



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## MAGNETOSTRIČKNÍ MATERIÁLY PRO MECHATRONICKÉ APLIKACE

MAGNETOSTRICTIVE MATERIALS FOR MECHATRONICS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslava Rusková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka:	<b>Miroslava Rusková</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Magnetostriční materiály pro mechatronické aplikace

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Magnetostrikce je fyzikální vlastnost materiálu, kdy při mechanické deformaci vzniká změna magnetického pole. Magnetostriční materiály stále častěji pronikají do inženýrské praxe a to nejen jako součásti senzorických jednotek. Cílem práce je vypracovat jejich přehled a využití, případně možnosti matematického modelování jejich chování.

### Cíle bakalářské práce:

1. Popište magnetostriční jev a jeho využití.
2. Vypracujte rešerši dostupných materiálů s magnetostričními vlastnostmi.
3. Vypracujte rešerši aplikací s magnetostričními materiály.
4. Analyzujte možnosti matematického popisu chování těchto materiálů.

### Seznam literatury:

Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures, Springer, 1999.

Olabi, A.G., Grunwald, A.: Design and application of magnetostrictive materials, Materials & Design, Volume 29, Issue 2, 2008, pp. 469-483.

Tan, X. and Baras, J.S.: Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators, Automatica, vol. 40, no. 9, pp. 1469–1480, Sep. 2004.

Jia, Z., Wang, F., Zou, J., Liu, H.: Principle and application of giant magnetostrictive sensors and actuators (2013) Zhendong Ceshi Yu Zhenduan/Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 33 (4), pp. 539-546.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

-----  
prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

-----  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan  
fakulty

## **Abstrakt**

Cieľom práce je vypracovať prehľad a využitie magnetostrikčných materiálov a matematický popis ich chovania. Magnetostrikcia je fyzikálna vlastnosť materiálu, ktorá sa vyskytuje vo väčšine feromagnetických materiáloch a vedie k mnohým účinkom v týchto materiáloch. Magnetostrikčné materiály sa stále častejšie vyskytujú v rôznych odvetviach inžinierstva.

## **Abstract**

The aim of this work is to outline and use or application of magnetostrictive materials and possibilities of mathematical modeling their behavior. Magnetostrictive is the physical character of the material, occurs in the most ferromagnetic materials and leads to many effects. Magnetostrictive materials are more often used to in various branches of engineering.

## **Kľúčové slová:**

Magnetostrikcia, magnetostrikčný jav, Villariho jav, Wiedemannov jav, Terfenol-D, hysterézia, aktuátor, bezkontaktný snímač krútiaceho momentu, energy harvesting.

## **Key words:**

Magnetostriction, magnetostrictive phenomen, Villari effect, Wiedemann effect, Terfenol-D, hysteresis, actuator, magnetostrictive contactless torque sensors, energy harvesting

RUSKOVÁ, Miroslava. *Magnetostrikční materiály pro mechatronické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 46 s. Vedúci bakalárskej práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, PhD.

### **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu „Magnetostrikční materiály pro mechatronické aplikace“ vypracovala samostatne pod vedením vedúceho práce a v zozname som uviedla všetky literárne a odborné zdroje.

Brno .....

.....

Miroslava Rusková

## **Pod'akovanie**

Rada by som poďakovala vedúcemu bakalárskej práce pánu doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, PhD. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnety k návrhu práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	10
<b>2</b>	<b>Popis magnetostrikcie</b> .....	11
<b>3</b>	<b>Magnetostrikčné javy</b> .....	14
3.1	<i>Jouleov jav</i> .....	14
3.2	<i>Villariho jav</i> .....	14
3.3	<i><math>\Delta E</math>- jav</i> .....	14
3.4	<i>Wiedmannov jav</i> .....	15
3.5	<i>Matteucciho jav</i> .....	15
3.6	<i>Barretiho jav</i> .....	15
3.7	<i>Nagaoka-Honda jav</i> .....	15
3.8	<i>Popis najpoužívanejších javov</i> .....	15
<b>4</b>	<b>Magnetostrikčné materiály</b> .....	17
4.1	<i>Využitie</i> .....	17
4.2	<i>Výroba Terfenol-D</i> .....	20
4.3	<i>Magnetomechanický koeficient väzby/coupling a magnetostrikční koeficient</i> .....	20
4.4	<i>Youngov modul pružnosti</i> .....	22
4.5	<i>Faktor kvality</i> .....	22
4.6	<i>Permeabilita</i> .....	23
4.7	<i>Blokovacia sila</i> .....	24
<b>5</b>	<b>Aplikácie magnetostrikčných materiálov</b> .....	26
5.1	<i>Najrozšírenejšia aplikácia magnetostrikčných materiálov v sensorike</i> .....	26
5.2	<i>Reakčný hmotnostný pohon</i> .....	27
5.3	<i>Štandardný aktuátor</i> .....	28
5.4	<i>Lineárny motor založený na Terfenole-D</i> .....	28
5.5	<i>Ultrazvukový menič</i> .....	29
5.6	<i>Elektro-hydraulický aktuátor</i> .....	30
5.7	<i>Bezdrôtový lineárny mikro-motor</i> .....	31
5.8	<i>Magnetostrikčné bezkontaktné snímače krútiaceho momentu</i> .....	31
5.9	<i>Energy harvesting vibrácií pomocou magnetostrikčných materiálov</i> .....	33
<b>6</b>	<b>Analýza matematického popisu chovania magnetostrikčných materiálov</b> .....	36
6.1	<i>Energy harvesting na základe magnetostrikčného javu</i> .....	36
6.2	<i>Matematický popis energy harvesting zariadenia</i> .....	36
<b>7</b>	<b>Záver</b> .....	40
	<b>Literatúra</b> .....	41
	<b>Zoznam symbolov, veličín a skratiek</b> .....	43

<b>Zoznam obrázkov .....</b>	<b>45</b>
<b>Zoznam tabuliek .....</b>	<b>46</b>

## 1 Úvod

Dnešná doba zo sebou prináša takmer každý deň nové inovácie, čo postrehneme hlavne v oblasti elektroniky. Nové objavy priniesli aj nové materiály používané hlavne v senzorike. Takéto materiály sú práve magnetostrikčné, ktorých popis, druhy, aplikácie a matematický popis je obsahom mojej práce. Magnetostrikčné materiály používané v snímačoch sa vyznačujú svojou odolnosťou v prostredí so vyšším tlakom, zvýšenou prašnosťou a vlhkosťou, sú stabilnejšie a presnejšie ako iné snímače.

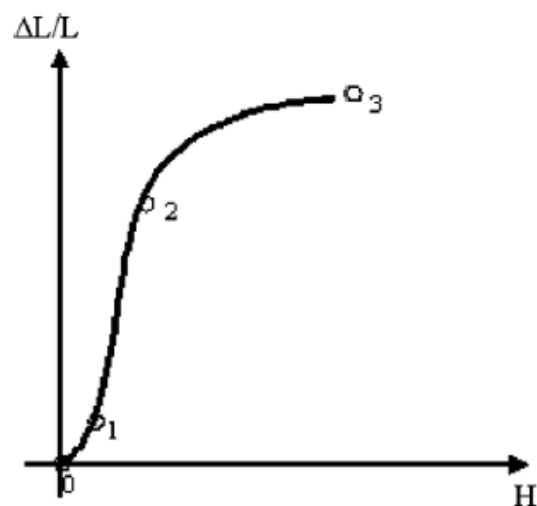
Základom týchto materiálov je fyzikálna vlastnosť, magnetostrikcia. Magnetostrikcia spája elasticke, elektrické, magnetické a v niektorých situáciách aj teplotné vlastnosti materiálu. V dnešnej dobe budí veľký záujem použitie magnetostrikcie v priemysle, senzorike, aktuátoroch, robotike a v mnohých iných odvetviach. (Magnetostrikcia je napr. čiastočne zodpovedná za „bručanie“ transformátorov elektrického napätia). Pri pôsobení magnetického poľa na magnetostrikčné materiály nastane zmena v štruktúre materiálu, začne preorientácia ich domén v smere magnetického poľa. Správanie materiálov popisuje niekoľko javov, ktoré sú vysvetlené v kapitole 3. Najznámejšie sú Villariho, Joulov a Wiedemannov jav.

Za magnetostrikčné materiály považujeme všetky feromagnetické kovy a ich zliatiny. Tieto materiály sa posudzujú podľa ich vlastností ako sú Youngov modul, permeabilita a koeficienty ako napríklad magnetostrikčný a faktor kvality. Najpoužívanejšie materiály vyvinuté špeciálne pre aplikácie s magnetostrikčnými materiálmi sú Terfenol-D, Metglas a Galfenol. Každý z týchto materiálov má iné prednosti a používa sa pre iný účel.

Magnetostrikčné snímače sú používané hlavne pre zistenie polohy, meranie vibrácií, rýchlosti i zistenie výšky vodnej hladiny. Nachádzajú sa v lisoch, mobilných hydraulických systémoch, regulačných ventiloch parných turbín a dokonca vo vodných a veterných elektrárnach. A práve niektoré aplikácie sú bližšie objasnené v nasledujúcom texte.

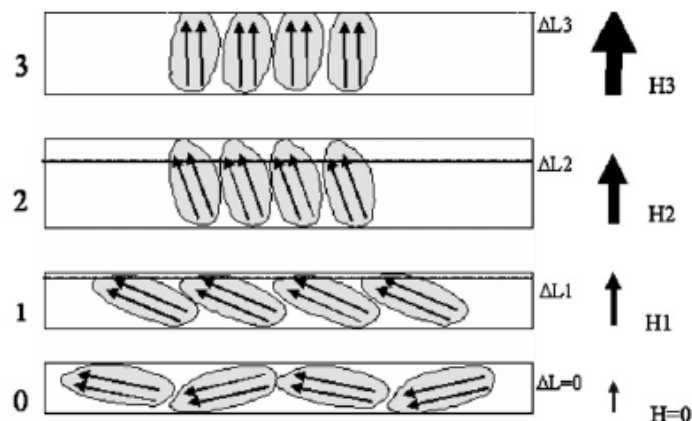
## 2 Popis magnetostrikcie

Magnetostrikcia je schopnosť niektorých feromagnetických materiálov pod vplyvom magnetického poľa meniť svoje rozmery alebo naopak, pri deformácií vykazovať magnetizáciu. Jav bol prvýkrát popísaný v roku 1842 anglickým fyzikom Jamesom Jouleom pri pozorovaní vzorky nikla. Joule skúmal materiál s negatívnou magnetostrikciou, ale od tej doby boli objavené už aj materiály s pozitívnou magnetostrikciou. Takéto materiály sa nazývajú magnetostrikčné (ďalej len MsM). Pôsobenie kladnej a zápornej magnetostrikcie sa prejavuje podobným spôsobom. Zmena v dĺžke je výsledok rotácie malých magnetických domén. Táto rotácia a zoradenie domén spôsobuje vnútornú deformáciu v štruktúre materiálu. Deformácia v štruktúre materiálu vedie k jeho predĺženiu (v prípade pozitívnej magnetostrikcie) v smere magnetického poľa. V priebehu procesu predlžovania je prierez redukovaný tak, že sa objem udržiava takmer konštantný. Veľkosť objemovej zmeny je tak malá, že ju v prípade normálnych prevádzkových podmienok možno zanedbať. Použitie silnejšieho magnetického poľa vedie k silnejšiemu a výraznejšiemu preorientovaniu domén [1] v smere magnetického poľa. Keď sa všetky magnetické domény stanú totožné so smerom magnetického poľa, je dosiahnutý bod nasýtenia. Obr. 2.1 znázorňuje závislosť zmeny dĺžky na pôsobení magnetického poľa. Jednotlivé úseky 0 až 3 predstavujú postupnú orientáciu domén.



**Obrázok 2.1:** Predĺženie v závislosti na intenzite magnetického poľa

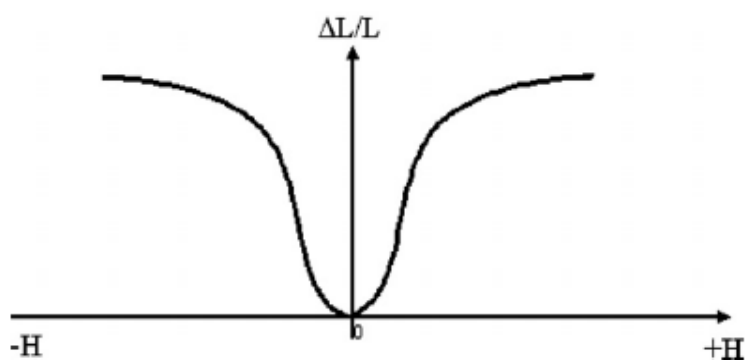
Domény sú schematicky znázornené na obr. 2.2. V oblasti medzi 0 a 1 je použité magnetické pole s malou intenzitou, takže magnetické domény nevykazujú takmer žiadnu spoločnú orientáciu s magnetickým poľom. Výsledné predĺženie závisí na tom, z akého MsM je daná vzorka vyrobená. V oblasti medzi 1 až 2 je v ideálnom prípade takmer lineárna závislosť medzi predĺžením a magnetickým poľom. Väčšina zariadení je navrhnutá práve pre prevádzku v tejto oblasti, kvôli jednoduchej závislosti, ktorá je ľahko opísateľná a správanie materiálu je ľahko predvídateľné. Nad bodom 2 sa závislosť stáva nelineárna, čo zväčša spôsobujú magnetické domény, ktoré sa otáčajú so smerom magnetického poľa. V bode 3 je stav nasýtenia, ktorý zabraňuje ďalšiemu zväčšeniu pretvorenia.



**Obrázok 2.2:** Schematické znázornenie orientácie domén

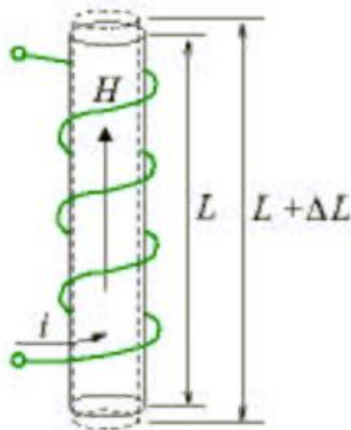
Správanie MsM [1] je v rôznych aplikáciách zložitá, pretože meniace sa podmienky počas prevádzky spôsobujú zmeny vo vlastnostiach materiálu.

Obr. 2.3 ukazuje idealizovaný vzťah medzi zmenou dĺžky v závislosti na pôsobiacom magnetickom poli. Keď je nastavené magnetické pole v opačnom smere, pole je chápané ako negatívne, [2] ale negatívne pole produkuje rovnaké predĺženie v magnetostriktívnom materiály ako pozitívne pole. Tvar krivky pripomína motýľa a preto sa krivky nazývajú ako motýľie krivky.



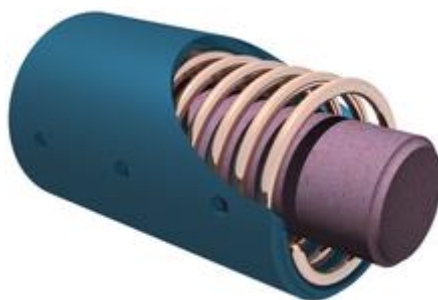
**Obrázok 2.3:** Predĺženie v závislosti na symetrickom magnetickom poli

MsM vyvíja veľké mechanické deformácie, keď naň pôsobí vonkajšie magnetické pole. Ako bolo popísané, tento jav je pripisovaný rotáciám malých magnetických domén v materiáli, ktoré sú náhodne orientované, keď materiál nie je vystavený vplyvu magnetického poľa. Orientácia týchto malých domén [3] pomocou pôsobiaceho magnetického poľa vytvára pole ťahu. Materiál sa začne predlžovať ako je prevedené na obrázku 2.4, kde na tyčku z MsM materiálu pôsobí magnetické pole vytvorené cievkou do ktorej vstupuje jednosmerný prúd  $i$ .



**Obrázok 2.4:** Predĺženie niklovej tyče pôsobením magnetického poľa

Najjednoduchší mechanizmus pre pochopenie princípu správania MsM je na obr. 2.5. Ak do dutiny cievky vložíme magnetostrikčnú tyč a do cievky zapojíme jednosmerný elektrický prúd, vytvorí cievka vo svojej dutine magnetické pole. Tyč, ktorá je umiestnená v dutine sa zmagnetizuje [11] a magnetizácia niklovej tyče spôsobí zmenu jej dĺžky.



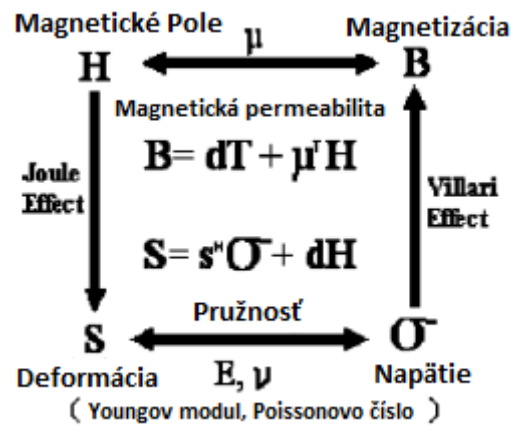
**Obrázok 2.5:** Niklová tyč vložená do dutiny cievky

MsM majú široké využitie vo výrobe efektívnych aktuátorov, pretože majú unikátne charakteristiky spojením kvalitných magneto-mechanických vlastností a vysokú stabilitu. Avšak, MsM ako jedny z inteligentných materiálov, majú silne nelineárne vlastnosti ako hysterézia a nasýtenie magnetostrikciou. Tieto nelineárne vlastnosti majú výrazný vplyv na presnosť a prispôbenie základných zákonov pre magnetostrikčné aktuátory.

Tepelné účinky, ktoré existujú v magnetostrikčných mechanizmoch, sú považované za vedľajšie, avšak ovplyvňujú presnosť regulácie vibrácií. Preto bolo nutné pre dynamickú analýzu modelov [4] spojiť magnetické, mechanické a tepelné účinky a následne ich popísať. Pre realizáciu vysokej presnosti pri prevádzke magnetostrikčných aktuátorov, má dôležitú úlohu použitie zákonov pre nelineárne modely.

### 3 Magnetostrikčné javy

Keď sú umiestnené kryštály feromagnetických materiálov v magnetickom poli tak sa menia ich tvary. Tento jav sa nazýva magnetostrikcia. Toto sa vzťahuje k rôznym iným fyzikálnym javom. Magnetostrikcia je vratná zmena energie medzi mechanickou a magnetickou formou. Schopnosť premeny množstva energie z jednej formy na druhú umožňuje použitie MsM [1] v aktuátoroch a senzorových aplikáciách. Obr. 3.1 predstavuje rôzne fyzikálne efekty ktoré sa vzťahujú k magnetostrikčným javom.



Obrázok 3.1: Magnetostrikčné javy

#### 3.1 Jouleov jav

Najjednoduchší jav, ktorý sa vzťahuje k magnetostrikcii je Jouleov jav. Jedná sa o expanziu pozitívnym magnetickým poľom alebo o kontrakciu negatívnym magnetickým poľom, [1] feromagnetickéj tyčky vo vzťahu k pozdĺžnemu magnetickému poľu. Tento jav je hlavne používaný v magnetostrikčných aktuátoroch. Pri absencii magnetického poľa sa tvar vzorky vráti do svojich pôvodných rozmerov.

#### 3.2 Villariho jav

Ďalší rozšírený jav vzťahujúci sa k magnetostrikcii je Villariho jav. Tento efekt je založený na pôsobení mechanického napätia na materiál, čím sa zmení hustota magnetického toku, ktorá prúdi cez materiál a ako výsledok je vytvorenie magnetického poľa. Zmena hustoty toku môže byť zaznamenaná snímacou cievkou, [1] ktorá je priamo úmerná použitému napätiu. Villariho efekt je reverzibilný a používa sa v senzorových aplikáciách.

#### 3.3 $\Delta E$ -jav

$\Delta E$ -jav je ďalší jav vzťahujúci sa k magnetostrikcii. Výsledkom je zmena modulu pružnosti pôsobením magnetického poľa. [1] Vzhľadom na zmenu modulu pružnosti dôjde k zmene v rýchlosti šírenia zvuku vo vnútri magnetostrikčných materiálov.

### 3.4 Wiedmannov jav

Ďalším efektom je Wiedemannov jav. Tento jav je podobný ako Jouleov jav, [1] ale namiesto čistého ťahu alebo tlaku je výsledkom pôsobenia magnetického poľa deformácia v šmyku, ktorá vytvorí torzné posunutie feromagnetickkej vzorky.

### 3.5 Matteucciho jav

Inverzný Wiedemannov jav sa nazýva Matteucciho. Striedavý prúd privádzaný do cievky vytvára pozdĺžne magnetické pole vo vzorke, a to vedie k vytvoreniu hustoty magnetického toku [1] vo vzorke. Prítomnosť striedavého magnetického toku môže byť detekovaná inou cievkou, tzn. snímacou cievkou, ktorá meria rýchlosť zmeny hustoty magnetického toku. Krútenie feromagnetickkej vzorky indukuje zmenu magnetizácie vzorky, čo má za následok rozdielnu zmenu rýchlosti hustoty magnetického toku. Detekciou zmeny magnetizácie pomocou snímačej cievky môže byť vyhodnotená zmena napätia v strihu [5] a v dôsledku toho sa môže vypočítať veľkosť aplikovaného krútiaceho momentu. Matteucciho jav je modifikovaný zavedením permanentného magnetického predpätia vo feromagnetickkej vzorke, používa sa v senzorových aplikáciách.

### 3.6 Barretiho jav

Nasledujúci magnetostrikčný efekt je Barretiho jav. V určitých extrémnych prevádzkových podmienkach sa objem materiálu môže meniť v závislosti na magnetickom poli. Napríklad zmena objemového podielu [1] niklu je len  $10^{-7}$  pri 80 kA/m. Pre malé zmeny objemového podielu je detekcia náročná. V praxi sa tento jav používa len zriedkavo.

### 3.7 Nagaoka-Honda jav

Opačný jav ako je Barrettov, je Nagaoka-Honda jav. Jedná sa o zmenu magnetického stavu spôsobenú zmenou objemu vzorky [1] ako výsledok hydrostatického tlaku. Ich použitie v priemysle je menšie, pretože sa používajú len pre náročné podmienky a v presných meraniach, kde zmeny objemu musia byť zaznamenané.

### 3.8 Popis najpoužívanejších javov

Dva najrozšírenejšie magnetostrikčné javy sú Jouleov a Villariho. Môžu byť analyzované pomocou nasledujúcich rovníc [1]. Ako prvý Villariho jav:

$$B = d\sigma + \mu^\sigma \quad (1)$$

Kde:

$B$  – magnetická indukcia

$d$  – magnetostrikčná konštanta

$\sigma$  – symbolizuje zmenu namáhania

$\mu^\sigma$  – je permeabilita pri konštantnom mechanickom namáhaní  $\sigma$

Jouleov jav je reprezentovaný podobným vzťahom:

$$S = c^H + d_\sigma H \quad (2)$$

Kde:

$S$  – je mechanická deformácia

$c^H$  – koeficient zhody pri konštantnej intenzite poľa  $H$

$d_\sigma$  – magnetostrikčná konštanta pri konštantnom namáhaní

Intenzita magnetického poľa  $H$  sa dá vypočítať použitím:

$$H = IN \quad (3)$$

Kde  $I$  je prúd [A] a  $N$  je počet vinutí v cievke. Vzhľadom na to, že os typickej tyčovej vzorky je zvyčajne v súlade so smerom magnetizácie, potrebujeme len axiálne zložky, [1] ktoré berieme do úvahy. Preto môžeme brať veličiny  $d$ ,  $\mu$  a  $c$  ako skalárnu hodnotu pre zjednodušenie.

## 4 Magnetostrikčné materiály

Klasickým MsM nachádzajúcim široké technické použitie je nikel, resp. jeho zliatiny so železom, príp. kobaltom. Prevažne ide o amorfné kovové zliatiny [13]. Najznámejšie sú:

- Metglas
- Terfenol-D
- Galfenol

Do skupiny MsM patria všetky feromagnetické kovy, vrátane zliatin. MsM sa líšia medzi sebou veľkosťou a znamienkom magnetostrikcie, mechanickými a elektrickými vlastnosťami. Tieto vlastnosti závisia okrem zloženia aj od predchádzajúceho spôsobu spracovania materiálu. Okrem uvedených vlastností, daných zväčša zložením a výrobou, sú niektoré MsM viac alebo menej citlivé na zmeny teploty. Zvyšovaním teploty sa menia ich magnetické a elastické parametre. Teplotný rozsah zmien je ohraničený známym Curieho bodom, [2] pri ktorom feromagnetický materiál stráca svoje magnetické vlastnosti a z nich vyplývajúce magnetostrikčné vlastnosti. Magnetostrikčné vlastnosti materiálov charakterizujú magnetostrikčné krivky, čiže závislosti relatívneho predĺženia  $\Delta l/l$  na intenzite magnetického poľa  $H$ . Deformácia sa mení lineárne s intenzitou magnetického poľa  $H$ . Pri určitej veľkosti magnetického poľa  $H$  dosahuje maximálnu hodnotu.

### 4.1 Využitie

Uplatňujú sa všade tam, kde sú iné typy snímačov nepoužiteľné. Magnetostrikčné snímače sa používajú v extrémnych podmienkach, napr. v miestach, kde je vysoký tlak, zvýšená prašnosť a vlhkosť. Nájdeme ich v lisoch, mobilných hydraulických systémoch, v regulačných ventiloch parných turbín, vo vodných i veterných elektrárnach. Dokážu zmerať polohu, vzdialenosť, rýchlosť i výšku vodnej hladiny [14]. Použitie:

- zariadenia zisťujúce zvuk
- transformátory
- magnetické štítky proti krádeži
- motory
- vysokofrekvenčné cievky

**Tabuľka 4.1:** Používané materiály a ich vlastnosti

Prehľad technológií

Technológia	PZT	Terfenol-D	SMA
Ovládací prvok	Piezoelektrický materiál	Magnetostrikčný materiál	Zliatiny s tvarovou pamäťou
Predĺženie	0,1%	0,2%	5%
Hustota energie	2,5 kJ/m <sup>3</sup>	20 J/m <sup>3</sup>	1 J/m <sup>3</sup>
Šírka frekvenčného pásma	100 kHz	10 kHz	0,5 kHz
Hysterézia	10%	2%	30%
Odhadované náklady	200\$/cm <sup>3</sup>	400\$/cm <sup>3</sup>	200\$/cm <sup>3</sup>

Tabuľka 4.1 sumarizuje niektoré parametre rôznych materiálov a štruktúr, ktoré sú bežne používané. Je určená k porovnaniu medzi hlavnými materiálmi používaných v aktuátoroch a snímačoch.

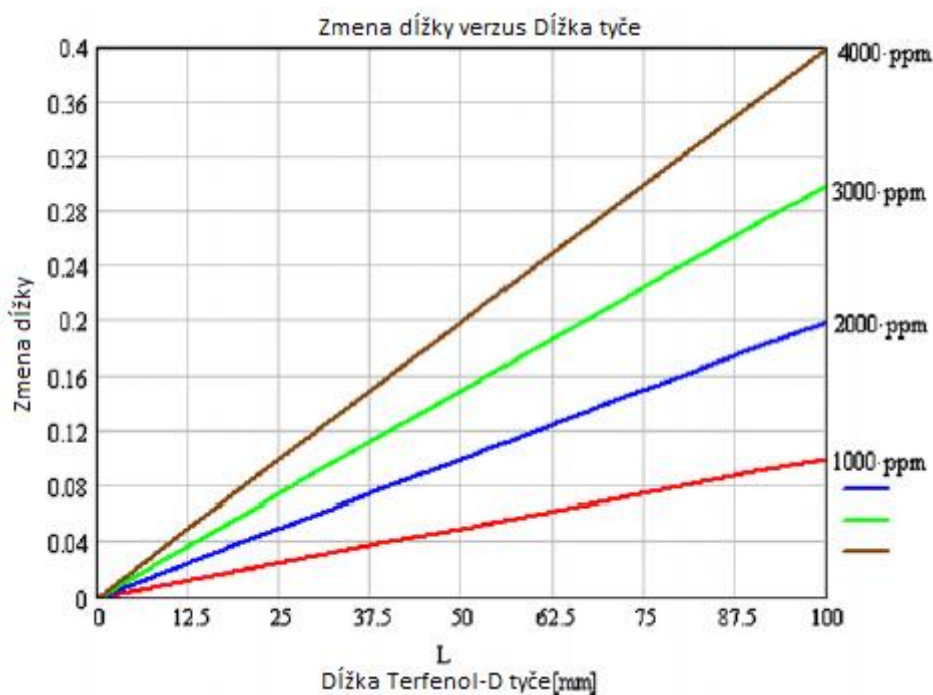
Najlepšie hodnoty, z MsM, dáva pri vysokom magnetickom napätí, pri relatívne nízkom magnetickom poli a so širokou škále prevádzkových teplôt dostupná zliatina Tb<sub>0,3</sub>D<sub>0,7</sub>Fe<sub>1,9</sub>. Terfenol je vzácna zliatina železa v zemi. Zliatina je nazývaná ako Terfenol-D, kde „Ter“ je z Terbiu, „Fe“ je chemická značka pre železo, „NOL“ je zložené z Naval Ordnance Laboratory a „D“ je z Dysprosium (Ter + Fe + Nol + D). Terfenol-D bol objavený výskumnou skupinou vedenou A.E. Clarkom v 1970 v Naval Ordnance Laboratory. Jednou z prvých aplikácií Terfenolu-D bol vysoko výkonný ultrazvukový menič. Terfenol-D je schopný poskytovať pri pozitívnej magnetostrikcii viac než 1000-2000 ppm pri 50-200 kA/m v rozmerných materiáloch a okolo 4000 ppm v priebehu mechanickej rezonančnej frekvencií pri veľkých magnetických poliach:

$$\lambda_S = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

$$\lambda_S = 1000-4000 \text{ ppm}^1$$

Obr. 4.1 znázorňuje celkový rozsah zmeny dĺžky pre danú dĺžku Terfenol-D tyče. Krivky, ktorú znázornené na obrázku sú výkonnostné krivky.

<sup>1</sup> parts per million - je hodnota vyjadrená ako zmena dĺžky vynásobená miliónom a delená dĺžkou vzorky tyče



**Obrázok 4.1:** Zmena dĺžky v závislosti na dĺžke tyčky z Terfenolu-D

Zariadenie, ktoré používa vlastnosť expanzie Terfenolu-D, by malo byť navrhnuté pomocou magnetického a mechanického prepätia tak, že má nulový bod na začiatku lineárnej časti výkonnostnej krivky [1] materiálu. Keď sa vytvorí magnetické pole, odozva materiálu bude v súlade s lineárnou časťou krivky, čo zaisťuje odozvu, ktorá je predvídateľná a primeraná i v rozmedzí deformácie až do 2000 ppm. Maximálne užitočná magnetoelastická deformácia je jedným z kľúčových parametrov definujúcich výsledný mechanický výstup v prípade magnetostrikčných aktuátorov. V porovnaní s ostatnými magnetostrikčnými materiálmi, vykazuje Terfenol-D dobrý kompromis medzi vysokým napätím a vysokou Curieho teplotou. Vo všeobecnosti sa magnetostrikcia vyskytuje iba v materiáloch pri teplotách pod teplotou Curieho, ale často je Curieho teplota nižšia ako teplota prostredia, a to spôsobuje, že má magnetostrikčný jav dosahuje malých hodnôt. Tabuľka 4.2 porovnáva pretvorenie pre rôzne magnetostrikčné materiály pri rôznej Curieho teplote.

**Tabuľka 4.2:** Porovnanie pretvorenia

Materiál	Pretvorenie pri saturácii (ppm)	Curieho teplota (K)
Ni	-50	630
Fe	-14	1040
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	60	860
Terfenol-D	2000	650
Tb <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub>	5500	180
Tb <sub>0.5</sub> Dy <sub>0.5</sub> Zn	5000	200

V závislosti na aplikácii rôznych iných faktorov ako hysterézia, linearita atď. sú veľmi dôležité hodnoty Curieho teplôt.

#### 4.2 Výroba Terfenol-D

Terfenol-D je vzácna zliatina železa, sivej farby, krehká pri izbovej teplote. Surový materiál je vysoko reaktívny, obsahuje veľa nečistôt a jeho výroba nie je ľahká. Vyvinuté sú štyri rôzne metódy na výrobu Terfenolu-D. Najpožívanejšie metódy sú Modified Bridgmann (MB) a Free Stand Zone Melting (FSZM). V FSZM metóde sa materiál v taviacej zóne udržiava v suspenzii povrchovým napätím. Táto metóda sa tiež nazýva Directional Solidification Method (Smerová Tuhnúca Metóda) [1]. V MB metóde je materiál kompletne roztavený a v zárodkoch začínajú rásť kryštály. Pretože pri bočnej nukleácii zŕn narazia kryštály na steny formy, začnú rásť axiálne dendritické kryštály, pričom minimálny priemer Terfenol-D tyčky je 10 mm. U oboch procesoch je materiál pri tuhnutí osobitne kontrolovaný tým, že znižujeme teplotu, ktorá podporuje kryštalografickú vyrovnanú štruktúru. Obe metódy sú používané k výrobe Terfenol-D tyčiek s vysokou magnetostrikciou a vysokou hustotou energie. Spekané a kompozitné procesy sa používajú skôr na výrobu Terfenol-D tyčí pre vysokú frekvenciu (vyššiu ako 1 kHz) a pre aplikácie, kde by vírivé prúdy spôsobovali vysoké straty. Metódy založené na technológii spekania sú vhodné pre zložitejšie geometrie, ako sú tyče do 65 mm v priemere a 200 mm na dĺžku, laminátové tyče, tyče s otvormi alebo osobitných tvarov, tyče so štvorcovým prierezom, taniere a disky. Nové a zdokonalené metódy spracovania, ako riadené tuhnutie alebo metódy práškovej metalurgie, majú dobre predpoklady pre nákladovo efektívnu výrobu.

Terfenol-D materiál je veľmi krehký v ťahu. Jeho pevnosť v ťahu (28 MPa) je veľmi nízka v porovnaní s pevnosťou v tlaku (až 880MPa). Hustota materiálu je vyššia než je hustota bežných druhov ocele a je v rozmedzí asi 9250 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3 Magnetomechanický koeficient väzby/coupling a magnetostrikčný koeficient

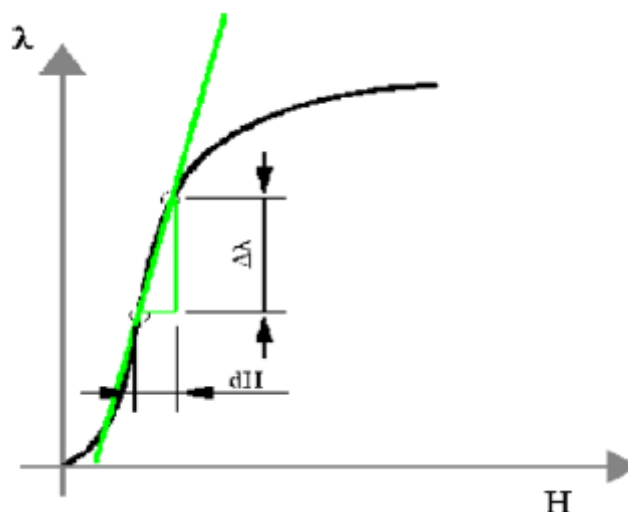
V meničoch sa magnetická energia premieňa na mechanickú energiu. Účinnosť premeny energie na inú je určená magnetomechanickým väzbovým/coupling koeficientom. Hodnota tohto koeficientu je zvyčajne medzi 0,5 a 0,7, čo naznačuje, že účinnosť sa mení medzi 50% a 70%. Na základe používanej konvencie v magnetostrikčných materiáloch, je os 3 v smere dĺžky a os 1 je v šírke vzorky v priestore [8]. Keď sa materiál ohýba v ose 2, vzbudzuje v ose 3 axiálne pretvorenie a magnetizáciu. V súlade s týmito podmienkami sa pracuje v móde „33“. V aplikáciách, kde je len pozdĺžne predĺženie (pre štandardné aktuátory) nás zaujímajú materiálové vlastnosti, ktoré sa vzťahujú k pozdĺžnej osi. Magnetomechanický faktor väzby/coupling sa označuje  $k_{33}$ . Magnetomechanický faktor väzby/coupling je daný vzťahom:

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\mu_{33}} E^H \quad (5)$$

V tomto vzťahu (5) je magnetostrikčný koeficient  $d_{33}$  sklon pretvorenia voči magnetickému poľu ( $\lambda - H$ ) charakterizovaný podľa vzťahu (6):

$$d_{33} = \frac{d\lambda}{dH} \quad (6)$$

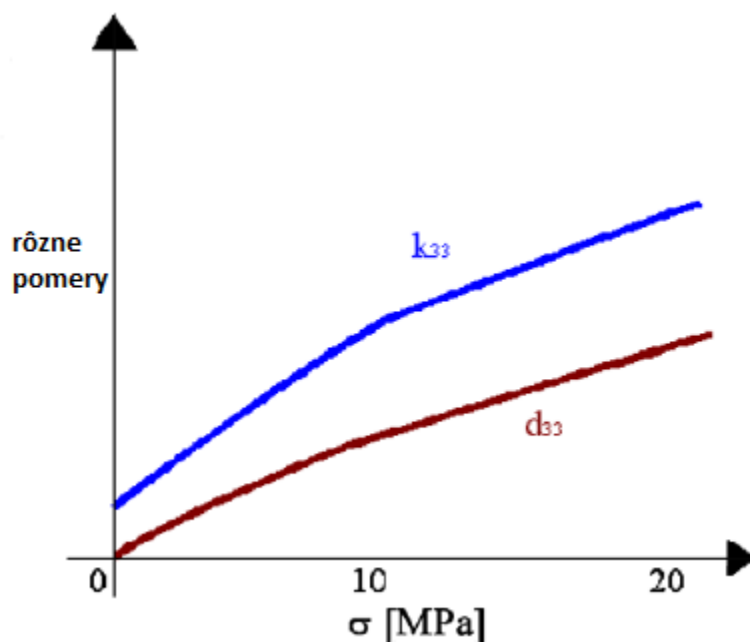
Na obr. 4.2 je magnetostrikčný koeficient  $d_{33}$  znázornený graficky. Vysoký sklon sa nachádza v oblasti, kde je vzťah medzi deformáciou a magnetickým poľom takmer lineárny. To je optimálny pracovný rozsah a je výhodný pre premenu magnetickej na mechanickú energiu z dôvodu minimalizácie strát.



**Obrázok 4.2:** Pretvorenie závislé na magnetickom poli

Ani magnetomechanický koeficient väzby/coupling  $k_{33}$  ani magnetostrikčný koeficient  $d_{33}$  nezostáva konštantný po celú dobu prevádzkových podmienok v reálnych magnetostrikčných aplikáciách, čo je vidieť na obr. 3.3. Pre ilustráciu je ukázaný vplyv pôsobiaceho tlaku na koeficienty  $d_{33}$  a  $k_{33}$  pre aplikácie, [1] kde sa používa Terfenol-D. Je bežné, že oba koeficienty pri dosiahnutí maxima nám dajú hodnotu predpätia.

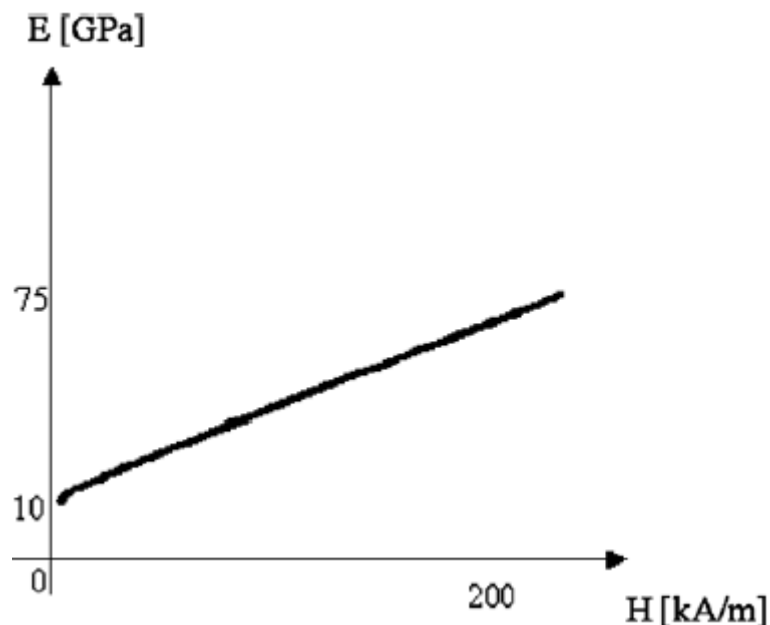
Pre efektívnu a účinnú prevádzku je potrebné aby oba koeficienty boli tak vysoké, ako je možné. Magnetostrikčný koeficient  $d_{33}$  je často nazývaný magnetostrikčný koeficient pretvorenia. Pre Terfenol-D je hodnota magnetostrikčného koeficientu  $d_{33}$  [6] v rozmedzí 5 - 70 nm/A. Oba koeficienty nezávisia len na napätí, ako je naznačené nižšie na obr. 4.3, ale tiež na účinku magnetického poľa.



**Obrázok 4.3:**  $k_{33}$  a  $d_{33}$  závislé na pôsobení napätia

#### 4.4 Youngov modul pružnosti

Niektoré vlastnosti Terfenolu-D nie sú konštantné počas operačného cyklu. Jednou z týchto vlastností je Youngov modul, ktorý sa mení takmer lineárne s magnetickým poľom. Náčrt  $\Delta E$ -javu je znázornený na obr. 4.4.



**Obrázok 4.4:** Youngov modul v závislosti na magnetickom poli

Youngov modul pružnosti pri konštantnej hodnote hustoty magnetického toku,  $E^B$ , môže byť vyjadrený nasledujúcim vzťahom:

$$E^B = \frac{E^H}{(1-k_{33})} \quad (7)$$

Ako rovnica naznačuje, je teoretická hodnota hustoty toku, pri ktorej sa Youngov modul [1] stane nekonečný. Ak táto vlastnosť nastane vo vzorke Terfenol-D, hovoríme, že dosiahol "zablokovaného stavu" a nie je možná už žiadna ďalšia rotácia magnetických domén a materiál nie je schopný meniť svoje rozmery v závislosti na napätí.

#### 4.5 Faktor kvality

Pre kvázi-statickú podmienku (trvalé budenie pod sínusovým striedavým prúdom), za predpokladu nulového predpätie a za predpokladu lineárneho vzťahu medzi pretvorením a magnetickým poľom je pretvorenie dané vzťahom:

$$\lambda_{33} = d_{33}H_3 \quad (8)$$

Je zistené, že koeficient  $d_{33}$  je takmer konštantný pre väčšinu frekvencií. Ale keď frekvencia dosiahne hodnotu spôsobujúcu vzorke rezonanciu v jej pozdĺžnom smere, amplitúda vibrácií [1] náhle vzrastie. Pozorovaná vzorka Terfenolu – D musí mať možnosť vibrovať, kvôli tomu aby použité aktuátory neboli nezaťažené, týmto náhlym nárastom amplitúdy. Napätie pri rezonanciách je oveľa vyššie než je v kvázi-statickej podmienke. Pretvorenie pri rezonanciách je daná vzťahom:

$$\lambda_{33} = Q_m d_{33} H_3 \quad (9)$$

Zosilňovací činiteľ pretvorenia pri svojej prvej rezonancii je podľa kvázi-statickej podmienky faktor kvality  $Q_m$ . V prípadoch kde vibrácie aktuátorov sú úplne voľné je činiteľ kvality  $Q_m$  v dôsledku mechanických strát vyskytujúcich sa vo vnútri v materiáli rovný  $Q^H$ . Tento vnútorný faktor kvality materiálu  $Q^H$  je v rozmedzí 3-20. [6] Ale, keď sa zaťaží vzorka Terfenol-D a je obmedzená vo svojom voľnom pohybe kvôli okolitej konštrukcii je činiteľ kvality  $Q^H$  znížený na hodnotu  $Q_m$ .

#### 4.6 Permeabilita

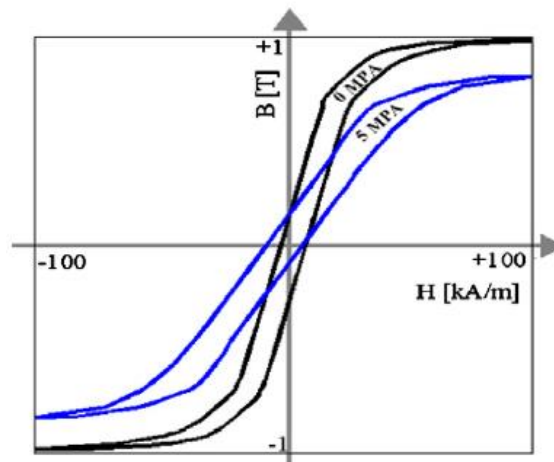
Konštanta  $\mu_0 = 2\pi 10^{-7}$  Tm/A definuje magnetickú permeabilitu voľného priestoru. Permeabilita väčšiny materiálov je blízka permeabilite voľného priestoru. Tieto materiály sa nazývajú paramagnetické alebo diamagnetické. V prípade feromagnetických materiálov je permeabilita veľmi veľká a je bežné nazvať permeabilitu ako novú vlastnosť, relatívna permeabilita. Udáva koľkokrát musí byť vynásobená permeabilita voľného priestoru, aby sa dospelo k hodnote pre permeabilitu materiálu. Hodnoty relatívnej permeability sú bezrozmerné. Relatívna permeabilita zosilňuje magnetické účinky v magnetickom materiáli. Relatívna permeabilita Terfenol-D je oveľa menšia ako u magnetického železa. Tabuľka 4.3 uvádza hodnoty relatívnej permeability vrátane Terfenol-D. Ak má materiál veľmi malú reakciu na pôsobiace magnetické pole, ako je tomu v prípade hliníka, tak je správanie podobné tomu z voľného priestoru a relatívna permeabilita je takmer rovná jednej. Z tohto vyplýva, že magnetické správanie hliníka v magnetickom poli je lineárne.

**Tabuľka 4.3:** Relatívna permeabilita

Relatívna permeabilita	Rozsah hodnôt
Mu-metal	20,000
Permalloy	8000
Magnetic iron	200
Nickel	100
Terfenol-D	<10
Aluminium	1

Keď feromagnetický materiál zmagnetizujeme pôsobením magnetického poľa a potom pole odstránime, materiál sa nevráti späť na nulovú hodnotu magnetizácie. Dosiachnutie nulovej magnetizácie musí byť riadené a to vložení materiálu do magnetického poľa v opačnom smere. Takže krivka magnetizácie je slučka [1] a táto slučka sa nazýva hysterézná slučka. Určitá energia je vyžadovaná aj na orientáciu domén v rovnakom smere ako je magnetické pole. Pre aktuátor alebo snímač inteligentného materiálu je cieľom vyvinúť materiály s najmenšou hysteréziou. Na druhej strane, materiál, ktorý má byť použitý s vysokou kapacitou pre magnetickú pamäť je vyžadovaná veľká hysterézia, čo je prípad u väčšiny aplikácií s permanentnými magnetmi.

V prípade aktívneho materiálu ako Terfenol-D je relatívna permeabilita [1] závislá na predpätí a frekvencii používanej pri jeho prevádzke. Obr. 4.5 predstavuje magnetické správanie Terfenolu-D. Ukazuje, ako tento materiál reaguje na magnetické pole ( $H$ ) zvýšením magnetického toku s hustotou toku ( $B$ ). Permeabilita je hodnota  $B / H$ . Diagram ukazuje hysterézne slučky, kde v jednom prípade je na Terfenol-D pôsobené predpätie 5 MPa.



**Obrázok 4.5:** Závislosť magnetického poľa pri zvyšovaní hustoty magnetického toku

Hysterézna slučka je nelineárna je jej popis zložitý, ale má výrazný vplyv na modelovanie presnosti a prispôsobenie základných zákonov pre magnetostriekčné aktuátory. Jednoduchý prístup pre popis hysteréznej krivky má Bouc-Wen model s jednoduchými popisnými parametrami. Bouc-Wen model sa skladá iba z lineárnej rovnice a nelineárnej diferenciálnej rovnice, preto môže model s týmito parametrami dobre vytvoriť hysteréznú slučku.

Bouc-Wen rovnice [4] pre popis hysteréznej slučky sú nasledovné:

$$F(x)(t) = \bar{k}x(t) + az(t) \quad (10)$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{e-1}z - \gamma\dot{x}|z|^e \quad (11)$$

Kde rovnica (10) predstavuje silu tlmiča a rovnica (11) premennú definujúcu tvar hysteréznej krivky.

#### 4.7 Blokovacia sila

Maximálne dosiahnuteľná sila je nazývaná „blokovacia sila“ [1]. Jednoduchý vzťah medzi silou a posunutím je hodnota daná:

$$F_T = S_m \Delta L \quad (12)$$

V tejto rovnici je  $S_m$  tuhosť aktívneho prvku a je definovaná modulom pružnosti (pri konštantnom magnetickom poli), plochou prierezu a dĺžkou Terfenolu-D ako:

$$S_m = \frac{E^H A}{L} \quad (13)$$

Kombináciou posledných dvoch rovníc a nahradením tuhosti podľa vzťahu (13) a tiež magnetického pretvorenia ( $\lambda = \Delta L/L$ ) vedie rovnica definujúca blokovaciu silu:

$$F_B^H = AE^H \lambda_{max}^H \quad (14)$$

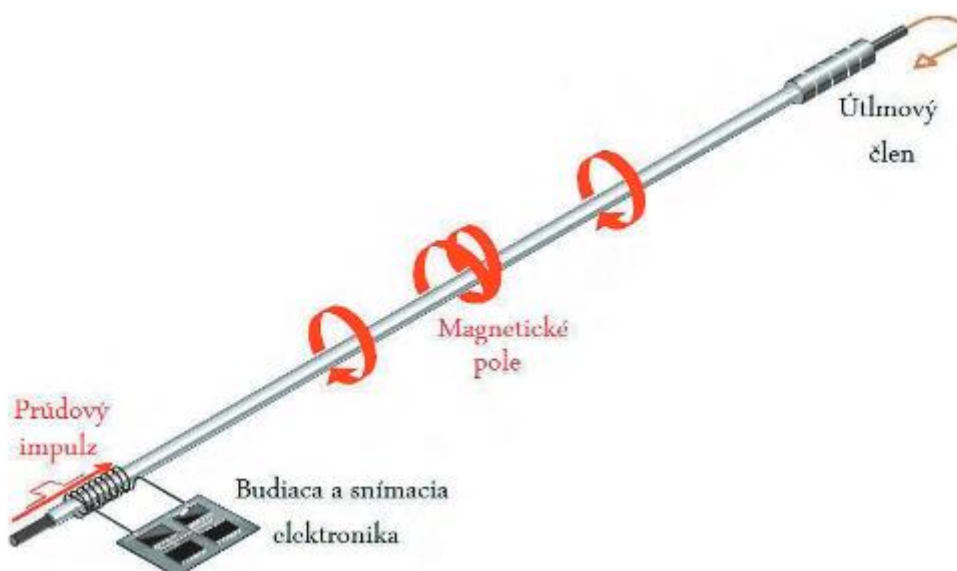
Blokovacia sila, ktorá mieri k maximálnemu množstvu magnetostrikčnej deformácie [1] sa môže aplikovať na vzorke Terfenolu-D. Maximálna sila nastane pri veľmi vysokej intenzite magnetického poľa (pri  $\lambda_{max}$ ). Podľa tohto vzťahu je blokovacia sila  $F_B^H$  úmerná modulu pružnosti a maximálnej deformácii za pôsobenia magnetického poľa. Blokovacia sila môže byť vypočítaná pre každú hodnotu intenzity magnetického poľa. S hriadeľom Terfenolu-D o priemere 20 mm a s miernym magnetickým poľom je dosiahnuteľná blokovacia sila asi 12 000 N.

## 5 Aplikácie magnetostrikčných materiálov

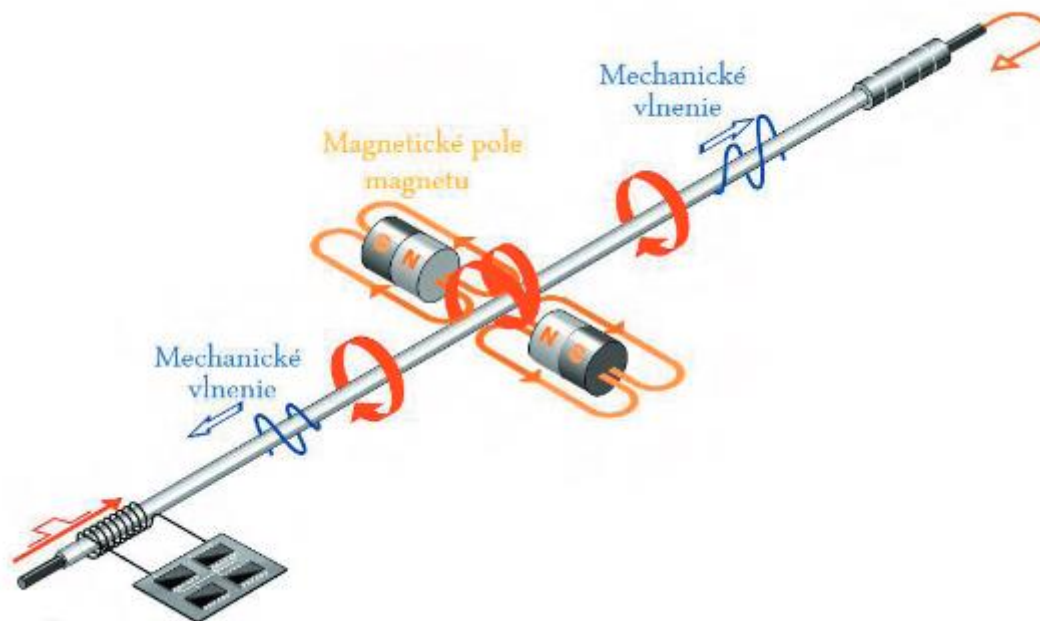
Magnetostrikčné technológie sa úspešne používajú v produktoch, ktoré sú bežné ale aj v špeciálne. Magnetostrikčné účinky popisované v predchádzajúcich kapitolách sa dajú použiť v rôznych aplikáciách s použitím Terfenolu-D. Dve hlavné oblasti aplikácií sú pohony a snímače.

### 5.1 Najrozšírenejšia aplikácia magnetostrikčných materiálov v senzorike

Za najrozšírenejšiu aplikáciu je považovaný snímač polohy. Do feromagnetického magnetostrikčného vodiča vnútri snímača je privedený krátky prúdový impulz, ktorý v celej dĺžke vodiča vybudí magnetické pole (obr. 5.1). V určitom mieste už pôsobí axiálne magnetické pole permanentného magnetu, ktorý je priložený blízko povrchu snímača. Interakcia magnetického poľa permanentného magnetu a magnetického poľa vodiča (Wiedemannov efekt) vybudí vo feromagnetickom vodiči torzný magnetostrikčný impulz, ktorý sa šíri ako mechanický vzruch rýchlosťou zvuku od miesta vzniku k obojom koncom vodiča. Na vzdialenom konci feromagnetického vodiča je impulz pohltý tlmiacim prvkom, aby sa zabránilo jeho odrazeniu a rušivému vplyvu na meranie. Na začiatku feromagnetického vodiča sa druhá časť mechanického vzruchu zachytí snímacím zariadením a z časového oneskorenia od vyslania budiaceho prúdového impulzu a známej rýchlosti šírenia mechanického vzruchu [12] v danom feromagnetickom materiály sa dá určiť poloha miesta vzniku mechanického vzruchu a teda i poloha permanentného magnetu voči začiatku snímača (obr. 5.2). Snímacie zariadenie, na začiatku snímača, môžu byť realizované rovnako na magnetostrikčnom princípe pomocou tzv. Villariho efektu. Začiatok feromagnetického vodiča je privarený k feromagnetickému pásku, ktorý je v okamžiku príchodu mechanického vzruchu podrobený mechanickému namáhaniu. Tým dôjde k zmene jeho permeability a i k zmene magnetického toku, ktorého zdrojom je permanentný magnet. V cievke okolo feromagnetického pásku sa tým naindukujú napätie, ktoré je ďalej spracované elektronikou senzoru.



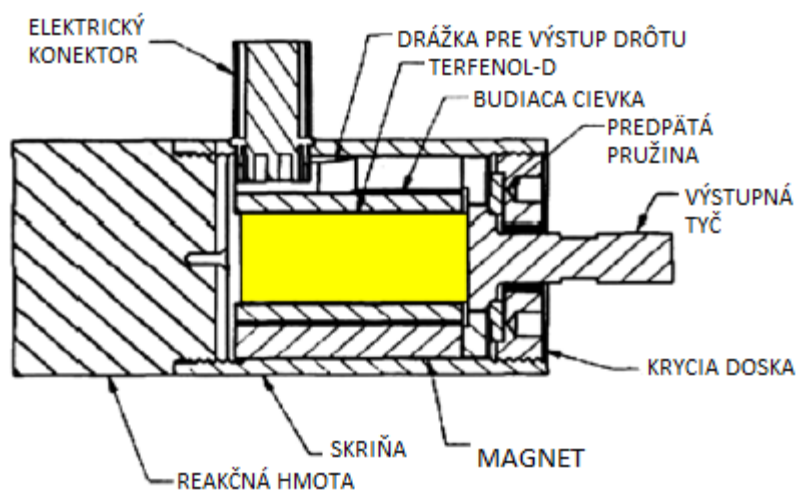
Obrázok 5.1: Magnetické pole vytvorené prúdovým impulzom



**Obrázok 5.2:** Šírenie mechanickej vlny od permanentného magnetu

### 5.2 Reakčný hmotnostný pohon

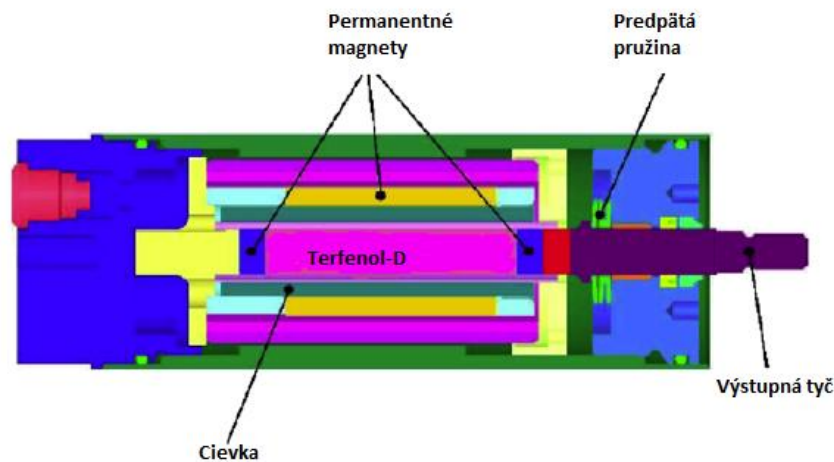
Etrema [16] navrhla, vyrobila a overila zariadenie pre pohon (aktuátor), ktoré je schopné generovať užitočné sily a môže byť použité pre široké pásma frekvencií. Tento konkrétny reakčný hmotnostný pohon bol navrhnutý pre prevádzku v rozsahu pásma od 150 do 2000 Hz. Je tiež schopný generovať silu 4000 N alebo zrýchlenie 30 g na rezonančnej frekvencii zariadenia 635 Hz. Vytváranie seizmickej vlny s týmto pohonom [1] a analyzovanie odrazu poskytuje indikáciu skrytej štruktúry pod povrchom. Obr. 5.3 znázorňuje pohľad v reze na reakčný hmotnostný pohon.



**Obrázok 5.3:** Reakčný hmotnostný pohon

### 5.3 Štandardný aktuátor

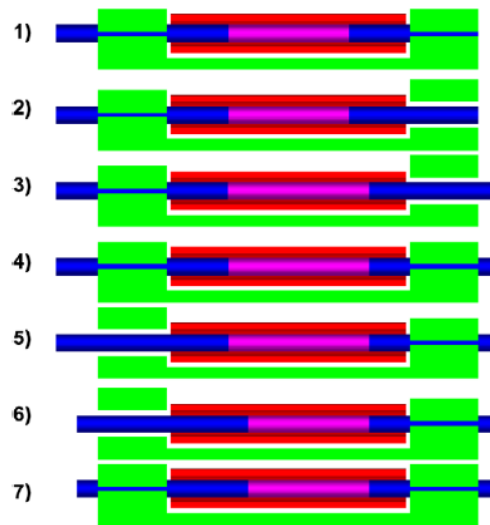
Etrema [16] tiež navrhla, vyrobila a overila niekoľko ďalších pohonov pre rôzne účely. Bežný pohon so svojou konštrukciou je ukázaný na obr. 5.4, dáva až 250  $\mu\text{m}$  posunov a sily do 2200 N, ktoré pracujú pri frekvenciách až 2500 Hz [1]. Prevádzková teplota tohto pohonu je zvyčajne v rozmedzí od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Okrem toho sú k dispozícii ultrazvukové pohony pre vyššie frekvencie.



**Obrázok 5.4:** Štandardný aktuátor

### 5.4 Lineárny motor založený na Terfenole-D

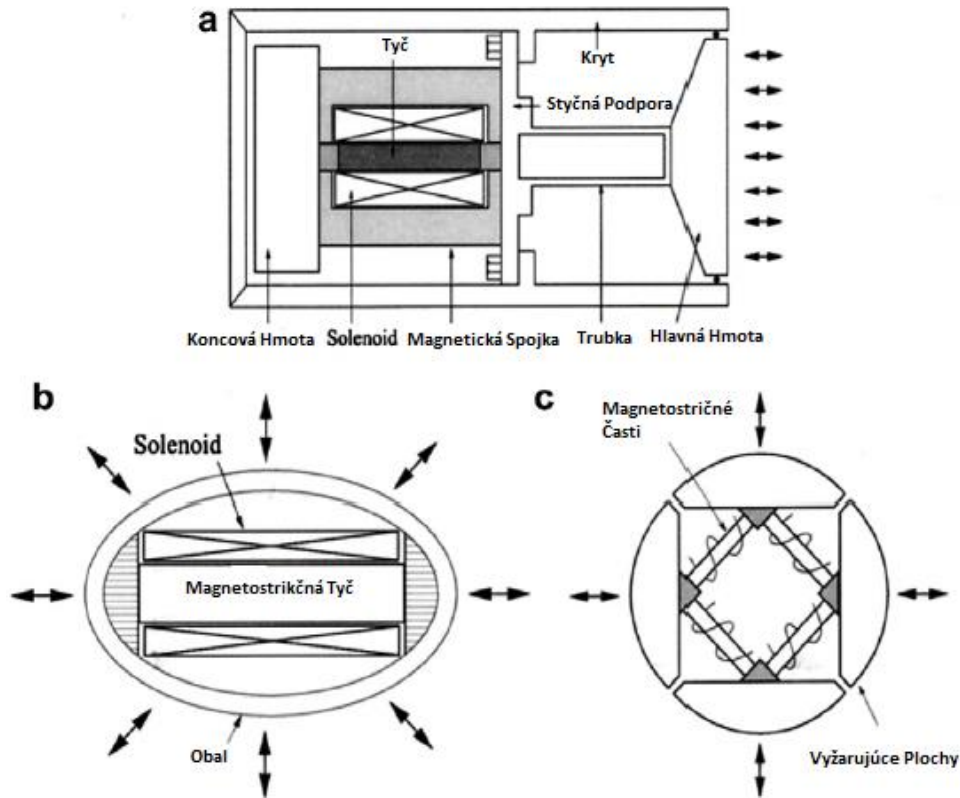
Energen Inc. [17] navrhla a postavila kompaktný lineárny motor založený na inteligentnom materiáli Terfenol-D. Ústredným prvkom tohto lineárneho motora je tyč Terfenol-D obklopená elektrickou cievkou, ktorá keď sa nabudí spôsobuje, že tyč sa predĺži. Aktuátor je namontovaný medzi dvoma svorkami. Prevádzkovaním pohonu a svoriek v príslušnej sekvencii sa tyč inteligentného materiálu pohybuje dopredu alebo dozadu. Obr. 5.5 znázorňuje princíp, [1] ktorým je dosiahnutá funkcia. V prvom kroku je prístroj vypnutý a oba konce sú upnuté. Potom sa jedna zo svoriek indukciou uvoľní (krok 2) a následne sa nabudením akčného člena cievky (Krok 3) predný koniec tyče pohybuje dopredu v dôsledku predĺženia Terfenol-D. Počas tohto predĺženia je predné svorka uzavretá a drží sa tyče (krok 4). Potom je zadná svorka nabudená aby sa umožnil pohyb (krok 5). Ďalej sa budiaca cievka vypne a zadný koniec tyče sa pohybuje dopredu (krok 6). V poslednej sekvencii je zadná svorka opäť uzatvorená a poskytuje možnosť úplnej sily zovretia. Toto usporiadanie dosiahne veľmi presné riadenie polohy [6] s presnosťou na niekoľko mikrometrov po celej dĺžke zdvihu 20mm. Sila zovretia je schopná dosiahnuť až 3000 N.



**Obrázok 5.5:** Lineárny motor

### 5.5 Ultrazvukový menič

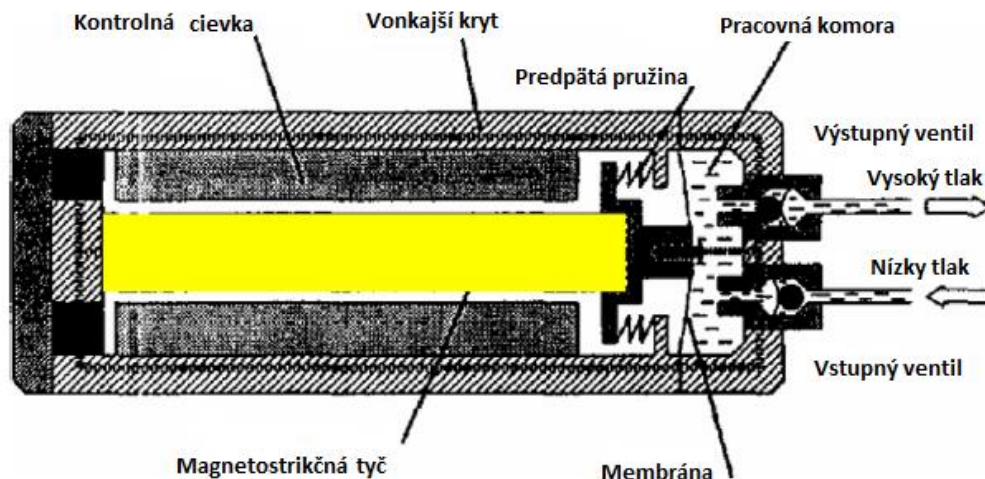
Dobry ultrazvukový menič by mal produkovať vysokú mechanickú energiu pri nízkych frekvenciách. Ďalšia podmienka je tá, že musí byť dosiahnutá rozsiahla šírka pásma pracovných frekvencií [1] spolu s činiteľom akosti  $Q$ , ktorý je nízký. Pôvodné, široko využívané, meniče na báze niklu, boli nahradené novšími technológiami založenými na novších magnetostrikčných materiáloch. V skutočnosti meniče (z Terfenolu-D) sú schopné pracovať s vysokou mechanickou energiou a pri nízkych frekvenciách, pretože ich magnetomechanické väzbové/coupling koeficienty môže byť až 0,8 a ich faktor kvality  $Q$  nízký. Obr. 5.6 ukazuje rôzne typy snímačov. Schéma a) znázorňuje typický Tonpils sonar snímač, [6] ktorý môže pracovať v šírke pásma 200 Hz pri rezonančnej frekvencii 2000 Hz ( $Q = 10$ ) a úrovni zdroj 200 dB. Schéma b) a c) ukazujú rôzne príklady pre prevod lineárneho pohybu Terfenol-D do príslušných ovládateľných vibrácií.



Obrázok 5.6: Zdroj zvuku

### 5.6 Elektro-hydraulický aktuátor

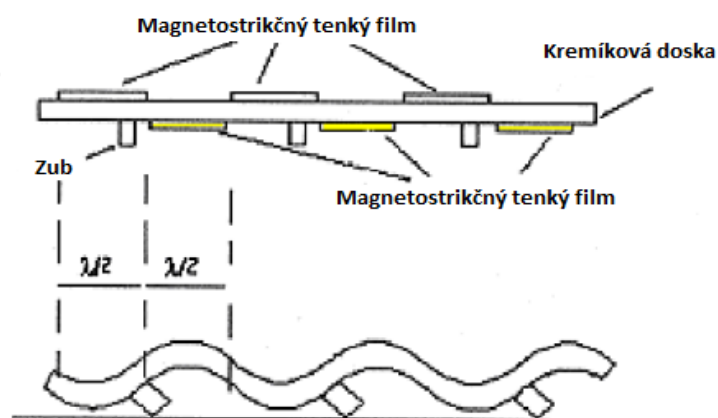
Magnetostrickcia môže byť použitá v lineárne pohybujúcich sa aktuátoroch v kombinácii s konvenčnými technológiami ako je hydraulická technika. Malé predĺženie, ktoré sa predlžuje postupne, môže byť použité ako princíp činnosti v jednoduchom čerpadle pre prúdenie tekutiny pod vysokým tlakom. Systém kombinuje magnetostricknú funkciu s hydraulickými spätnými ventilmi [1]. Systém sa skladá z magnetostrického čerpadla, hydraulického subsystému rozdelenia toku, subsystém prenosu hydraulickej energie (tlak [Pa] x prúdenie tekutiny [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]) na mechanickú energiu (sila[N] x pohyb [m]) a riadiaca elektronika. Obr. 5.7 znázorňuje konštrukciu magnetostrického čerpadla. Prototyp používajúci túto štruktúru dosiahol prevádzkový tlak 4,2 MPa a rýchlosť prúdenia tekutiny viac ako 3 l/min. Jednoduchosť, vysoká hustota energie a rýchla odozva sú veľmi sľubné.



**Obrázok 5.7:** Elektro-hydraulický aktuátor

### 5.7 Bezdrôtový lineárny mikro-motor

Je to jeden z magnetostrických povlakových aplikácií. Lineárny mikro-motor je vytvorený zo samo-pohybujúcimi kremíkovými doskami s malou magnetostrickou vrstvou aplikovanou na ich povrchu. Hlavnou výhodou použitia inteligentného materiálu (ako Terfenol-D) je, že ovládanie môže byť dosiahnuté bez kontaktu s použitím magnetického poľa vytvoreného elektrickou cievkou. Cievka by mala byť umiestnená v určitej vzdialenosti [1] od pohybujúcich sa častí. Aplikované magnetické pole vytvára rezonančne ohýbajúci sa tvar [6], to vedie k vibráciám dosky a spôsobuje pohyb približne 10 - 20 mm/s. Podobný princíp sa používa v rotačných motoroch. Pri budiacom poli 20 mT je typická rýchlosť otáčania 30 otáčok za minútu s krútiacim momentom 1,6  $\mu\text{Nm}$ . Obr. 5.8 znázorňuje funkčný princíp tenkého filmu aktuátora na báze magnetostrických materiálov.

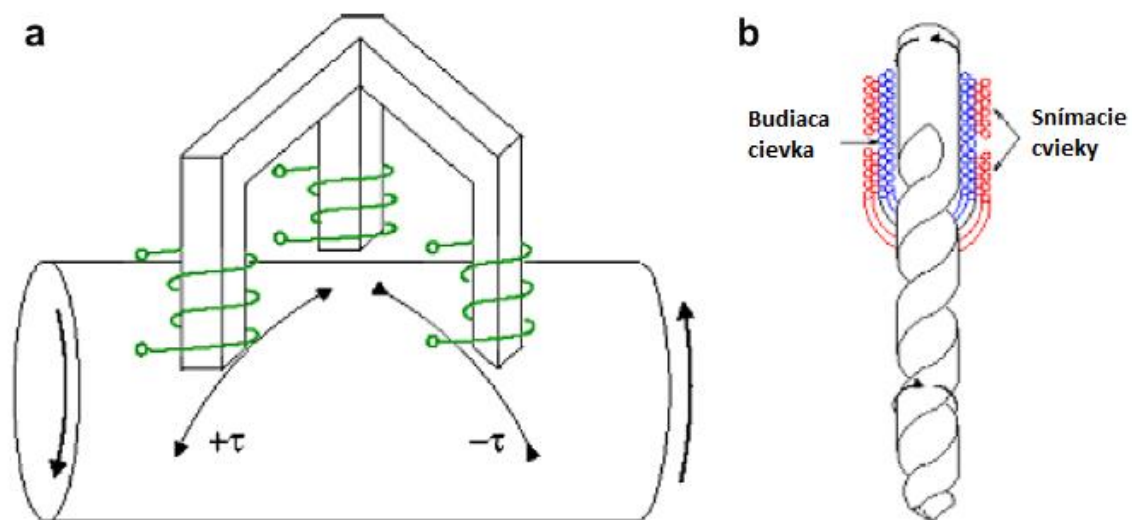


**Obrázok 5.8:** Bezdrôtový lineárny mikro-motor

### 5.8 Magnetostrické bezkontaktné snímače krútiaceho momentu

Vysoká účinnosť pri premene magnetickej energie na mechanickú energiu, a naopak, umožňuje magnetostrická technológia, ktorá je použitá v aplikáciách bezkontaktných senzorov. V týchto aplikáciách sú použité Wiedemannov, Villariho,  $\Delta E$  a Matteucioho javy na detekciu merateľných magnetostrických zmien. Poskytujú kvantifikovateľné údaje o napätiach, silách alebo momentoch. Zmeny mechanických vlastností ako je namáhanie a deformácia produkujú

predvídateľné zmeny magnetických vlastností v magnetostrikčnom materiáli. V sensorovej aplikácii generujú zmeny mechanickej energie zmeny magnetickej energie. Často sa snímacia cievka, obklopujúca magnetostrikčný materiál, používa na detekciu zmien vlastností permeability. Elektronika slúži k prevodu, filtrovaniu a zosilneniu základných údajov zo získaných dát o deformácií a napätí, [1] ktoré na oplátku poskytujú odhady pre zaťaženie (tlaku, sily, krútiaceho momentu). Na obr. 5.9a je načrtnutý snímač založený na magnetostrikčnej technológii. V tejto aplikácii sa krútiaci moment aplikuje na hriadeľ a je vytvorené šmykové napätie po celej dĺžke hriadeľa. Tiež produkuje ťahové a tlakové napätie v smeroch  $\pm 45^\circ$  k pozdĺžnej osi hriadeľa. Tieto dva vektory napätia sú orientované  $90^\circ$  k sebe a majú opačné znamienka (pre indikáciu, pevnosť v ťahu a pevnosť v tlaku). Ak hriadeľ obsahuje magnetostrikčný materiál, alebo má objímku obsahujúcu magnetostrikčný materiál a je k nemu pripojená, bude meraná magnetická permeabilita pozdĺž týchto smerov menená. Zmeny magnetického toku môže byť meraná bezkontaktné. Aplikácie, ako je táto boli vyvinuté a sú stále viac používané vo vyššej miere v oblasti pre automobilový priemysel. Ďalší typ bezkontaktného snímača je znázornený na obr. 5.9b. Princíp je založený na zmene permeability [6] v dôsledku šmykového napätia. Pre menej citlivé merania, tj. pre obmedzujúci krútiaci moment, môžu byť použité lacnejšie magnetické ocele alebo zliatiny. V náčrte sa meria krútiaci moment na hriadeľi vrtáka dvomi snímacími cievkami zapojenými do série. Jedna cievka sa nachádza nad drážkou a druhá nad stopkou. Zmena permeability stopky je menej citlivá na zmenu krútiaceho momentu, než je zmena permeability drážok. Ďalšia budiaca cievka poskytuje magnetické pole, pričom výstup snímača je rozdielny v napätí z dvoch snímacích cievok a odlišnej citlivosti permeability stopky a drážok.



**Obrázok 5.9:** Magnetostrikčné bezkontaktné snímače krútiaceho momentu

### 5.9 Energy harvesting vibrácií pomocou magnetostrikčných materiálov

Energy harvesting (tiež známe ako power harvesting alebo energy scavenging) je proces, [7] pri ktorom je energia získaná z vonkajších zdrojov (napr. solárna, termálna, veterná energia a kinematická energia) zachytená a uložená pre malé, bezdrôtové zariadenia ako sú prenosná elektronika a bezdrôtový sieťový snímač.

Bezdrôtové sieťové snímač (WSN) sa skladajú z priestorovo samostatne rozmiestnených snímačov, ktoré sú vyvinuté k zhodnoteniu kondície konštrukcie. Výhody WSN oproti drôtovým snímačom zahŕňajú schopnosť komunikácie snímača, ľahkú sieťovú prispôbitelnosť, uľahčenie prác, zníženie nákladov na údržbu a zvýšenie nasadenie senzorov v širokom rozsahu. Najväčšou prekážkou je obmedzené časové rozpätie batérie a nepoužitelnosť pri dlhodobom sledovaní bez obsluhy. Výmena batérie je časovo náročná úloha, ktorá je paradoxne v rozpore s pôvodným cieľom štruktúrneho sledovania kondície konštrukcie. Okrem toho rozmery batérie pridávajú ďalšie obmedzenia.

Sľubný prístup k obídeniu týchto obmedzení je integrovať techniky energy harvesting s bezdrôtovým snímačom k vytvoreniu samo-napájacieho uzlu snímača. V súčasnej dobe je akumulovaná energia stále menšia než z batérií, ale nedávne pokroky vo výrobe integrovaného obvodu (IC), predstavuje pozoruhodne zníženie spotrebu energie bezdrôtových snímačov [8] k chodu na niekoľko desiatok mW. Tento trend zvyšuje uskutočniteľnosť energy harvesting pre WSN.

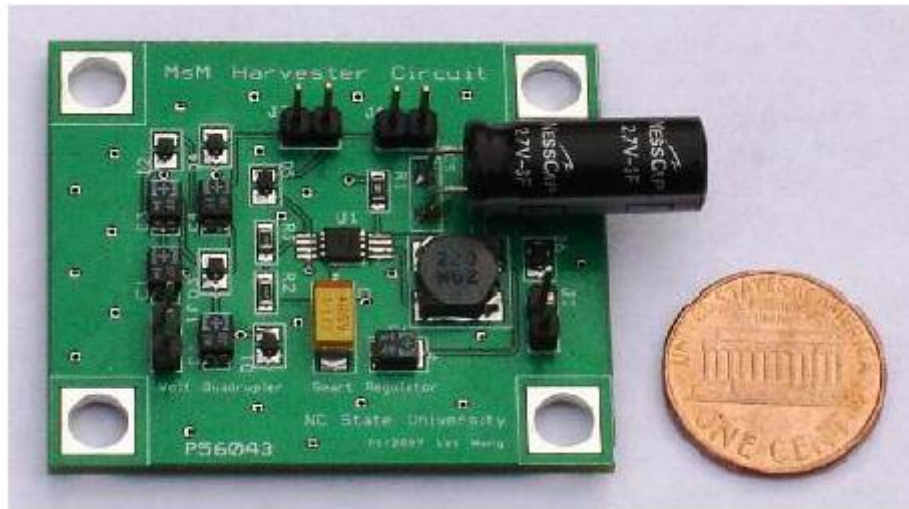
**Tabuľka 5.1:** Typy mechanizmov v energy harvesting

Porovnanie rôznych typov vibrovacích mechanizmov v harvesting		
Typ	Výhody	Nevýhody
Elektromagnetický	-žiadna potreba inteligentných materiálov -žiadny externý zdroj napätia	-masívny rozmer: magnety a snímacia cievka -ťažké spojenie s MEMS -max. napätie 0,1 V
Elektrostatické	-žiadna potreba chytrých materiálov -kompatibilita s MEMS -napätie 2-10 V	-externý zdroj napätia -mechanické obmedzenia -kapacita
Piezoelektrické	-žiadny externý zdroj napätia -vysoké napätia 2-10 V -kompaktná konfigurácia -kompatibilné s MEMS -vysoká väzba v monokryštáloch	-depolarizácia -krehkosť v masívnych piezovrstvách -chudobná väzba v piezo-filme (PVDF) -únik náboja -vysoká výstupná impedancia
Magnetostrikčné	-ultra-vysoký väzbový/coupling koeficient > 0,9 -žiadny depolarizačný problém -vysoká flexibilita -vhodné pre vysokofrekvenčné vibrácie	-nelineárny efekt -snímacia cievka -môže potrebovať predmagnetizáciu -ťažké spojenie s MEMS

Všeobecne platí, že elektromagnetické, elektrostatické a piezoelektrické (PZT) sú tri najčastejšie používané energy harvesting na princípe vibrácií a tabuľka 5.1 porovnáva vlastnosti týchto mechanizmov v energy harvesting.

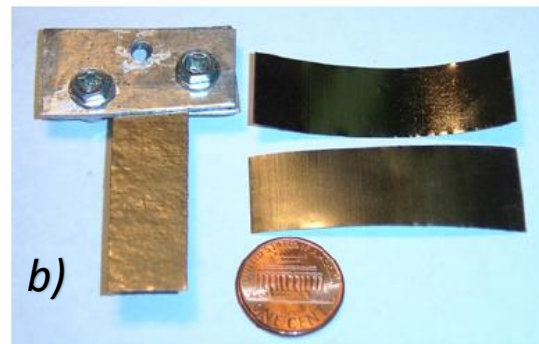
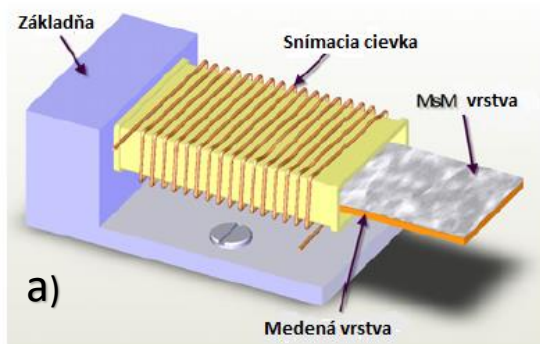
V súčasnej dobe je PZT najrozšírenejší materiál vďaka svojej kompaktnej konfigurácii a kompatibiliti s MEMS (mikro-elektromechanické systémy), ale jeho prirodzené obmedzenia ako sú starnutie, depolarizácia a krehkosť dávajú do pozornosti budúce aplikácie v aktuálnych WNS.

Na prekonanie istých problémov sa vykonalo niekoľko pokusov na energy harvesting na princípe vibrácií z okolia na základe Villariho efektu. To znamená, že vibrácie vyvolajú deformáciu MsM, ktorá vytvorí zmenu vlastnej magnetizácie. Hoci väčšina feromagnetických materiálov vykazuje Villariho jav, ale nízka hodnota magnetizácie činí materiál nepoužiteľným. Dve rozšírené MsM podnietili nový pohľad na aplikácie energy harvesting: kryštalická zliatina Terfenol-D a amorfné kovové sklo Metglas 2605SC (Fe<sub>81</sub>B<sub>13,5</sub>Si<sub>3,5</sub>C<sub>2</sub>). Terfenol-D nie je vhodný pre WSN. Okrem svojich objemových rozdielov, ktoré obsahujú dve cievky s počtom vinutí tisíc, je jeho maximálny výkon 45  $\mu$ W pri rezonancií 45 Hz a najvyššie výstupné napätie bolo nižšie ako 0,35 V. Terfenol-D bol používaný ako prostriedok k poskytnutiu rozsiahlej deformácie v PZT vrstve pre energy harvesting. Tenká vrstva PZT obložená dvoma vrstvami z Terfenolu-D umiestnenými pod časovo premenným magnetickým poľom. Vzhľadom k tomu, že vonkajšie vrstvy Ternefolu-D indukujú väčšie pretvorenie než PZT vrstvy v tradičnom  $d_{31}$  ohybovom móde, [8] bude PZT vrstva vytvárať väčší náboj. Časovo premenné magnetické pole môže byť vyvolané z okolitých vibrácií pomocou permanentného magnetu prichyteného buď ku konzolovému nosníku alebo k pružine. Tento hybridný prístup by mohol byť alternatívnym systémom pre základ PZT energy harvesting, ale spojenie dvoch mechanizmov a prenos zaťaženia medzi vzájomnými vrstvami znižuje účinnosť premeny. Nová trieda energy harvesting vibrácií bola navrhnutá, vyvinutá a testovaná na základe magnetostrikčného materiálu (MsM), Metglas 2605SC. Obsahuje dve submodely: MsM harvesting zariadenie viz. obr. 5.11 a) a energy harvesting obvod (obr. 5.10). V porovnaní s piezoelektrickými materiálmi ponúka Metglas rôzne výhody vrátane vyššej účinnosti premeny energie, dlhšie životné cykly, nedostatok depolarizácie a vyššiu flexibilitu v prostredí silných vibrácií. Pre zvýšenie účinnosti premeny energie a zmiernenie dôležitosti predpätia magnetického poľa sú Metglas pásiky (obr. 5.11b) priečne žiňané silným magnetickým poľom pozdĺž svojej šírky. MsM harvesting je zaradenie s elektromechanickým gyrátorom v sérii s cievkou. Energy harvesting obvod, ktorý je prepojený s bezdrôtovým snímačom a s ultrakapacitom, do ktorého sa hromadí nazbieraná energia, je na doske s plošnými spojmi (PCB) s rozmermi 25 mm x 35 mm (obr. 5.10).



**Obrázok 5.10:** Doska s plošnými spojmi s harvesting obvodom [8]

Skladá sa predovšetkým zo štvornásobného striedača, 3 F ultrakapacitora a inteligentného regulátora. Výstupné jednosmerné napätie z PCB je možné nastaviť v rozmedzí 2,0 – 5,5 V. V experimentoch je maximálny výstupný výkon a hustota energie [9] na odpore  $200\mu\text{V}$  a  $900\mu\text{W cm}^{-3}$  pri nízkej frekvencii 58 Hz. Pre testovaný prototyp pod vibráciami s rezonančnou frekvenciou 1,1 kHz a najvyšším zrýchlením  $8,06\text{ ms}^{-2}$  (0,82 g) je priemerný výkon a hustota výkonu počas nabíjania ultrakapacitora  $576\mu\text{W}$  a  $606\mu\text{Wcm}^{-3}$ , ktoré sú priaznivejšie ako piezoelektrické vibračné energy harvestre.



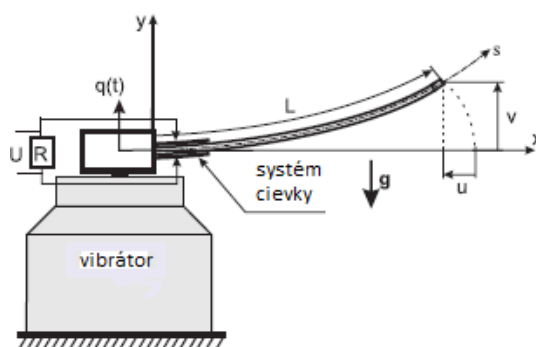
**Obrázok 5.11:** a) Prototyp MsM energy harvesting zariadenia b) Vrstvy MsM [8]

## 6 Analýza matematického popisu chovania magnetostrikčných materiálov

### 6.1 Energy harvesting na základe magnetostrikčného javu

Jedným zo základných princípov energy harvesting je pôsobenie vibrácií na magnetostrikčný materiál. Na obrázku 6.1 je schéma zariadenia, ktoré budí vibrácie na danom nosníku.

V nosníku, ktorý je z magnetostrikčného materialu, sa vplyvom vibrácií prejaví Villariho jav. Ohybový moment, ktorý pôsobí na nosník, vytvorí mechanické napätie. Napätie spôsobuje zmenu magnetizácie  $M_sM$ , čiže zmenu hustoty toku magnetického pola, čím sa v cievka okolo nosníka naindukujú napätie. Vystúpné napätie  $U$  z cievky je prevedené podľa Faradayovho zákona.



Obrázok 6.1: magnetostrikčný nosník pri budení vibráciami

### 6.2 Matematický popis energy harvesting zariadenia

Zavedením magnetostrikcie na element magnetického materiálu pomocou hustoty magnetického toku  $dB$ , môže dať jeden takýto prvok prácu  $dW_1$

$$dW_1 = HdB, \quad (15)$$

kde  $H$  je magnetické pole.

A súčasne pôsobí mechanické pretvorenie  $d\varepsilon$  na  $M_sM$ , mechanická práca  $dW_2$  dodaná elementu magnetostrikčného materiálu je:

$$dW_2 = \sigma d\varepsilon, \quad (16)$$

Ak vezmeme do úvahy reverzibilný systém, tak vnútorná zmena energie je:

$$dU = dW_1 + dW_2 \quad (17)$$

Všeobecné závislosti týkajúce sa magnetických a mechanických vlastností magnetostrikcie so zanedbaním tepelných účinkov sú popísané rovnicami (18) a (19)

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma, H) \quad (18)$$

$$B = B(\sigma, H) \quad (19)$$

Tieto linearizované konštitutívne rovnice [10] v jednej dimenzii môžu byť napísané vo forme

$$\varepsilon = s^H \sigma + \mathbf{d}H \quad (20)$$

$$B = \mathbf{d}^* \sigma + \mu^\sigma H \quad (21)$$

$s^H = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right|_H$  – elastické posunutia pri konštantnej intenzite magnetického poľa  $H$ ,

$\mu^\sigma = \left. \frac{\partial B}{\partial H} \right|_\sigma$  – magnetické permeability pri konštantnom mechanickom namáhaní  $\sigma$ ,

$\mathbf{d} = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_\sigma$  a  $\mathbf{d}^* = \left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_H$  – magnetomechanické koeficienty definované experimentálne (pre malé pretvorenia  $\mathbf{d} = \mathbf{d}^*$ )

Podrobnejšia rovnica sa dá rozpísať podľa normy ANSI IEEE 176 ako [11]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^H & s_{12}^H & s_{13}^H & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^H & s_{22}^H & s_{23}^H & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^H & s_{32}^H & s_{33}^H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{21} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$$

Vzťah  $\varepsilon = s^H \sigma$  predstavuje Hookov zákon pre lineárny materiál a pôvod z rovnice (20) je zo vzťahu  $B = \mathbf{d}^* \sigma$  pre magnetickú indukciu.

Konštitutívne rovnice inverzného modelu podľa publikácie [9] môžu byť prepísané ako:

$$\sigma = E^H - e \varepsilon \quad (22)$$

$$B = e^* + \mu^S H \quad (23)$$

Kde  $E^H$  je Youngov modul MsM pod vplyvom konštantného magnetického poľa,  $\mu^S$  je permeabilita za konštantného pretvorenia a konštanty  $e$  a  $e^*$  sú definované ako

$$e = E^H d \quad (24)$$

$$e^* = E^H d^* \quad (25)$$

V prípade, že vzťah medzi  $B$ ,  $H$ ,  $\sigma$  a  $\varepsilon$  je považovaný ako lineárny, potom vnútorná energia v MsM v priereze  $A$  a dĺžke  $dx$  je :

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l \sigma \varepsilon A dx + \frac{1}{2} \int_0^l H B A dx \quad (26)$$

Dosadením rovnice (21) do (26) za predpokladu, že hustota magnetického poľa pre elektromagnetickú cievku je  $H = Ni/l$ , potom má rovnica tvar:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l \sigma^2 s^H A dx + \int_0^l \frac{\sigma d N i A}{l} dx + \frac{1}{2} \int_0^l \frac{\mu^\sigma N^2 i^2 A}{l^2} dx \quad (27)$$

$$U = U_e + U_{me} + U_m \quad (28)$$

Kde  $U_e$  je vnútorná mechanická energia,  $U_{me}$  vnútorná magnetická energia a  $U_m$  vnútorná magnetoelastická energia.

magnetický tok:

$$\phi_m = \frac{\partial U}{\partial i} = \int_0^l \frac{\sigma dNA}{l} dx + \int_0^l \frac{\mu^\sigma N^2 i A}{l^2} dx \quad (29)$$

Prvý výraz popisuje magnetický tok vytvorený napätím  $\sigma$  od ohybového momentu  $M_g$  kým systém vibruje. Druhý výraz reprezentuje nabíjací proces, pokiaľ pôsobí prúd  $i$ . Tiež zahŕňa ekvivalentnú impedanciu  $L$  spojenú so budiacou cievkou okolo MsM nosníka, ktorý je:

$$L = \int_0^l \frac{\mu^\sigma N^2 A}{l^2} dx = \frac{\mu^\sigma N^2 A}{l}. \quad (30)$$

V prípade systému vibrácii, kde pôsobiaci prúd sa rovná nule, generovaný magnetický tok  $\phi_m$  z rovnice (29) je daný ako:

$$\phi_m = \frac{dNA}{l} \int_0^l \sigma dx \quad (31)$$

Ak vezmeme do úvahy, že vytvorený magnetický tok  $\phi_m$  je úmerný prúdu vzhľadom k indukčnosti  $L$  ako  $\phi_m = Li$ , tak vytvorený prúd pomocou budiacej cievky počas toho, keď systém vibruje je:

$$i = \frac{\phi_m}{L} = \frac{d}{\mu^\sigma N} \int_0^l \sigma dx \quad (32)$$

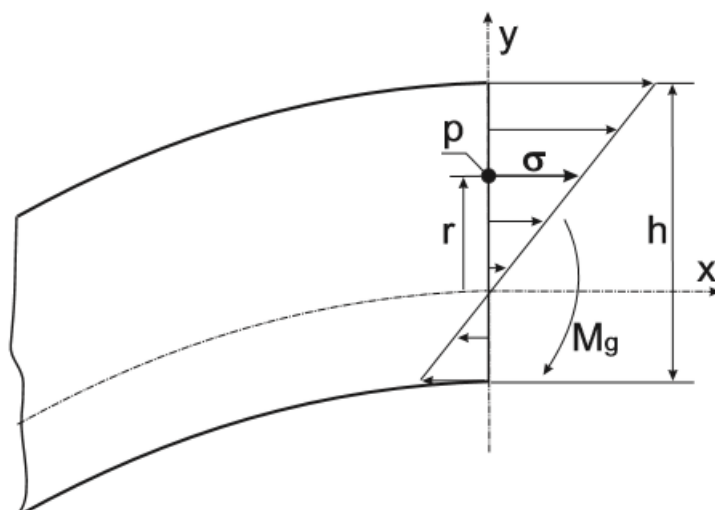
Výstupné napätie  $V$  zo budiacej cievky podľa Faradayovho zákona je:

$$V = \frac{d\phi_m}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dNA}{l} \int_0^l dx \right) \quad (33)$$

namáhanie

$$\sigma = \frac{M_g}{l_z} r \text{ a } M_g = EI_z \frac{\partial^2 v_p(x,t)}{\partial x^2} \quad (34)$$

kde  $M_g$  je ohybový moment,  $I_z$  predstavuje moment zotrvačnosti prierezu MsM nosníku,  $E$  je modul pružnosti nosníku. Na obrázku 6.2 je schematicky znázornenie zdeformovaného nosníku s lokálnym súradnicovým systémom, kde je znázornené pôsobiace napätie a ohybový moment. Rovnica (34) sa vzťahuje k bodu p, ktorý je na obrázku.



**Obrázok 6.2:** Deformácia magnetostrikčného materiálu pod ohybovým namáhaním

## 7 Záver

Hlavnou úlohou tejto bakalárskej práce je oboznámiť čitateľa s novodobým magnetostrikčným materiálom a poukázať na komplexnosť jeho použitia. Podrobne je opísaná fyzikálna vlastnosť, magnetostrikcia, týchto materiálov a taktiež vysvetlený princíp jednotlivých javov, ktoré môžu vzniknúť v magnetostrikčnom materiáli. Rešeršná časť sa zameriava na ponúknutie rôzneho spektra magnetostrikčných materiálov. Ich vlastnosti sú jednotlivo popísané a vysvetlené. Práca popisuje aj ich samotnú výrobu Terfenolu-D a problematiku, ktorou je napríklad nelinearita spôsobená hysteréziou.

Najrozšírenejším magnetostrikčným materiálom použitým v popísaných aplikáciách je Terfenol-D. Popísané sú použitia v bezkontaktných snímačoch, reakčného pohonu, štandardného aktuátora, lineárneho motora, ultrazvukový menič, elektro-hydraulického aktuátora, bezdrôtového lineárneho mikro-motora a magnetostrikčných bezkontaktných snímačov krútiaceho momentu. Obširnejšie je popísaná aplikácia energy harvesting (energia získaná z okolia a následne uložená) na princípe vibrácií s použitím materiálom Metglas 2605SC. Na základe energy harvesting je popísané matematické chovanie magnetostrikčného materiálu. Energy harvesting je v dnešnej dobe na sľubenej ceste, pretože pomocou inteligentných materiálov by vyriešil podstatný problém batérií a mnohé zariadenia by sa samonabíjali.

Použitím magnetostrikčných materiálov nastala nová éra bezkontaktných snímačov. Tieto materiály stále viac prenikajú do rôznych odvetví inžinierstva. Uplatnili sa v aplikáciách pre aktuátory, motory, meniče, ale aj v špecializovaných aplikáciách ako sú napríklad hydraulické systémy. Ich vývoj stále napreduje a každoročne sú tieto materiály testované a aplikované v nových zariadeniach s cieľom potlačiť ich nelinearitu a využiť ich prednosti.

## Literatúra

- [1] A. G. Olabi and A. Grunwald, "Design and application of magnetostrictive materials," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 2, pp. 469–483, 2008.
- [2] W. Mei, T. Okane, and T. Umeda, "Magnetostriction of  $\text{Tb--Dy--Fe}$  crystals," *J. Appl. Phys.*, vol. 84, no. 11, pp. 6208–6216, 1998.
- [3] N. Lupu, "Magnetostriction vs . Magnetoelastic Effects," 2007.
- [4] T. Zhang, B. T. Yang, H. G. Li, and G. Meng, "Dynamic modeling and adaptive vibration control study for giant magnetostrictive actuators," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 190, pp. 96–105, 2013.
- [5] P. Bobes-Limenes, J. A. García, J. Carrizo, M. Rivas, and J. C. Martínez-García, "Inverse Wiedemann effect in Fe-Al alloys for torque sensing applications," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 180, pp. 45–48, 2012.
- [6] F. Claeysen, N. Lhermet, R. Le Letty, and P. Bouchilloux, "Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials," *J. Alloys Compd.*, vol. 258, no. 1–2, pp. 61–73, Aug. 1997.
- [7] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 18–27, 2005.
- [8] L. Wang and F. G. Yuan, "Vibration energy harvesting by magnetostrictive material," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 4, p. 045009, Aug. 2008.
- [9] L. Wang and F. G. Yuan, "Vibration energy harvesting by magnetostrictive material," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 4, p. 045009, 2008.
- [10] M. Borowiec, "The energy harvesting systems of Macro Fiber composites and a magnetostrictive material modelling Outline Introduction The energy harvesting measurements Analysis of results Conclusions," 2016.
- [11] T. Ueno and S. Yamada, "Performance of Energy Harvester Using Iron–Gallium Alloy in Free Vibration," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 2407–2409, Oct. 2011.
- [12] CHUDÝ, Vladimír. "Meranie technických veličín". 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [13] BLOGSPOT. [online]. 2012, cit [05-22-2016]  
Dostupné z: <http://matrozinspiration.blogspot.cz/2012/05/magnetostrickne-materialy.html>
- [14] ALPHA [online]. cit [05-22-2016]  
Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/magnetostrickni-snimace/>
- [15] Talácko, J. "Mechatronika". Computer Press, Albatros Media a.s., Brno, 2016, 296 s. ISBN 802514173X, 9788025141731

- [16] ETREMA [online]  
Dostupné z: <http://www.etrema.com/>
- [17] ENERGEUSA [online]  
Dostupné z: <http://www.energenusa.com/>

## Zoznam symbolov, veličín a skratiek

Skratka	Význam	
PZT	Piezoelektrický materiál	
IC	Integrovaný obvod (Integrated Circuit)	
SMA	Zliatiny s tvarovou pamäťou (Shape Memory Alloys)	
MEMS	mikro-elektromechanické systémy	
MsM	magnetostrikčný materiál	
PCB	doska s plošnými obvodmi (printed circuit board)	
ppm	Parts per million	

Symbol	Rozmer	Veličina
$H$	[A/m]	intenzita magneticého poľa
$B$	[T]	magnetická indukcia
$\sigma$	[Pa]	mechanické napätie
$S$	[-]	mechanická deformácia
$E$	[Pa]	Youngov modul
$\mu^\sigma$	[-]	magnetická permeabilita pri konštantnom mechanickom napätí
$d_{33}$	[-]	magnetostrikčná konštanta
$c$	[-]	koeficient zhody
$\lambda$	[-]	magnetické pretvorenie
$I, i$	[A]	elektrický prúd
$N$	[-]	počet vinutí v cievke
$k_{33}$	[-]	coupling/väzbový koeficient
$Q_m$	[-]	faktor kvality
$F$	[N]	sila
$S_m$	[-]	tuhosť prvku

$A$	$[m^2]$	prierez
$\varepsilon$	$[-]$	mechanické pretvorenie
$l$	$[m]$	dĺžka vzorky
$\Delta l$	$[m]$	rozdiel dĺžok
$W$	$[J]$	mechanická práca
$U$	$[J]$	vnútorná energia
$s^H$	$[-]$	elastické posunutie pri konštantnej intenzite magnetického poľa
$\mathbf{d}$	$[-]$	magnetomechanický koeficient daný experimentálne pri konštantnom mechanickom napätí
$\mathbf{d}^*$	$[-]$	magnetomechanický koeficient daný experimentálne pri konštantnej intenzite magnetického poľa
$U_e$	$[J]$	vnútorná mechanická energia
$U_m$	$[J]$	vnútorná magnetoelastická energia
$U_{me}$	$[J]$	vnútorná magnetická energia
$\phi_m$	$[Wb]$	magnetický tok
$M_g$	$[Nm]$	ohybový moment
$I_z$	$[kg.m^2]$	moment zotrvačnosti
$L$	$[\Omega]$	impedancia

## Zoznam obrázkov

<b>Obrázok 2.1:</b> Predĺženie v závislosti na intenzite magnetického poľa .....	11
<b>Obrázok 2.2:</b> Schematické znázornenie orientácie domén .....	12
<b>Obrázok 2.3:</b> Predĺženie v závislosti na symetrickom magnetickom poli .....	12
<b>Obrázok 2.4:</b> Predĺženie niklovej tyče pôsobením magnetického poľa.....	13
<b>Obrázok 2.5:</b> Niklová tyč vložená do dutiny cievky.....	13
<b>Obrázok 3.1:</b> Magnetostrikčné javy .....	14
<b>Obrázok 4.1:</b> Zmena dĺžky v závislosti na dĺžke tyčky z Terfenolu-D.....	19
<b>Obrázok 4.2:</b> Pretvorenie závislé na magnetickom poli .....	21
<b>Obrázok 4.3:</b> $k_{33}$ a $d_{33}$ závislé na pôsobení napätia.....	21
<b>Obrázok 4.4:</b> Youngov modul v závislosti na magnetickom poli.....	22
<b>Obrázok 4.5:</b> Závislosť magnetického poľa pri zvyšovaní hustoty magnetického toku.....	24
<b>Obrázok 5.1:</b> Magnetické pole vytvorené prúdovým impulzom .....	26
<b>Obrázok 5.2:</b> Šírenie mechanickej vlny od permanentného magnetu.....	27
<b>Obrázok 5.3:</b> Reakčný hmotnostný pohon.....	27
<b>Obrázok 5.4:</b> Štandardný aktuátor .....	28
<b>Obrázok 5.5:</b> Lineárny motor.....	29
<b>Obrázok 5.6:</b> Zdroj zvuku .....	30
<b>Obrázok 5.7:</b> Elektro-hydraulický aktuátor .....	31
<b>Obrázok 5.8:</b> Bezdrôtový lineárny mikro-motor .....	31
<b>Obrázok 5.9:</b> Magnetostrikčné bezkontaktné snímače krútiaceho momentu.....	32
<b>Obrázok 5.10:</b> Doska s plošnými spojmi s harvesting obvodom [8] .....	35
<b>Obrázok 5.11:</b> a) Prototyp MsM energy harvesting zariadenia b) Vrstvy MsM [8].....	35
<b>Obrázok 6.1:</b> magnetostrikčný nosník pri budení vibráciami .....	36
<b>Obrázok 6.2:</b> Deformácia magnetostrikčného materiálu pod ohybovým namáhaním.....	39

## Zoznam tabuliek

<b>Tabuľka 4.1:</b> Používané materiály a ich vlastnosti.....	18
<b>Tabuľka 4.2:</b> Porovnanie pretvorenia .....	19
<b>Tabuľka 4.3:</b> Relatívna permeabilita .....	23
<b>Tabuľka 5.1:</b> Typy mechanizmov v energy harvesting .....	33