}{T} = 2t \cdot f, \quad (2.4)$$

Tahová síla F lineárního synchronního motoru je ekvivalentem momentu M u rotačního stroje. Je závislá na posuvu magnetických polí primáru a sekundáru γ (obdoba úhlu β u rotačních motorů).

$$F = F_{max} \cdot \sin(\gamma) \quad (2.5)$$

2.1.1.3 LSM a MAGLEV

Pro trakci je používán lineární synchronní motor v rychlovlacích s užitím magnetické levitace - MAGLEV. Klasická železniční doprava má své rychlostní limity, které ani již žádným vylepšováním není možné překročit. Pro rychlovlaky založené na tradičním principu se jeví jako hraniční 300 km/h (např. kvůli adhezi kola na železnici). [8] Oproti tomu rychlovlaky typu MAGLEV se nejen na zkušebních ale dnes již i na komerčně využívaných tratích pohybují rychlostmi okolo 500 km/h a zdaleka svůj limit ještě nenašli. [8]



Obr. 2.2: Transrapid.

Princip elektromagnetické levitace byl patentován již ve třicátých letech minulého století. Od konce šedesátých let v Německu a od sedmdesátých let v Japonsku se pracovalo na prvních funkčních prototypch magneticky levitujících vozidel.

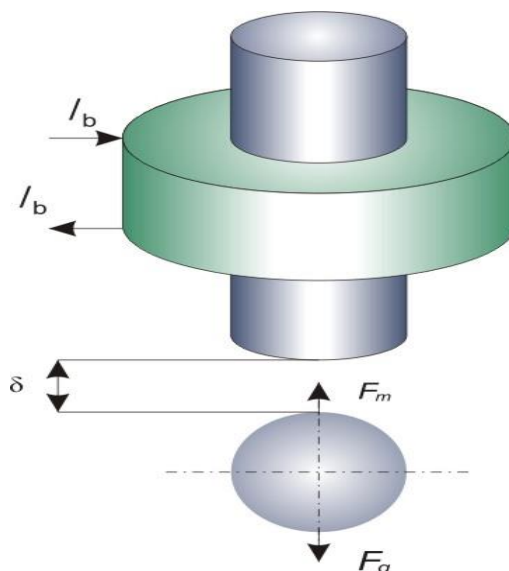
Zkušební provoz byl na trati dlouhé 31.5 km zahájen u německého Lathenu v roce 1985.

První komerční linka byla zahájena v roce 2006 a spojuje centrum Šanghaje s tamějším letištěm. [8]

V zásadě se jedná o dvě koncepce levitace rychlovlaků MAGLEV.

- elektromagnetická koncepce EMS (elektromagnetic suspension, neboli elektromagnetické odpružení, levitace)
- elektrodynamickou koncepcí EDS

Princip EMS (využívá ji německý systém TRANSRAPID) - byl patentován již ve třicátých letech minulého století, ale k praktickému využití mohlo dojít až s rozvojem rychlé regulační techniky. Na těleso působí gravitační síla F_g a síla elektromagnetu F_m ve směru opačném ke gravitaci. Velikost síly F_m ovlivňuje budící proud I_b a vzdálenost levitujícího tělesa od elektromagnetu δ . Platí-li $F_g = F_m$, pak těleso levituje. [9] Jedná se však o stav velice nestabilní, kde postačí velice malé zakolísání budícího proudu I_b , nebo malá změna vzduchové mezery a dojde k odpadnutí, nebo naopak k přitažení tělesa k elektromagnetu. Stabilní levitace je umožněna zpětnovazební regulací proudu I_b . Vzdálenost δ je hlídána čidlem polohy. Při zmenšení mezery dojde ke snížení budícího proudu a naopak. U systému TRANSRAPID je hodnota δ zhruba okolo 10 mm. [8] [9]



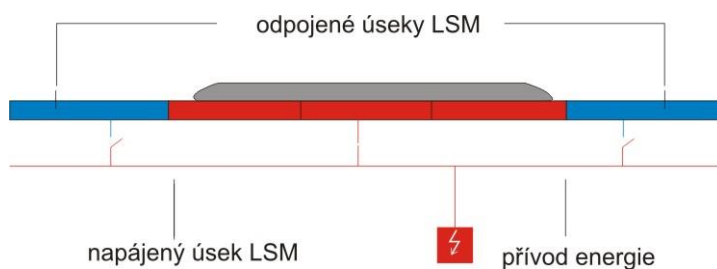
Obr. 2.3: Princip magnetické levitace EMS.

Princip elektrodynamické levitace EDS (využívá ji konkurent Transrapidu japonský MLU). Do jízdni dráhy jsou zabudovány obdélníkové cívky zapojené dokrátka, souprava je osazena rovněž cívkami, kterými protéká stejnosměrný proud. Při pohybu se mění magnetický

tok spřažený s pevnými cívkami a tak se v nich indukují proud. Dochází k interakci mezi magnetickým polem pohyblivých a zabudovaných cívek. Síla působící na cívky soupravy má složku odpuzující F_l a složku působící proti směru pohybu F_b . [8] Levitační složka musí být dostatečně velká. Z toho důvodu se soupravy osazují cívkami ze supravodivých materiálů. Používá se slitiny niob-titanu uložené v kryostatu, chlazeného kapalným heliem až na teplotu $-269\text{ }^\circ\text{C}$. [9] Taková cívka je schopna generovat magnetické pole 5-6T. Z uvedeného je jasné, že levitační síla je nenulová pouze pokud je souprava v pohybu. Japonské superexpresy skutečně pro rozjezd a zastavení používají klasické soukolí. K levitaci dojde, pokud souprava přesáhne kritickou rychlost (cca 80km/h). [9]

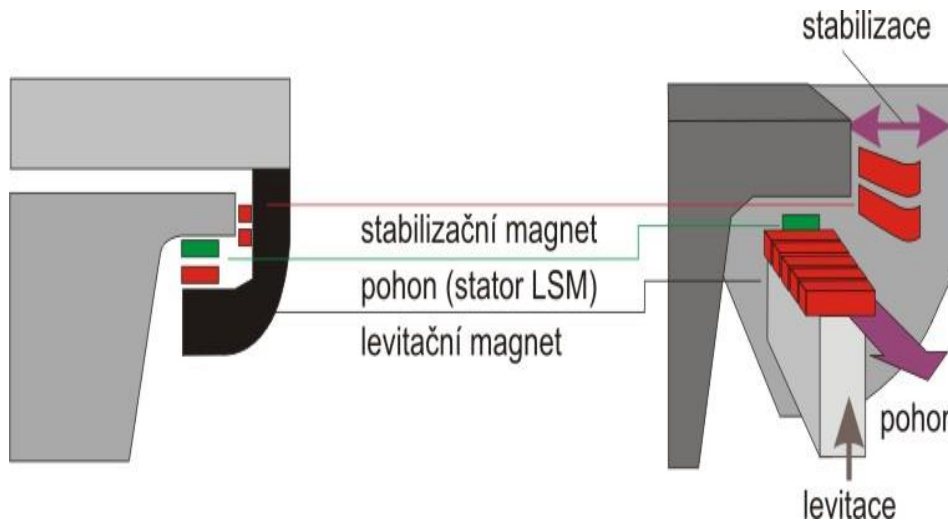
2.1.1.4 Transrapid

Transrapid je proveden jako lineární synchronní motor s dlouhým státorem. Stator tvoří pakety plechů, v nichž jsou zkonstruovány drážky pro trojfázové vinutí. Trojfázové vedení indukují postupné magnetické pole. Pakety s vinutím jsou umístěny ve spodní části trasy a to po celé její délce. Trasa je však rozdělena na části, které jsou jen o něco málo delší, než je délka soupravy. Rádioovým signálem je kontrolována poloha soupravy a následně je zaktivován konkrétní projížděný úsek statoru. Zbytek trasy je odpojen. Úseky jsou napájeny pomocí IGB tranzistorů o výkonu 15 MVA ze sítě 110kV. [8]



Obr. 2.4: Způsob napájení trasy Transrapidu.

Rychlost je řízena frekvencí, která se pohybuje od 0 do 215 Hz. Rotor, nebo lépe řečeno jezdec je celá souprava, v jejímž podvozku jsou elektromagnety, které zajišťují jednak vazbu s postupným magnetickým polem a zároveň levitaci, ale i boční stabilizaci, což je důležité např. při projíždění zatáček ve velkých rychlostech. Tyto magnety, stejně jako spotřeba energie spojená například s osvětlením, či klimatizací, jsou napájeny bateriemi umístěnými ve voze. Při rychlostech nad 80 km/h se baterie dobíjí pomocí asynchronního generátoru. Brzdění probíhá pomocí přepnutí do generátorového stavu za zisku rekuperované energie. [9]



Obr. 2.5: Levitační a stabilizační magnety zabudované v soupravě jsou označeny červeně. Pakety plechů na spodní straně trasy jsou označeny zeleně.[8]

2.1.2 Rotační aktuátory

Zde mechanický projev ve formě pohybu zajišťují většinou sofistikovaně řízené klasické elektromotory. Nespornou výhodou je dlouhá tradice projektování a výroby těchto typů motorů, které byly během svého dlouhého vývoje dovedeny k vysokému stupni dokonalosti.

Často využívané jsou:

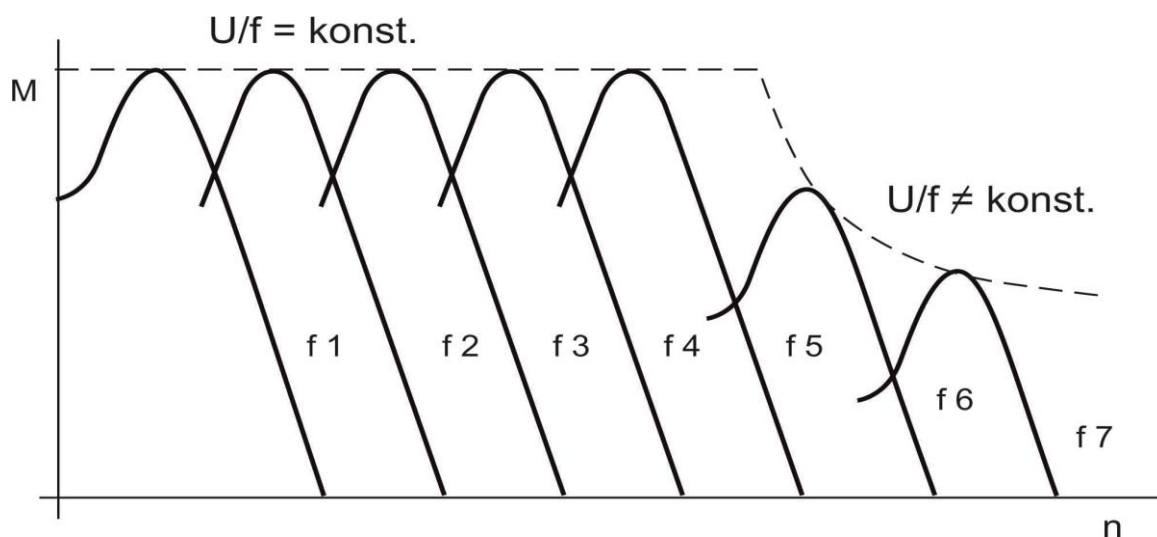
- asynchronní motory s frekvenčním řízením s pulzně-šířkovou modulací (PWM), nebo vektorově řízené,ASM je v současné době díky možnostem sofistikovaného řízení jedním z nejužívanějších motorů oblasti elektrických pohonů. V tradičním třífázovém provedení s kotvou nakrátko se jedná o vysoce spolehlivý prvek nenáročný na údržbu, pohybující se v rozumných finančních relacích.

Změny otáček, jak je patrné z rovnice

$$n = n_s(1-s) = \frac{f_1}{p(1-s)}, \tag{2.6}$$

kde n_s jsou synchronní otáčky, s skluz, f_1 kmitočet napájecího napětí motoru, p počet pólových dvojic statoru,

je možné dosáhnout změnou frekvence napájecího napětí statoru. Pokud U_1/F_1 bude konstantní, magnetické poměry v motoru zůstanou nezměněny.[5] Se snížením frekvence tedy musí být sníženo i napájecí napětí. K řízení otáček se používají frekvenční měniče s pulzně šířkovou modulací. Některé firmy (př.Siemenz) dodávají ASM, kde je frekvenční měnič přímo součástí motoru. Může být pomocí pokročilého frekvenčního měniče vektorově řízen. Vektorové řízení může být se zpětnou vazbou, nebo bez zpětné vazby. V prvním případě procesor vyžaduje údaje o aktuálním stavu polohy rotoru, magnetického toku a odebíraného proudu. Jsou vněm předefinovány některé konstanty stroje. Procesor docílí požadovaných výstupních parametrů díky velice rychlému řešení matematického modelu stroje.



Obr. 2.6: Změna průběhu momentové křivky v závislosti na poměru U/f . [4]

- **synchronní motory** - bývají řízeny měničem s pulzně - šířkovou modulací, V mechatronických soustavách jsou užívány zejména synchronní stroje menších výkonů s permanentními magnety. Eliminují se tím ztráty v buzení a odpadá potřeba přívodního napájení buzení. Stejně jako u ASM je umožněno široké uplatnění SM v servopohonech díky rozvoji výkonové elektroniky, především pak frekvenčních měničů. [4]
- stejnosměrné motory s komutátorem, či elektronickou komutací,
- reluktanční motory,
- krokové motory.

U elektromechanických aktuátorů se využívá silové působení:

- magnetického pole na proudovodiče, nebo feromagnetický materiál,
- elektrického pole na elektricky nabitý vodič, nebo dielektrikum.

2.1.3 Elektromechanické aktuátory s magnetickým polem

V případě využití aktuátorů s magnetickým polem se dosahuje velké hustoty tohoto pole, lze tak docílit velkého silového působení. Klasické elektromotory využívají magnetickou vazbu mezi státorem a rotorem.. Elektromotory ve smyslu aktuátorů jsou převodníky elektrické energie na mechanickou jako výsledek určitého zpracování informace a výkonového zásahu. U převodníků se zpětnou vazbou hovoříme o regulačních pohonech, či servopohonech. [1]

2.1.4 Elektromechanické aktuátory s elektrickým polem

Hustota energie elektrického pole je na rozdíl od pole magnetického pole malá, zařízení využívající silových účinků elektrostatického pole nachází svá uplatnění jen ve speciálních případech, a to především v měřicí technice. Aktuátor v takovém případě může mít např. tvar deskového kondenzátoru a výsledná síla působící na jeho elektrody je důsledek přitažlivé síly elektrostatického pole. [1]

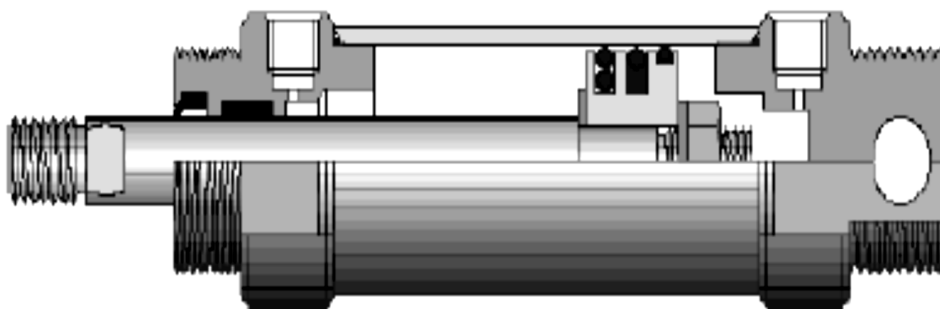
2.2 Pneumatické akční členy

Podstatou pneumatického akčního členu je převod tlaku na sílu, nebo výchylku. Podle druhu výstupního pohybu lze tyto akční členy užívané v mechatronických soustavách rozdělit na: posuvné, kyvné a rotační. Velice často užívanou aplikací a to zejména v oblasti ovládací techniky je dvoupolohový pístový pohon, který vyniká velkou výstupní silou, velkým zdvihem, je celkově robustní a spolehlivý. Může se jednat o dvojitý, nebo jednočinný provedení s vratnou pružinou. [4]

Pneumatické akční členy s přímočarým pohybem jsou poměrně rozšířeným prvkem mechatronických systémů a to zejména díky své odolnosti a nízkým pořizovacím i provozním nákladům. Přesto jsou v současné době na ústupu. Příčinou je poněkud delší odezva na řídicí signál a především menší přesnost nastavení, zapříčiněná snadnou stlačitelností vzduchu. Nevýhodou je též potřeba vysokého tlaku vzduchu, neboť jinak nelze dosáhnout požadovaných výstupních sil. [4]

2.3 Hydraulické akční členy

Hydraulické aktuátory se vyznačují značnými silami, či momenty a vysokými tlaky pracovního média (ve většině případů oleje), který dosahuje hodnot až desítek MPa. Typickým představitelem hydraulického akčního členu je výsuvný polohovací válec známý např. z dopravní techniky (zdvih ložné plochy nákladních automobilů), pohyb pracovních částí stavebních strojů, lisů, či např. v robotice. V porovnání s elektromechanickými aktuátory, mají hydraulické akční členy lepší poměr hmotnost/výkon. [4]



Obr. 2: Dvojitý hydraulický aktuátor. [4]

Nastavení parametrů pohybu, zejména pak velikost síly působení a nastavení přesné polohy, zabezpečuje elektro- hydraulický servopohon. Kromě zmíněného elektro- hydraulického servopohonu se používají servopohony elektrické a pneumatické. Všechny typy mají stejný úkol- převedení řídicího signálu na pohyb o odpovídajících výstupních parametrech. Samozřejmostí je zpětná vazba signalizující skutečný stav aktuátoru. Často se používajív automatizační technice jako regulace ventilů a regulačních klapek. [4]

Tabulka 2.1: Porovnání vlastností akčních členů.

Akční člen	Mechanické posunutí	Přesnost posunutí	Síla /tlak	Časová odezva
Piezoelektrický	0,1 mm	10 nm	1000N	50 μs
Elektrodynamický s posuvným pohybem ¹	1–30 mm	0,1 μm	300 N	1 ms
Pneumatický	100 mm	100 μm	0,1 MPa	0,1–1 s
Hydraulický	1 000 mm	10 μm	100 MPa	1–10 s

1) Nejrychlejší verze běžně používaného elektromechanického měniče. [4]

3 Piezoelektrické aktuátory

Moderní trendy ve výrobě s sebou nesou požadavky na miniaturizaci a integraci mechanického systému s aktuálními a senzorickými funkcemi. Z velké části jsou tyto potřeby uspokojovány využitím vhodných vlastností některých tzv. inteligentních materiálů. Jedná se na jedné straně o materiály pasivní (magnetické kompozitní materiály), nebo na druhé straně o materiály aktivní. Sem patří např. materiály s tvarovou pamětí, či materiály piezoelektrické.

3.1 Piezoelektrické aktuátory – vlastnosti

Piezoelektrické motory využívají elektrostriktce. Energie zde není přenášena mezi statorem a rotorem na základě elektromagnetické vazby, ale mechanickou energií vibrací. Ty jsou zapříčiněny v čase se měnící deformací aktivní části aktuátoru. Vlivem přiložení střídavého napětí k piezoelektrickému sektoru. Přestože se zde jedná o deformace velmi malé (většinou v řádech μm), díky vysokým frekvencím lze dosáhnout i vysokých otáček. Výsledkem vibrací o ultrazvukové frekvenci (od 20 kHz) je tichý chod motoru.[5] Odtud název ultrazvukové motory. Oproti elektromagnetickým motorům také nabízí lepší poměr točivého momentu ku hmotnosti. Další výhodou ultrazvukových motorů v porovnání s motory jsou přirozeně nízké otáčky a lze upustit od nutnosti převodového ústrojí. Tím může být velikost a také složitost celého systému redukována a dochází k minimalizaci nákladů na hardware. Takovéto zjednodušení též zlepšuje přesnost servosystému. Za další mají UM velký přídržný moment, jelikož rotor je pevně přitlačen k statoru. Bez elektřiny v podstatě nelze docílit rotace motoru. Dále díky využití piezoelektrického efektu místo elektromagnetického, nedochází k elektromagnetické interferenci (EMI). [5] [10]

Některé vlastnosti lineárních piezoelektrických aktuátorů jsou unikátní a klasickými aktuátory nedosažitelné.

Především jsou to:

- vysoká přesnost nastavení posunutí (až $0,01 \mu\text{m}$),
- velmi rychlá odezva na řídicí signál (např. $50 \mu\text{s}$),
- velká generovaná síla (až 1000 N) při poměrně malém řídicím napětí (100V).

Příklady použití lineárních piezoelektrických aktuátorů:

- Aktivní potlačování vibrací,

- Miniaturní polohovací zařízení,
- Řízené obtékání profilů těles,
- Nastavení polohy snímací hlavy videorekordérů,
- Zlepšení jízdního komfortu pomocí inteligentních tlumičů. [4]

3.2 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické aktuátory pracují na principu využití nepřímého piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je vlastnost některých látek (nesymetrických iontových krystalů) následkem deformace vykazovat elektrické napětí. Jev opačný, kdy v důsledku působení elektrického pole dochází k deformaci krystalu se nazývá nepřímý elektrostatický jev, neboli elektrostikce. V případě elektrostikce dochází k větší mechanické deformaci, než u přímého piezoelektrického jevu. Je třeba počítat s tím, že zde dochází po odpojení elektrod ke zbytkové polarizaci, kdy se dipóly zcela nevrátí do původní polohy, tedy polohy před připojením elektrod. Využitím piezoelektrického jevu přímého i nepřímého můžeme aplikovat piezoelektrika jako akční členy, či jako senzory.[4]

Piezoelektrický jev byl objeven v devatenáctém století bratry Jacquesem a Pierrem Curie, kdy při mechanickém stlačování krystalů turmalínu bylo na přiložených elektrodách změřeno napětí. Zároveň byl jimi vysloven předpoklad, že naměřené napětí je přímo úměrné velikosti tlaku, který působí na krystal piezoelektrika. Velikost tohoto napětí je též úměrná velikosti plochy, na kterou je tlak vyvíjen. Rovněž navrhli vysvětlení tohoto jevu pomocí modelu krystalu bez středu souměrnosti, kde jsou spontánně polarizované domény elektrických dipólů dané látky, spojené s krystalovou mřížkou materiálu. Mechanickým stlačením materiálu dochází k deformaci mřížky, což je důvodem změny v uspořádání kladných a záporných nábojů podél polární osy. Tímto způsobem se vytvoří náboj na povrchu materiálu.[9]

3.3 Rozdělení piezoelektrických materiálů

- zástupci nesymetrických krystalů např. Křemen,
- látky, které byly zpolarizované elektrickým polem např. PZT keramika,
- polymery,
- materiály kompozitní - nepiezoelektrické v jistém poměru s piezoelektrickými,
- některé materiály živočišného původu (kosti).[4]

3.3 .1 Krystalické materiály

Nejnámějším a také nejdéle studovaným zástupcem této skupiny je krystal křemene (SiO_2). Především díky svým některým unikátním vlastnostem jako je chemická odolnost, nízká permitivita. Křemen v senzorech např. firmy Kistler AG, Švýcarsko křemenných rezonátorů (např. firmy Krystaly a.s., Hradec Králové uměle pěstované Langatite ($\text{La}_3\text{Ga}_5.5\text{Ta}_0.5\text{O}_{14}$), Langanite ($\text{La}_3\text{Ga}_5.5\text{Nb}_0.5\text{O}_{14}$ Galium Orthophosphate (GaPO_4), Langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$). [15]

Dále byly objeveny v 60. letech 20. Století uměle vytvořené krystaly Lithium Tantalate (LiTaO_3), Lithium Niobate (LiNbO_3), které se používají hlavně v optice pro generaci vyšších harmonických frekvencí světla a jako rezonátory. K látkám s extrémní anizotropií parametry patří tuhé roztoky $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT), $(1-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ (PZNPT). Tyto látky se vykazují vůbec nejlepšími piezoelektrickými hodnotami z nám známých materiálů. Piezoelektrický koeficient dosahuje až 2500pC/N . příkladem použití jsou ultrazvukové sondy v medicíně. [15]

3.3.2 Keramika PZT

PZT keramika se vyrábí smícháním práškových kovů, především pak titanu a zirkonia. Smíchané kovy jsou zahřívány. Po přidání organického pojiva lze takovýto materiál vytvarovat do požadovaného tvaru a následně je hmota znovu zahřívána až těsně pod hranici Curieho teploty. Materiál je vystaven silnému elektrickému poli. Tím dojde k nasměrování domén dipólů. Po vyjmutí materiálu z elektrického pole zůstává remanentní polarizace. [15]

PZT keramiku lze rozdělit na měkkou a tvrdou. Záleží na způsobu dotace struktury PZT.

Měkká PZT

Keramiku mechanicky měkkou dostaneme, budeme-li strukturu dopovat malým množstvím atomů s vyšším mocenstvím (např. Nb^{5+}). Vznikne tak keramika s vysokými piezoelektrickými koeficienty, avšak méně odolná vůči mechanickému a elektrickému působení. Takto vzniklá soft keramika se v průmyslu používá pro výrobu senzorů. Curieova teplota se pohybuje v rozmezí $150\text{-}360\text{ }^\circ\text{C}$. [15]

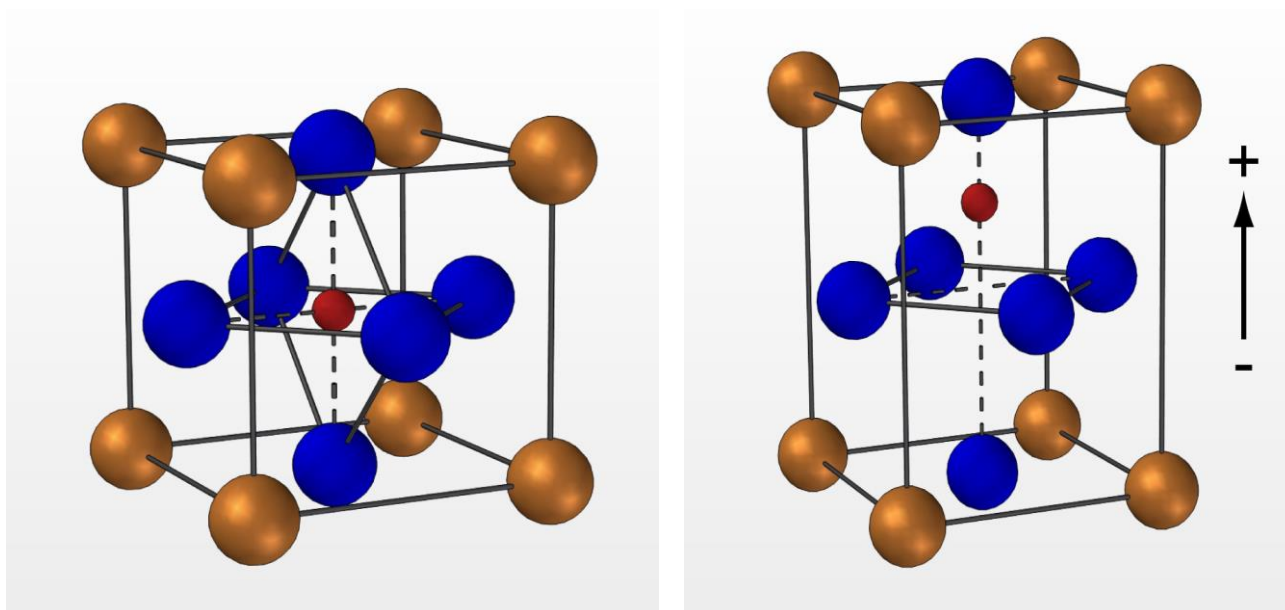
Tvrdá PZT

Struktura je doplněna malým množstvím dopujících atomů Fe^{3+} , Mn^{3+} má nízké piezoelektrické koeficienty a vydrží vyšší elektrické a mechanické namáhání, ale ve srovnání s měkkou keramikou vykazuje nižší deformaci. Je vhodná pro výkonové aplikace.

Curieova teplota 300-360 °C. Jako další vhodný materiál pro UM typu postupné vlny se používají krystaly bariumtitanátu a ještě výraznější piezoelektrické vlastnosti mají PbZrO_3 a PbTiO_3 . [15]

3.3.3 Polymery

Prvním polymerem, ve kterém byly objeveny piezoelektrické vlastnosti byl polyvinylidifluoretylen (PVDF). Potřebné anizotropie je zde dosaženo cíleným uspořádáním koncových atomů fluoru, které jsou orientovány stejným směrem. Část polymeru je ve formě krystalků, část tvoří amorfni řetězec, který se proplétá kolem zrn krystalické fáze. Polyvinylidifluoretylen lze polarizovat jednak silným elektrickým polem, nebo pouhým jednosměrným natažením, případně můžeme vhodně kombinovat oba způsoby polarizace. Vynikajících vlastností dosahuje polypropylen, ve kterém jsou dutinky plněny inertním plynem (např. Ar, N). Silným elektrickým polem se vytváří dlouhodobý náboj uvnitř dutinek, který se podílí na vzniku anizotropie a tím i piezoelektrických vlastnostech materiálu. [15]



Obr. 3.1: Vlevo krystal piezoelektrické látky bez působení vnějších sil. Vpravo vznik rozdílu potenciálů v důsledku deformace krystalu. [11]

3.4 Konstanty piezoelektrických materiálů

Curieova teplota

Je specifická teplota daného materiálu, kdy dojde k fázovému přechodu. Nesymetrická struktura se změní na symetrickou. Piezomateriály ztrácí vlivem zániku anizotropie krystalů své piezoelektrické vlastnosti. Platí tedy čím vyšší Curieova teplotu má použitý materiál, tím lépe.

Piezoelektrická napěťová konstanta g_{ij}

Mechanického napětí, které působí na vhodný materiál, způsobí jeho deformaci a vznik elektrického pole. Napěťová konstanta popisuje velikost tohoto vygenerovaného pole. První index (i) označuje osu elektrického pole. Druhým indexem (j) je značena osa mechanického působení.

Piezoelektrická nábojová konstanta d_{ij}

Neboli konstanta deformační. Vyjadřuje velikost mechanického přetvoření působením elektrického náboje, nebo naopak. První index (i) označuje osu polarizace elektrického náboje. Druhým indexem (j) je značena osa mechanického působení. Jedná se o důležitou materiálovou konstantu v aktuálních aplikacích.

$$d = \frac{\text{Mechanické převoření}}{\text{Intenzita elektrické pole}} = \frac{\text{Plošná hustota náboje}}{\text{Mechanické napětí}},$$

$$d_{ij} = k_{ij} \sqrt{\varepsilon_{ii}^T S_{jj}^E}, \quad (3.1)$$

d_{ij} příslušná nábojová konstanta, k_{ij} hodnota Coupling faktoru, ε_{ii}^T permitivita materiálu při konstantním zatížení, s_{jj}^E hodnota elastické poddajnosti při konstantním elektrickém poli.

Dielektrická konstanta K^T

Dielektrická konstanta je často uváděna výrobcí PZT keramik.

$$K^T = \frac{\varepsilon_{ii}^T}{\varepsilon}, \quad (3.2)$$

ε_{ii}^T značí permitivitu udávanou při stálém mechanickém přetvoření v ose,

ε značí permitivitu permitivity vakua.

Youngův modul pružnosti E

Je určen poměrem mezi mechanickým napětím a vzniklým přetvořením. Lze ho interpretovat, jako tuhost materiálu. Opačný poměr se značí s a udává elasticou poddajnost materiálu.

S_{33}^D značí poddajnost pro napětí ve směru 3 a zároveň přetvoření ve směru 3 při konstantní hustotě náboje.

$$S_{33}^D = \frac{1}{4\rho f_a^2 l^2}, \quad (3.3)$$

ρ je hustota materiálu, f_a je antirezonanční frekvence, l je délka obdélníkové piezokeramiky.

Piezelektrický Coupling faktor k .

Určuje efektivitu piezoelektrika, to znamená, udává jak velká část elektrické energie je piezomateriál schopen přeměnit na energii mechanickou (nebo naopak). Coupling faktor určují kromě materiálu také například tvar a rozměry, případně druh vibračního módu.

k_{ef} se používá pro popis efektivitu při vyšších frekvencích keramik a značí Coupling faktor obecně pro libovolný tvar.

$$k_{ef}^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_r^2}, \quad (3.4)$$

f_a značí antirezonanční frekvenci, f_r značí rezonanční frekvenci.

Činitel jakosti Q_m

Činitelem jakosti lze popsat šířku frekvenčního rezonančního pásma. Jde o poměr reaktance a rezistivity v náhradním sériovém zapojení.

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (3.5)$$

f_2, f_1 označují hraniční frekvence hraničního pásma.

Tabulka 3.1: Srovnání charakteristických vlastností některých látek

Materiálová konstanta	Křemen	Piezoelektrická keramika PZT	Kompozit PVDF
Deformační d (10^{-12} C/N)	2,3	190	33
Napěťová g (10^{-3} Vm/N)	58	27	380
K (1)	0,09	0,51	0,30
Q (1)	106	500	3-10

[4]

3.5 Deformace piezoelektrických materiálů

Deformaci tělesa ve směru jedné osy (podélně, nebo tloušťkově ve vztahu k přiloženým elektrodám) vyjadřuje rovnice:

$$S = \frac{\Delta L}{L}, \quad (3.6)$$

kde S značí deformaci, L je původní délka, nebo tloušťka a ΔL je *mechanické posunutí*.

Piezoelektrický jev přímý - působením mechanického napětí T vzniká elektrické pole E , g značí napěťovou konstantu materiálu.

$$E = -g T, \quad (3.7)$$

Závislost deformace na velikosti elektrického pole – piezoelektrický jev nepřímý.

$$S = d E, \quad (3.8)$$

d je deformační konstanta materiálu;

Vztah mezi deformací S a mechanickým napětím T určuje rovnice

$$S = s T, \quad (3.9)$$

s je elastický koeficient materiálu tělesa.

Deformaci piezoelektrické látky namáhané mechanickým pnutím a elektrickým polem za působení konstantní teploty pro adiabatický děj popisuje stavová rovnice

$$S_\lambda = S_{\lambda\mu}^E T_\mu + d_{j\lambda} E_j. \quad (3.10)$$

S_λ deformace tělesa, $S_{\lambda\mu}^E$ elastický koeficient pro konstantní elektrické pole,

$d_{j\lambda}$ piezoelektrický koeficient, T_μ mechanické napětí, E_j elektrické pole.

Indexy λ, μ, j se značí tenzory. Tenzory respektují osy působení elektrických a mechanických sil. Nabývají hodnot pro λ, μ 1-6, pro j 1-3. [4]

3.6 Piezoelektrické akční členy lineární – přímé

nejjednodušším aktuátorem tohoto typu je destička, nebo tyčinka z piezoelektrického materiálu, kde vhodně zvolené přiložení elektrod způsobí napětí U a zajistí tak působení

elektrického pole

$$E = \frac{U}{L}, \tag{3.11}$$

Zásluhou piezoelektrického koeficientu d_{ij} dojde k deformaci tělesa S ve smyslu působení elektrického pole. Pro velikost deformace potom platí:

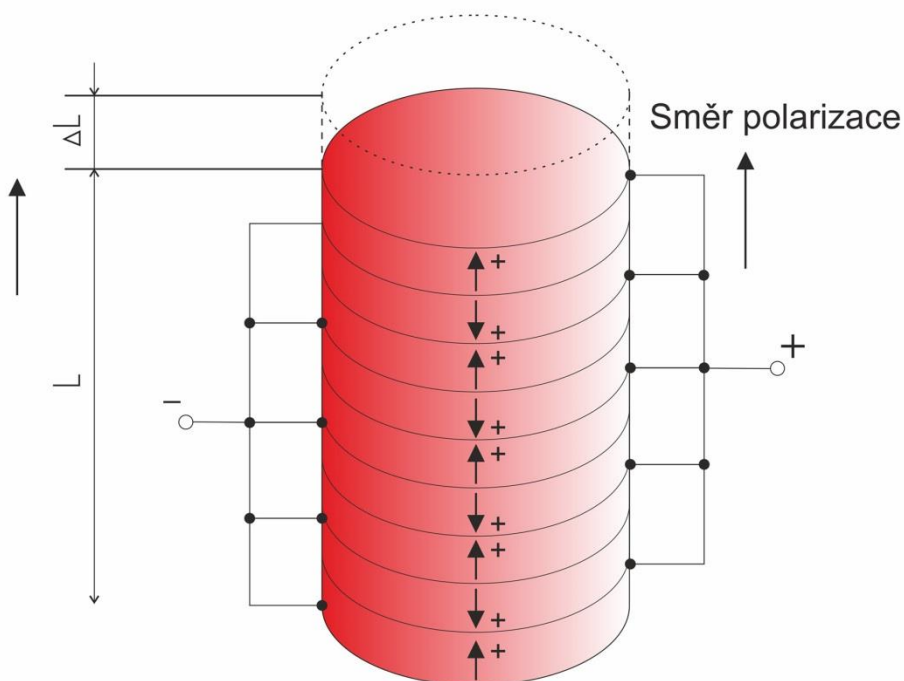
$$S = \frac{\Delta L}{L} = d_{ij}E, \tag{3.12}$$

Výsledné mechanické posunutí je:

$$\Delta L = d_{ij}U. \tag{3.13}$$

Mechanické posunutí je maximální (ΔL_{\max}) u nezatíženého aktuátoru, tedy aktuátoru, který na posouvajících se koncích není zatížen žádnou silou. Naopak je-li akční člen zatížen právě tak velkou silou, že posunutí je nulové, nazýváme tuto sílu silou blokovací F_b . Pro lineární piezoelektrické akční členy je charakteristické, že posunutí lze opakovat s velkou přesností, ale jedná se o posunutí velmi malé, v řádech nano až mikrometrů v závislosti na zvoleném materiálu. Zvětšení posunutí se nejčastěji docíluje řazením jednotlivých destiček za sebe, kdy výsledné posunutí je součtem jednotlivých posunutí destiček. [4]

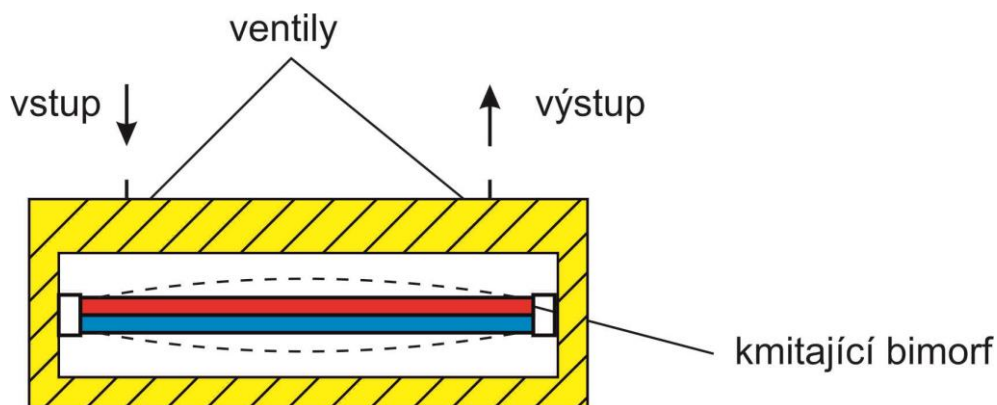
Těchto destiček o tloušťce v řádech desítek mikrometrů bývá zapojeno i několik desítek. Takto poskládaný typ lineárního aktuátoru se nazývá multilayer. Výhodou malé hodnoty l je, že lze docílit poměrně velké intenzity elektrického pole i při nízkém napětí. [4]



Obr. 3.2: Posunutí u aktuátorů typu multilayer je součtem posunutí jednotlivých destiček.

Využití je např. u řízení vstříku spalovacích motorů a leteckém průmyslu. [4]

Další možností zvětšení posunutí je užití tzv. uspořádání bimorfu. Využívá deformace bimetalového pásku vetknutého do piezomateriálu. Tímto způsobem se dosahuje posunutí až v řádech desetin milimetru. Vemí častou praktickou aplikací tohoto typu aktuátoru je mikropumpa pro lékařské účely. [4]



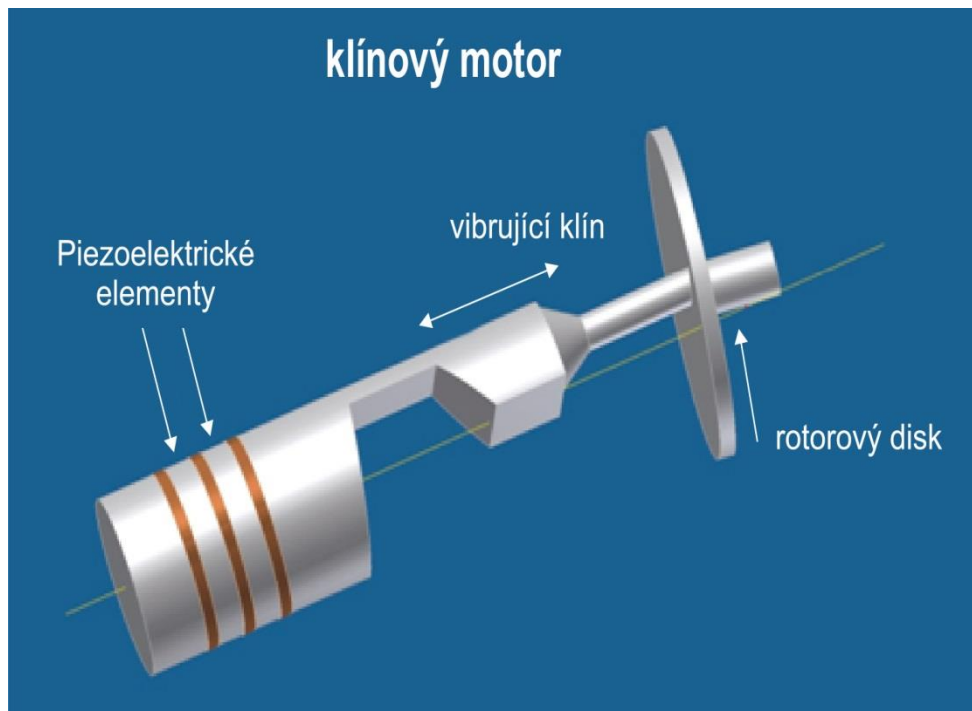
Obr. 3.3: Mikropumpa této konstrukce se používá např. v urologii. [4]

4 Ultrazvukové motory

4.1 Sashidův klínový motor

Klínový USM byl vyvinut T. Sashidou v Japonsku. Skládá se z Langevinova vibrátoru, hrotu, vibrační části a rotorového disku, jak je vidět na obr. K Langevinovu vibrátoru, na kterém jsou ukotveny piezoelementy, je připojen zdroj střídavého napětí. Podélná vibrace, která je výsledkem piezoeffektu, je dále zesílena hrotem. Část vibrátoru - hrot je pak poháněn ke kolizi s rotorovým diskem. Jelikož je konec části vibrátoru seříznut do klínu, který se jen málo liší od 90° a povrch rotoru je nakloněn ze svislé polohy přibližně o 6° , dochází ke krátkodobému pevnému spojení klínu s rotorem, které brání proklouznutí.[5] Výsledkem horizontálního pohybu vibrátoru je pohyb rotoru vertikální, za pomoci tření. Je zapotřebí poznamenat, že část vibrátoru koliduje s rotorem pouze, je-li v expanzi. Klínový nástavec opisuje eliptickou trajektorii. Rotor se pohybuje setrvačností při zpětném pohybu vibrátoru. Výsledkem je nepřímý pohyb. Klínový USM má výhody vysoké efektivity a vysoké rychlosti. Může dosahovat až 60% efektivity a až 3000 ot/min. Nicméně trpí krátkou životností. Dochází též k rapidní únavě kontaktních povrchů v důsledku tření. [5] [11]

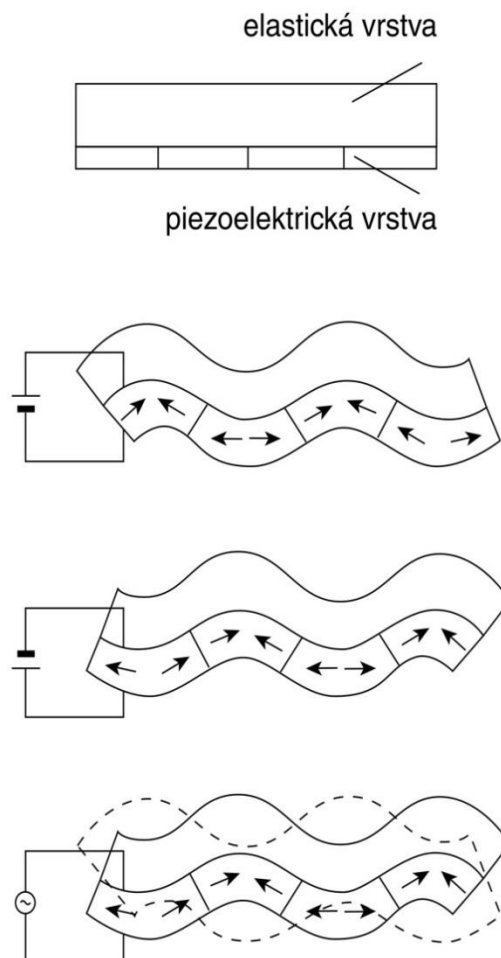
Když pan Sashida sestrojil v osmdesátých letech svůj první funkční prototyp klínového motoru, údajně s ním dosáhl fantastické účinnosti 87%. Bylo o to ovšem za cenu značného tření a rychlé tepelné destrukce. [11] Osa rotoru klínového motoru rovněž velice trpěla excentricky vedenými nárazy Langevinova vibrátoru. Jisté zlepšení životnosti se dosáhlo rovnoměrným rozmístěním několika vibrátorů rovnoměrně po obvodu rotoru. Poslední Sashidova verze klínového motoru disponovala 36 vibrátory. Tímto způsobem se zlepšila životnost, účinnost však poklesla. Přes veškerá vylepšení nebyl Sashida spokojen a již rok po představení prvního klínového motoru, přišel s verzí ultrazvukového motoru na principu postupné vlny. Dnes se používá většinou UM na principu postupné vlny, který má nižší účinnost (okolo 40%), ale životnost mnohem delší. Přesto se používá v aplikacích nevyžadujících dlouhodobý běh, či časté spouštění. Klínový motor by se dal aplikovat tam, kde se využije jeho vysoká účinnost a zároveň bude minimálně používán, Jeho praktické uplatnění se mi bohužel nepodařilo zjistit. [11]



Obr. 4.1: *Vibrace piezoelementů jsou vedeny ve směru osy motoru. Konec klínu pak v důsledku nárazu na rotorový disk opisuje eliptickou trajektorii.*

4.2 Motor na principu postupné vlny

Jednou z možností využití piezoelektrického jevu nepřímého ke generování pohybu nabízí piezomotor (ultrazvukový motor) využívající postupnou vlnu. Ultrazvukový motor na principu postupné vlny přeměňuje elektřinu na mechanický pohyb užitím piezoelektrického efektu. Obecně lze říci, že dvě střídavá napětí s posuvem fází generují časově proměnné zakřivení statoru. Takové zakřivení formuje postupnou vlnu podél povrchu statoru. Jelikož rotor je tlakovým diskem tlačěn ke statoru, je způsobena jeho rotace. TUSM (traveling wave ultrasonic motor) se vyznačuje vysoce přídržným točivým momentem. Je schopen velkého točivého momentu při malé rychlosti. Jeho reakce je rychlá, mnohem vyšší než u tradičního DC servomotoru.[11] Takový princip využívá například firma Canon ve svých přístrojích. Typický ultrazvukový motor používaný touto firmou pracuje s účinností 30%, 40 otáčkách za minutu, točivým momentem $M = 0,16 \text{ Nm}$ a dosahuje výkonu 1W.



Obr. 4.2: *Vznik stojaté vlny v důsledku přiložení střídavého napětí. [10]*

Jedním ze způsobů vzniku postupné vlny je například přivedením střídavého napětí na stator složený piezoelektrických elementů. Ve statoru se střídají úseky s navzájem opačně orientovanou polarizací. Na vrstvu piezoelektrickou je pevně napojena vrstva s elastického materiálu. Kdybychom přiložily elektrody se stejnosměrným konstantním napětím, došlo by k deformaci objemu statoru. Části orientované jedním směrem by se rozšířily, části orientované v opačném smyslu by se naopak zúžily. Přivedením střídavého napětí na elektrody se piezovrstva rozkmitá a tímto způsobem se na elastické vrstvě vytvoří stojatá vlna. [10]

Postupné vlny se docílí následujícím způsobem. Mějme stator složený ze dvou stejných na sebe přiložených piezovrstev. V každé této vrstvě budou střídající se úseky navzájem opačně orientované o délce odpovídající polovině vlnové délky $\frac{\lambda}{2}$. Dále první a

druhá piezovrstva budou vzájemně posunuty o čtvrt vlnové délky $\frac{\lambda}{4}$. Na elastické vrstvě si určíme bod A. Dále si zvolíme orientaci vrstev tak, že leží kolmo k ose z. Na elektrodu 1 přivedeme napětí

$$u_1(t) = U_1 \sin(\omega t), \tag{4.1}$$

jehož vlnová délka odpovídá námi požadované vlnové délce. Horizontální pohyb bodu A ve směru osy z pak lze popsat

$$u_z^{(1)} = U \sin(kx) \sin(\omega t), \tag{4.2}$$

Kde U je maximální kmit bodu A (je závislý na přiloženém napětí U_1), v je rychlost šíření bodu A ve směru osy x, $k = \omega/v$ je vlnové číslo.

Na elektrodu 2 přivedeme napětí

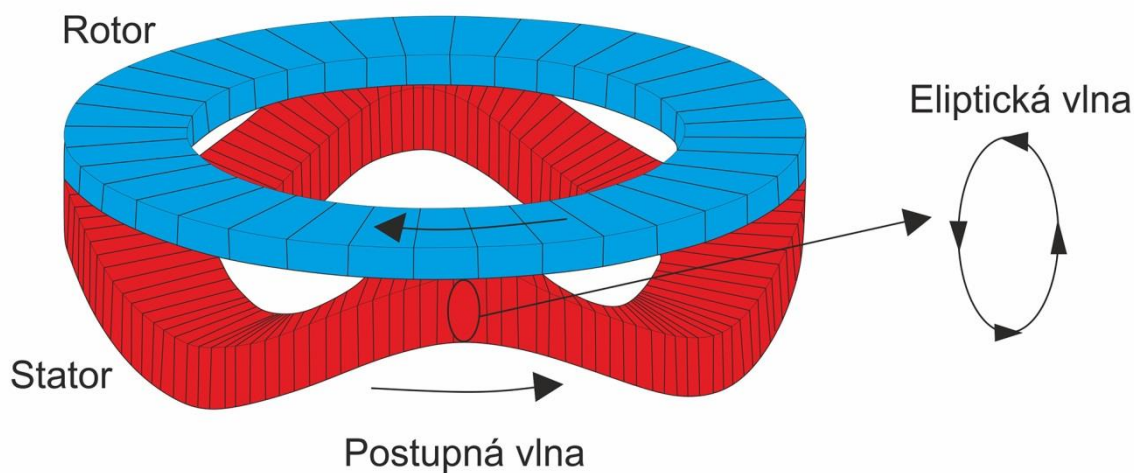
$$u_2(t) = -U_1 \cos(\omega t), \tag{4.3}$$

Posunutí povrchového bodu B pod elektrodou 2 popisuje rovnice

$$u_z^{(2)} = U \cos(kx) \cos(\omega t), \tag{4.4}$$

Složení obou deformací vzájemně fázově posunutých o $\frac{\lambda}{4}$ má již charakter postupné vlny.

$$U_z(x,t) = u_z^{(1)} + u_z^{(2)} = U \cos[k(x-vt)]. \tag{4.5}$$



Obr. 4.3 Vznik postupné vlny.[11]

Pro správnou funkci motoru je důležitý vznik ohybové vlny na povrchu statoru, respektive jeho elastické části. Bod na povrchu elastické části vykonává eliptickou trajektorii a tím vlastně posouvá rotor. Jak je vidět na obrázku. [5]

Postupnou vlnu je také možné vytvořit za použití pouze jedné vrstvy piezoelektrických destiček. Destičky jsou opět seřazeny za sebou se střídající se s opačnou polarizací. Délka jednoho úseku je znovu rovna $\frac{\lambda}{2}$. Piezoelektrické části jsou pevně spojeny s elastickou vrstvou. Elektrody jsou uspořádány tak, aby mezi nimi byla vzdálenost $\frac{\lambda}{4}$. Obě elektrody mají vlastní budič s vzájemně posunutou fází o 90° . Jelikož jsou měniče buzeny budiči s prostorovým a časovým posuvem, body styčných ploch měničů budou vykonávat eliptický pohyb se značným zdvihem. Tento pohyb umožní pohyb rotoru. [10]

4.2.1 Princip návrhu a vhodné materiály

Existuje více rozdílných druhů ultrazvukových motorů. Používají se oba základní typy tj. jak lineární, tak i rotační. Princip vibrujícího klínu se zdá být překonán. Používají se technologie na principu postupné vlny. K dispozici je také návrh dvojité vlny, kde vlnu generuje jak stator, tak rotor. Výsledná rychlost je pak určena rozdílem právě těchto dvou vln. V poslední době je věnována velká pozornost výzkumu a vývoji ultrazvukových motorů s více stupni volnosti.

Při volbě typu pohonu hraje roli řada faktorů. Ultrazvukové motory můžeme s úspěchem aplikovat tam, kde potřebujeme pohon velice přesný, tichý, s rychlou odezvou, značným točivým momentem při nízkých otáčkách. Prostorově dobře přizpůsobitelný. Výhodou ultrazvukového motoru může mimo jiné být, že jelikož využívá piezoelektrického efektu, nemá elektromagnetickou vazbu s okolím.

Při návrhu ultrazvukového motoru lze uplatnit některé obecné platné zásady návrhu elektrických strojů. Návrh takového typu stroje tedy znamená:

- určit rozměry,
- určit dovolené oteplení (všechny typy ultrazvukových motorů jsou, tepelně namáhány z důvodu značného tření),
- určit přípustné namáhání (elektrické i mechanické),

- určit konstrukční uspořádání (klínový, nebo prstencový s postupnou vlnou s jedním rotorem, nebo dvěma rotory),
- návrh vhodného budiče.

Při určování těchto znaků je třeba vycházet z vlastností materiálů, bez nichž by ultrazvukové motory nebyly možné. To znamená piezoelektrika. Charakteristickým znakem piezoelektrické látky je anizotropie. V praxi to znamená, že charakteristické vlastnosti dané látky jsou závislé na poloze bodu tělesa vzhledem k souřadnému systému. Jedná se především o vlastnosti piezoelektrické, dielektrické, elastické. Při určení rozměrů a předpokládaných výkonů je třeba vycházet především z vlastností těchto látek. Ultrazvukové motory se koncipují jako stroje velmi malé, kompaktní s minimem komponentů bez nutnosti převodového ústrojí. [13]

PCB motor je malý kompaktní ultrazvukový motor, který je integrován přímo do desky plošného spoje. V následující části bych se pokusil popsat jeho části, případně některé zásady jeho návrhu.

Části motoru:

- nosník s piezoelektrickými měniči,
- ovladač, napájení,
- rotor, či rotory.

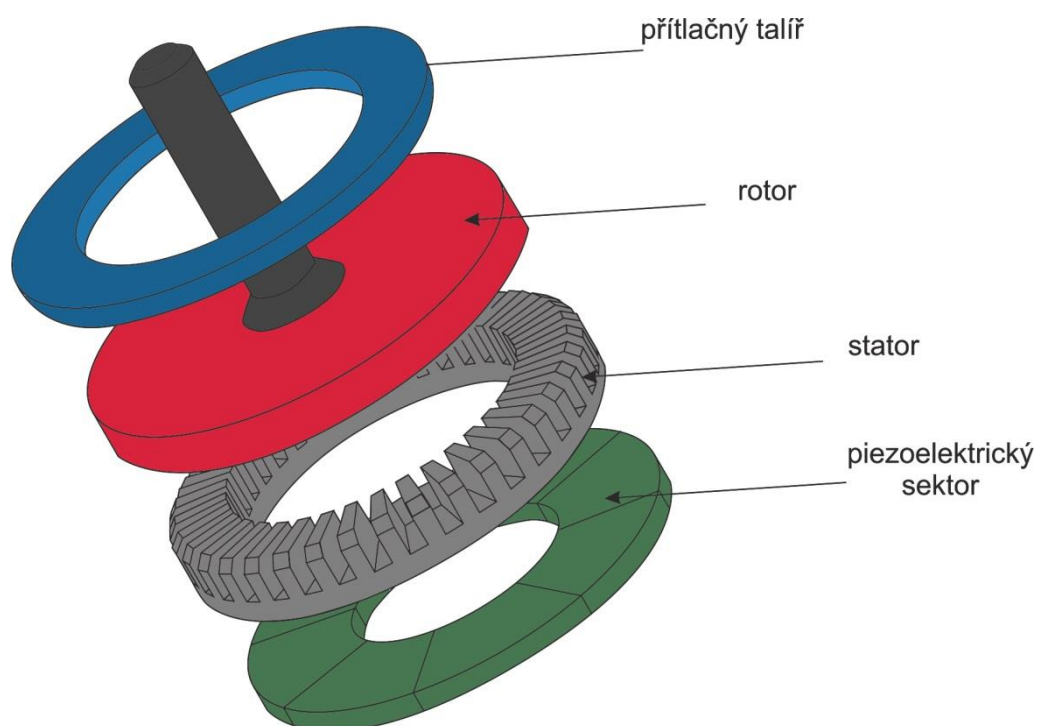
Stator

Pro návrh ultrazvukového motoru jsou ze všeho nejvíc podstatné parametry nosníku, tedy statoru. Jeho rozměry, tvar, druh použitého piezoelektrického materiálu a jeho rozmístění, počet můstků, kterými je přivedeno řídicí napájení, to všechno určuje vlastní rezonanci nosníku. Pokud se vlastní mechanická rezonance statoru shoduje s frekvencí budiče, dochází k maximální amplitudě postupné vlny s nejnižší impedancí a motor má nejlepší účinnost. [13]

Jako materiál nosníku se nejčastěji používá sklo, keramika, nebo epoxid. Můstky jsou ve většině případů tři a jsou jimi přivedeny vodiče pro dvě skupiny piezoelektrických akčních členů (kosinový a sinusový) plus jeden společný vodič. Piezoelektrické elementy jsou na stator připevněny lepením, případně pájením, a to buď z jedné strany, nebo po obou stranách rotoru. Druhá varianta zlepšuje účinnost motoru, ale je třeba použít dva rotory, které budou

přitlačeny z obou stran na stator. Konstrukce motoru s postupnou vlnou by mohla teoreticky být i lineárního uspořádání, ale v praxi se používají kruhové, či eliptické statory (a rotory) z důvodu eliminace problémů vzniklých působením odražené vlny u konečného statoru. Poloměr ohybu bývá o jeden řád větší, než vlnová délka postupné vlny. V praxi je stator opatřen drážkami (zuby), které mají za úkol zesílení vibrací a zlepšení kontaktu mezi státorem a rotorem.[13]

Nosník je spojen s ostatním zařízením můstky. Jak už bylo zmíněno, můstky jsou vedeny přívodní vodiče a vodič společný. Kromě toho slouží např. k eliminaci vibrací v místech, kde již nejsou vibrace žádoucí. [13]



Obr. 4.4: Konstrukce prstencového motoru s postupnou vlnou. [11]

Piezoelektrické elementy

Počet piezoelektrických elementů se volí v závislosti na předpokládané vlnové délce a obvodu statoru. Za vhodný počet P se považuje $P = 4nk$, kde n představuje poměr střední délky (obvod) statoru a vlnové délky postupné vlny, k značí počet piezoelementů v jedné podmnožině jedné ze dvou skupin (např. dvojice). Jejich rozmístění je podstatou motoru na bázi postupné vlny. Rozmístění je výše popsáno. Pro efektivní chod motoru je důležité, aby poměr obvodu statoru a počet vlnových délek byl celočíselný koeficient. Tímto způsobem se lze vyhnout snížení účinnosti motoru v důsledku interference vln. [13]

Rotor

U rotoru není podstatné, z jakého materiálu je vyroben, pokud nezkratuje piezoelementy. Je hlavní úlohou je přenos mechanického pohybu za pomoci tření. Tření, které vzniká mezi oběma částmi motoru, je umocněno přítlačnou pružinou. Na každých osm piezoelementů se počítá s minimální přítlačnou silou 0,6 N. Mezi rotor a stator se většinou vkládá plstěná třecí páska. Ta má za úkol jednak zvyšovat smykový koeficient a za druhé chránit povrch rotoru a tím prodlužovat životnost celého strojku. Smykovým třením se tudíž opotřebují v první řadě tato páska, kterou lze snadno a levně vyměnit. [13]

Tabulka 4.1: Rychlosti šíření mechanických vzruchů v různých materiálech:

materiál	$\rho \cdot 10^{-3}$ [kg.m ⁻³]	c [m.s ⁻¹]
ocel feritická	7,80	5920
ocel austenit	8,03	5500
litina	7,20	3500-5500
hliník	2,70	6320
měď	8,90	4700
mosaz	8,10	3830
plexisklo	1,18	2680
polystyrén	1,06	2350
sklo	2,50	5660

[12]

Na statoru se šíří postupná vlna, která v důsledku tření uvádí do pohybu rotor. Rezonanční frekvence f_0 závisí kromě použitých materiálů také na geometrickém rozměru statorového pásu a jeho modulu pružnosti, které jsou silně závislé na teplotě. Unášivá rychlost rotoru je závislá na třecí síle, jenž je rovněž závislá na teplotě. Z těchto důvodů je třeba budící zdroj vybavit spolehlivými regulátory frekvence a optimální rychlosti. [11]

U PCB motoru je důležitou veličinou rozměr. Při návrhu tohoto motoru budu postupovat odlišně od návrhu elektromagnetického motoru. Mějme rozměr 10 mm na desce plošného spoje. Pro tento rozměr se pokusím navrhnout UM s postupnou vlnou a určit jakých bude dosahovat parametrů.

Mikromotor s vnějším průměrem 8 mm, kterému odpovídá vnitřní průměr 5 mm. Jak už bylo výše zmíněno, je výhodné navrhovat stator pokud možno tak, aby poměr jeho střední délky obvodu a vlnové délky byla celočíselná konstanta. Pro navrhovaný motor je střední poloměr $r_s = 3,250$ mm, kterému odpovídá střední obvod 20.419 mm. Lze odhadnout, že v oblasti nejčastěji používaných frekvencí v oblasti ultrazvukových motorů na principu postupné vlny, to znamená ve frekvenční oblasti 20 – 100 kHz, bude tato celočíselná konstanta nabývat hodnot 3,4, nebo 5. [14]

Vybereme si například čtyř vlnový mód. Potom vlnová délka $\lambda = 5,1$ mm a $L = \frac{\lambda}{2} = 2550$ μm . Pokusíme se spočítat rezonanční frekvenci nosníku o vnějším průměru 8 mm, vnitřním průměru 5 mm, který je vyroben z ocelového pásku o výšce 300 μm , na kterém jsou ze spodní strany naneseny tenké filmy PZT (PTS-1195) o výšce 188 μm . Úhlovou rychlost ω lze pro model tenkého kruhového disku vyjádřit rovnicí:

$$\omega = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E.I}{\rho A}}, \tag{4.6}$$

kde ρA znamená hustotu materiálu vztaženou na jednotku délky,

$$\rho A = \rho A_{PZT} + \rho A_{oceli} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right], \tag{4.7}$$

$$L = \frac{\lambda}{2} = 2550 \mu\text{m}, \tag{4.8}$$

E značí Youngův modul pružnosti, I je moment setrvačnosti (pro spojitě hmoty).

$$E.I = c_p b \int_{PZT} z^2 dz + c_o \int_{zákl} z^2 dz. \tag{4.9}$$

Po dosazení ρ oceli 7860 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ a ρ PZT 7600 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ dostaneme společnou hustotu nosníku vztaženou na jednotku délky $2,32 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$,

Dále dosadíme hodnoty c_p pro PZT = 70 GPa a c_o oceli 200 GPa.

Šířka statoru je $b = 3$ mm. pro potřeby tohoto výpočtu se počítá výška ocelové základny 300 μm , pro PZT se počítá výška 188 μm . [14] Po dosazení do rovnice dostaneme výsledek $E.I = 3,39 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^2$. Dosadíme-li vypočtené hodnoty do rovnice:

$$\omega = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E.I}{\rho A}}, \tag{4.10}$$

dostaneme úhlovou rychlost $5,8 \cdot 10^5$ rad/s, která odpovídá frekvenci 92,3 kHz. [14]

Ze zvoleného přiměřeného napětí, deformační konstanty, známého počtu pizelementů jsme pak schopni vypočítat mechanickou práci vykonanou piezoelementy a známe-li frekvenci, tedy i výkon. Pomocí Coupling faktoru vypočteme elektrický příkon statoru. Z předpokládané účinnosti pak možný výkon stroje.

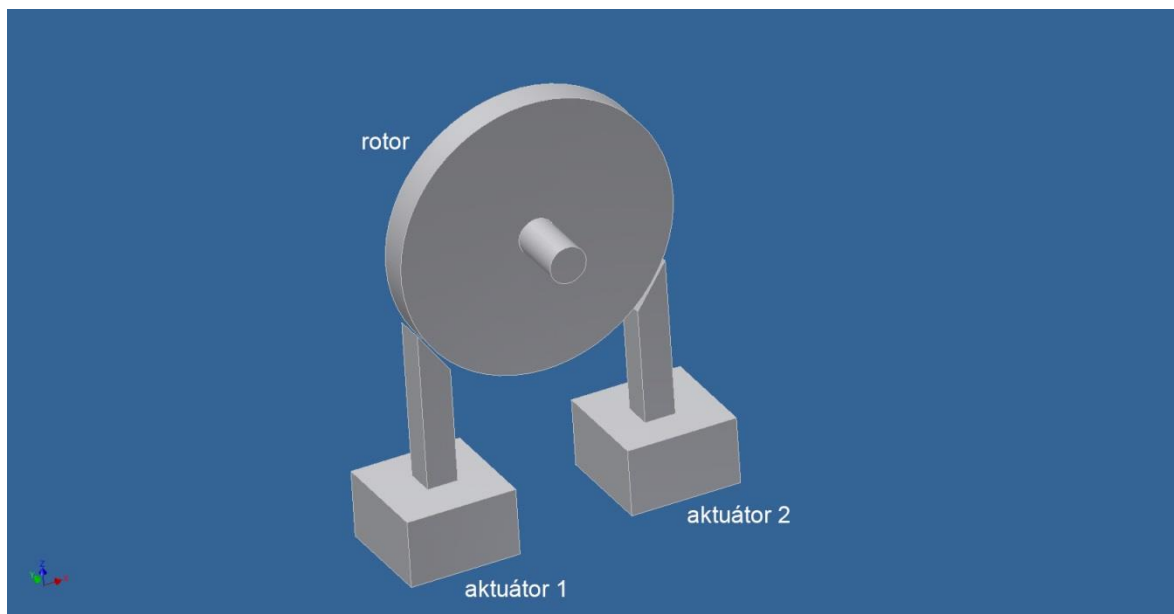
Je třeba mít na zřeteli, že zde existují jistá omezení, která není možné v žádném případě překročit. Například při mechanickém namáhání nelze překročit mez pevnosti, která je pro piezokeramické materiály 5-6 MPa. Omezení v tahu je ale již jen 0,2-0,3 MPa.[5] Dále jsou zde omezení maximální intenzitou elektrického pole, specifická pro daný použitý materiál. Dále omezení únavová v důsledku překročení kritických vibrací. Obecně se má za to, že výkonnostní limit ultrazvukových motorů se pohybuje okolo 100W. Plošná hustota energie přenášená vibracemi PZT se uvádí asi 10^{-2} w/cm². To je pětinašobek oproti elektromagnetickým strojům. [5]

5 Trendy ve vývoji ultrazvukových motorů

Již v roce 1942 si nechali zaregistrovat pánové Williams a Braun první patent na motorek na bázi piezoelektrického jevu. Jejich vynález se skládal z nosníku na jehož stranách byly vylepeny piezokeramické materiály. Díky o devadesát stupňů posunutému fázovému buzení při provozní frekvenci 60 Hz byly v nosníku stimulovány ohybové vibrace, které generovaly na hrotu zařízení pohyb. Ale vzhledem k tomu, že nebyl k dispozici žádný vhodný materiál, ale jen křemičité krystaly, nenašel tento motor praktické uplatnění. [11]

Za primitivnější formou piezoelektrického (ultrazvukového) motoru lze považovat modely na základě piezoelektronických rezonátorů, vyvinutých mezi roky 1970 a 1972 nezávisle na sobě firmami Siemens a Matsushita Electrical Industries. Jednalo se o lineárně poháněné mechanismy a krokové motory, které jako zdroj pohybu využívaly právě piezoelektrických rezonátorů. [11]

V roce 1973 byl H. V. Barthem z IBM navržen jiný motor využívající piezoelektrického efektu. Tento byl poháněn vibracemi o ultrazvukové frekvenci. Rotor přiléhá na dva hroty, které vibrují následkem reakce piezoelektrických elementů. Rotor se začíná otáčet následkem tření mezi kontaktními plochami. [11]



Obr. 5.1: Motor navržený H. V. Barthem. [11]

V roce 1978, V. A. Gromakovskij a kolektiv navrhli podobný ultrazvukový motor využívající Langevinův vibrátor (vyvinut francouzským fyzikem Paulem Langevinem v roce 1917). AC zdroj připojený na elektrody je příčinou oscilace hrotů. Vibrace jsou pak převáděny na rotační pohyb, podobně jako u Barthova motoru. Novou myšlenku zde bylo využití vlastní mechanické rezonanční frekvence a jí přizpůsobené frekvence budiče. Bohužel tento motor nenašel žádné praktické využití. Také trpěl několika nedostatky, především změnami v závislosti na zahřívání a s tím spojeným rychlým poklesem výkonu. [11]

První použitelné UM byly zkonstruovány japonským technikem Sashidou. V roce 1981 klínový motor a 1982 motor na principu postupné vlny, které jsou výše popsány. Firma Canon je jedna z mála firem majících značné zkušenosti s UM. Pracuje již od sedmdesátých let na vývoji a hlavně také na sériové výrobě ultrazvukových motorů. [11] Její výrobky se vyznačují přesným a tichým chodem zoomu, který je poháněn kroužkovým UM s postupnou vlnou. Firma Samsung v roce 2006 poprvé integrovala ve svém mobilním telefonu SGH-D900 řízený optický zoom a automatickou zaostřovací jednotku ovládaný pomocí UM.[11]

V současné době se UM využívají především:

- v kamerové technice (přesný a tichý pohyb zoomu)
- v automobilovém průmyslu (stahování skel, nastavení zrcátek)
- v oblasti kancelářské techniky (podavače tiskáren, scannerů)
- v technice pro medicínské účely (např. mikropumpa v urologii)

Tabulka 5.1: Oblastí využití UM a porovnání rychlostí a síly

Oblast využití	Rychlost (m/s)	Síla (N)
CD-ROM paměťová technika	0,1 – 1	0,1 -1
Hračky	0,05 – 0,1	0.1 – 0,5
Robotika	, 0,005-0,05	0.1 - 10
Tiskárny, scannery	0,5 – 1	1 - 10
Prototypy (např v automobilovém průmyslu, otvírání střešního okna, nastavení volantů)	0,5 – 1	10-100

[11]

Mnoho významných firem investuje ročně mnoho set milionů dolarů do výzkumu a vývoje nových technologií. Jak už bylo výše zmíněno za hranici výkonu UM se považuje výkon asi 100W. Tím je i udaný směr, kterým se v budoucnu bude ubírat jejich vývoj. Tím mám na mysli dosažení co největších výkonů a za současné minimalizace rozměrů. Předpokládá se i nadále rozvoj pro účely lékařství, kde především díky schopnosti přesného polohování je možné využití při invazivních metodách např. v neurologii. Zejména v kombinaci s řídicími jednotkami na hranici umělé inteligence se dá předpokládat využití např. ve vesmírném výzkumu, kdy by systémy mohli být stroje nejen samodiagnostické, ale i samoopravitelné, tak aby byly schopny dlouhodobě fungovat i bez lidského zásahu.

6 Závěr

V práci jsem se pokusil vyjasnit některé pojmy a utřídit mechatronické akční členy. Podle povahy řídicí informace je lze rozdělit do čtyř hlavních skupin na elektromechanické, pneumatické, hydraulické a speciální. V mechatronice je kladen důraz na neoddělitelnost řídicí a mechanické složky, a to již ve fázi vývoje. Osobně se domnívám, že je rozdíl, budeme-li navrhovat systém využívající elektromechanický hybný princip, anebo silové účinky piezoelektrických komponentů. Zde vycházím z předpokladu, že elektromechanické akční členy využívají elektrické motory, které díky své dlouhé tradici vývoje již dosáhli takového stupně dokonalosti, že další výzkum z mechanického hlediska již zřejmě nepovede k nějakým převratným výsledkům. Jiná situace je však v oblasti motorů založených na principu smart materiálů, mezi které můžeme zařadit i UM. První skutečně funkční UM byl zkonstruován v roce 1981. Jednalo se o konstrukci klínového motoru, která byla zanedlouho překonána typem UM s postupnou vlnou. UM mají mnoho předností. Poměrně velký výkon při malých rozměrech, přesnost posunu, či natočení, tichý chod. Nevýhodou může být složitost jejich matematického modelování. Pro zjednodušený návrh lze využít některých obecně platných empiricky nabytých zkušeností (např. poměr délky a šířky aktivní části aktuátoru, počet piezoprvků na jednu vlnovou délku atd.). UM se neustále zdokonalují a v současné době se prototypy již přibližují své výkonové hranici.

Literatura

- [1] MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. *Elektromagnetické aktuátory*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 120 s. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [2] SASHIDA, Toshiiku a Takashi KENJO. *An introduction to ultrasonic motors*. New York: Oxford University Press, 1993, xi, 242 p. ISBN 01-985-6395-7.
- [3] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 182 s. ISBN 80-704-3422-8.
- [4] MAIXNER, Ladislav. *Mechatronika: učebnice*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2006, ix, 280 s. ISBN 80-251-1299-3.
- [5] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [6] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská s. ISBN 80-7043-422-8.
- [7] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001, 86 s. ISBN 80-214-1978-4.
- [8] prof.Ing.Daniel Mayer,Dr.Sc,2007. *Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (1)* [online]. Praha: Elektro [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36434.pdf>
- [9] prof.Ing.Daniel Mayer,Dr.Sc,2007. *Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (2)* [online]. Praha: Elektro [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36434.pdf>
- [10] Ing.Pavel Rydlo,PhD. a doc.Ing.Aleš Richter,CSc. 2004. *Piezoelektrické motory* [online]. Praha: Elektro [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/piezoelektricke-motory--14253>
- [11] MRACEK, Maik. 2011. *Untersuchung des dynamischen Verhaltens gekoppelter piezoelektrischer Ultraschallmotoren mit Stoßkontakt* [online]. Hannover [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://d-nb.info/1036423301/34>. Disertační práce. Fakultät Maschinenbau der Universität Paderborn. Vedoucí práce Prof.Dr.Ing Jorg Wallaschek

- [12] *Ultrazvukové vlnění* [online]. In: . [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: if.vsb.cz/Studium/FS/Ultrazvukove_vlny.doc
- [13] JANEČEK, Aleš. 2014. *Řízení PCB motorů* [online]. Praha [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/21798/F3-BP-2014-Janecek-Ales-prace.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing.Lubor Jirásek CSc.
- [14] FLYNN, Anita. 1997. *Piezoelectric ultrasonic micromotors* [online]. In: . Artificial Intelligence Laboratory [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <ftp://publications.ai.mit.edu/ai-publications/pdf/AITR-1634.pdf>
- [15] LOS, Jaroslav a Jiří TŮMA. *Simulační model piezoelektrického akčního členu* [online]. In: . VŠB Technická univerzita Ostrava [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB11/prispevky/076_los.pdf