# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2012

Zbyněk Sixta

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 - Elektrotechnika a informatika Studijní obor: 2612R011 - Elektronické informační a řídicí systémy

# Akční člen využívající materiálů pevné fáze Actuator using the properties of solid state materials

Bakalářská práce

Autor:

Zbyněk Sixta

Vedoucí práce:

prof. Ing. Jaroslav Nosek, CSc.

V Liberci 18. 5. 2012

#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Akademický rok: 2011/2012

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	Zbyněk Sixta
Osobní číslo:	M09000082
Studijní program:	B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Elektronické informační a řídicí systémy
Název tématu:	Akční člen využívající vlastností materiálů pevné fáze
Zadávající katedra:	Ústav mechatroniky a technické informatiky

Zásady pro vypracování:

- 1. Proveďte rešerši současného stavu akčních členů využívajících vlastností materiálů pevné fáze, a to z hlediska konstrukčního uspořádání a výsledných mechanických posunutí a sil.
- 2. Seznamte se s možnostmi měření malých mechanických posunutí (v rozsahu 0,1–300  $\mu{\rm m})$ a výsledných sil (1–50 N).
- Navrhněte experimentální pracoviště, které umožní ověřit základní vlastnosti akčního členu (aktuátoru) AP100S.
- 4. Proveďte experimentální ověření vlastností aktuátoru AP100S.
- 5. Navrhněte úlohu pro laboratorní cvičení předmětu "Převodníky fyzikálních veličin".

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace Rozsah pracovní zprávy: cca 40-50 stran Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická Seznam odborné literatury:

- [1] Maixner, L. a kol.: Mechatronika (kap. 4), Computer Press Brno, 2006.
- [2] www stránky fy CEDRAT Grenoble, 2011.
- [3] ĎAĎO,S., KREIDL,M.: Měřicí převodníky fyzikálních veličin. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999.
- [4] UCHINO,K.: Ferroelectric Devices. Marcel Decker, Inc., New York, Basel, 2000.
- [5] ĎAĎO,S., KREIDL,M.: Senzory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996.

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jaroslav Nosek, CSc. Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: Termín odevzdání bakalářské práce: 18. května 2012

14. října 2011

Nº Kyec

prof. Ing. Václav Kopecký, děkan



doc. Ing. Petr Tůma, CSc. vedoucí ústavu

V Liberci dne 14. října 2011

#### Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum

Podpis

#### Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jaroslavovi Noskovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů a za veškerou pomoc při řešení a vypracování bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Janu Linhartovi z Katedry Fyziky TUL za poskytování cenných rad a pomoc při experimentálním měření.

# ANOTAČNÍ ZÁZNAM

AUTOR	Zbyněk Sixta			
STUDIJNÍ OBOR	Elektronické informačn	Elektronické informační a řídicí systémy		
NÁZEV PRÁCE	Akční člen využívající v	Akční člen využívající vlastností materiálů pevné fáze		
VEDOUCÍ PRÁCE	prof. Ing. Jaroslav Nose	ek, CSc.		
FAKULTA	Mechatroniky, informatiky a mezioborových studií	ROK ODEVZDÁNÍ	2012	
POČET STRAN	52			
POČET OBRÁZKŮ	30			
POČET TABULEK	6	6		
POČET PŘÍLOH	2			
	·			
STRUČNÝ POPIS	Tato práce se zabývá problematikou akčních členů využívající vlastností materiálů pevné fáze. V práci jsou popsány akční členy z hlediska konstrukčního uspořádání, výsledných mechanických posunutí a sil. Dále možnosti měření malých mechanických posunutí a sil. Cílem této bakalářské práce je navrhnout experimentální pracoviště a ověřit základní vlastnosti aktuátoru APA 100S.			
KLÍČOVÁ SLOVA	aktuátor, blokovací charakteristika	síla, LVDT senzor,	posunutí, zatěžovací	

### ANNOTATION

AUTHOR	Zbyn	Zbyněk Sixta			
FIELD	Elect	Electronic Information and Control Systems			
THESIS TITLE	Actu	Actuator using the properties of solid sate materials			
SUPERVISOR	prof.	Ing. Jaroslav Nose	ek, CSc.		
INSTITUTE			YEAR	2012	
NUMBER OF PAGES		52			
NUMBER OF PICTURES		30			
NUMBER OF TABLES		6			
NUMBER OF APPENDICES		2			
SUMMARY	The thesis deals with the actuators using the properties of solid state materials. The paper summarized the actuators in terms of structural configuration, the resulting mechanical displacement and forces. Furthermore, the possibility of measuring small mechanical displacement and forces. The aim of this bachelor thesis is to design and to realize of an experimental workplace to verify the basic properties of the actuator APA 100S.				
KEY WORDS	actua	ntor, blocked force,	, displacement, load char	acteristic, LVDT sensor	

### OBSAH

SEZ	NAM	POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
ÚVO	D		10
1	REŠF	RŠE SOUČASNÉHO STAVU AKČNÍCH ČLENŮ VYUŽÍVAJÍCÍ	СН
VLA	STN(	DSTÍ MATERIÁLŮ PEVNÉ FÁZE	11
1.1	Ак	ČNÍ ČLENY Z HLEDISKA KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ	11
	1.1.1	Samostatná piezoelektrická destička s elektrodami	11
	1.1.2	Vicevrstvý akční člen	12
	1.1.3	Akční člen typu bimorf	13
	1.1.4	Piezohydraulický akční člen	13
	1.1.5	DPA	14
	1.1.6	<i>PPA</i>	15
	1.1.7	APA	16
	1.1.8	SPA	17
1.2	AK	ČNÍ ČLENY Z HLEDISKA VÝSLEDNÉHO MECHANICKÉHO POSUNUTÍ A SÍLY	18
2	MOŽ	NOSTI MĚŘENÍ MALÝCH MECHANICKÝCH POSUNUTÍ	
- (V R	OZSA	AHU 0,1–300 μm) A VÝSLEDNÝCH SIL (1–50 N)	20
2.1	SEN	ZORY POSUNUTÍ	20
	2.1.1	Indukčnostní senzorv	20
	2.1.2	Kapacitní snímače	22
	2.1.3	Optoelektronické senzorv	24
2.2	2 Sen	IZORY SÍLY	27
	2.2.1	Senzorv sílv s převodem deformace na polohu	28
	2.2.2	Senzory síly s přímým převodem deformace	28
<b>.</b>	NT Á X71	DI EVDEDIMENTÁLNÍHO DDA COVIČTĚ VTEDÉ UMOŽNÍ	
э OVĚ	ŇĂVI ŘIT 2	KH EAPERIMENTALNIHO PRACOVISTE, KTERE UMOZNI ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI AKTUÁTORU APA 1008	31
2.1	74		21
3.1	ZAP	KLADNÍ VLASTNOSTI AKTUATORU APA 1005	31
3.2		AZENI POUZIII LVDI SENZORU	
3.3	ME	RICI PRISTROJE A SOFTWAROVE PROSTREDKY POUZITE V EXPERIMENTU	
3.4	• KO	NSTRUKCE MECHANICKY TUHEHO RAMU PRO UPEVNENI AKTUATORU	35
3.5	) USE	PORADANI MERICIHO PRACOVISTE	37

4	E	XPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ AKTUÁTORU APA 100S	38
	4.1	PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY	38
	4.2	ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY	42
	4.3	NAZNAČENÍ VÝPOČTU PIEZOELEKTRICKÉHO KOEFICIENTU $d_{11}$	43
	4.4	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A KATALOGOVÝCH HODNOT A DISKUZE	44
5	N	ÁVRH ÚLOHY PRO LABORATORNÍ CVIČENÍ PŘEDMĚTU	
<b>,,</b> ]	PŘE	VODNÍKY FYZIKÁLNÍCH VELIČIN"	46
Z	ÁVĚ	R	47
S	EZN	AM LITERATURY	48
S	EZN	AM OBRÁZKŮ	49
S	EZN	AM TABULEK	50
<b>S</b> ]	EZN	AM PŘÍLOH	50

## Seznam použitých zkratek a symbolů

## Zkratky:

APA	Amplified Piezoelectric Actuator (zesílený piezoelektrický aktuátor)
Cu	chemická značka mědi
DPA	Direct Piezo Actuator (přímý piezo aktuátor)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (lineární diferenciální transformátor)
MLA	Multilayer Actuator (vícevrstvý aktuátor)
OVS	optický vláknový senzor
PPA	Parallel Prestressed Actuator (paralelní předpjatý aktuátor)
PTFE	Polytetrafluorethylen (obchodní název teflon)
PZT	materiály na bázi tuhých roztoků oxidů olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti)
SAW	Surface Acoustic Wave (povrchová akustická vlna)
Si	chemická značka křemíku
SPA	Stepping Piezo Actuator (krokový piezo aktuátor)

### Symboly:

$d_{i\lambda}$	složky tenzoru piezoelektrických koeficientů [m/V], kde i = 1, 2,
	$3 a \lambda = 1, 2,6$
d	posunutí aktuátoru [m]
$E_i$	složky tenzoru intenzity elektrického pole [V/m], kde i = 1, 2, 3
$ec{F}$	síla [N]
U	elektrické napětí [V]

### Úvod

Akční člen je důležitou součástí každé mechatronické soustavy, který má za úkol převést vstupní veličinu na mechanický výstup. V posledních letech se pro konstrukci rychlých a přesných převodníků využívají tzv. inteligentní materiály, které i mimo jiné využívají přeměny elektrické energie na mechanickou. Do této skupiny patří i akční členy využívající vlastností materiálů pevné fáze. Aktuátory se používají v mnoha průmyslových odvětvích, například ve zdravotnictví nebo v automobilovém průmyslu. Základem aktuátorů, o kterých tato práce pojednává, je obrácený piezoelektrický jev.

V první kapitole je popsán současný stav akčních členů využívající vlastností materiálů pevné fáze. Aktuátory jsou zde rozděleny podle uspořádání konstrukce, výsledných mechanických posunutí a vyvozujících sil. Nejvíce jsem se věnoval popisu akuátorů typu APA navrhnuté francouzskou firmou CEDRAT TECHNOLOGIES.

Druhá kapitola je zaměřena na možnosti měření malých mechanických posunutí do stovek µm a výsledných sil do 50 N. Jsou zde popsány indukčnostní, kapacitní a optoelektronické snímače posunutí. Dále popisuje různé druhy senzorů pro měření sil.

V kapitole 3 jsou uvedeny základní vlastnosti aktuátoru APA 100S. Je zde popsána metoda měření a navrhnutá konstrukce pro ověření základních vlastností tohoto aktuátoru. Dále jsou zde popsány všechny použité přístroje, pomůcky a také postup měření jednotlivých charakteristik.

Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny grafy naměřených převodních a zatěžovacích charakteristik. Jsou zde vysvětleny důvody hystereze a nelineární odezvy v převodní charakteristice. Dále jsou zde rozebrány zatěžovací charakteristiky a je odvozena blokovací síla a maximální posunutí aktuátoru.

V poslední kapitole jsem vytvořil úlohu pro předmět "Převodníky fyzikálních veličin". Tato úloha má za úkol studenty seznámit s aktuátorem APA 100S a provést experimentální měření jeho základních vlastností.

Cílem bakalářské práce je seznámení se s problematikou akčních členů využívající vlastností materiálů pevné fáze a ověření určitých vlastností zadaného aktuátoru APA 100S. S tím souvisí stanovení vhodné metody měření těchto vlastností a návrh experimentálního pracoviště.

# 1 Rešerše současného stavu akčních členů využívajících vlastností materiálů pevné fáze

Akční členy, které pro vyvolání silových účinků na výstupu (např. mechanické posunutí, síla, deformace) využívají vlastností vybraných inteligentních materiálů, můžeme označit názvem aktuátory pevné fáze. Tyto převodníky mohou být na vstupu buzeny elektrickým nebo magnetickým polem, mechanickým napětím, teplem nebo světlem. Transformace těchto materiálů probíhá na základě známých fyzikálních jevů, které jsou uvedeny v tabulce 1. [7]

Výstupní veličina Vstupní veličina Využitelný jev Elektrické pole E [V/m] Obrácený piezoelektrický jev deformace Magnetické pole B [T] Magnetostrikce deformace Mechanické napětí T [N] Elastické vlastnosti deformace Teplo [J] Tepelná roztažnost deformace Světlo [lx] deformace Fotostrikce

Tab. 1: Nejvýznamnější fyzikální jevy využitelné pro aktuátory pevné fáze

Zdroj: [7]

V této kapitole budu popisovat elektroaktivní látky, které vykazují deformaci vyvolanou elektrickým polem, v důsledku nepřímého (obráceného) piezoelektrického jevu. Vlastnosti těchto látek jsou proto použitelné pro konstrukci akčních členů.

Připomínám, že v takové látce může vzniknout i přímý piezoelektrický jev, kdy se elektrické pole vyvolá mechanickým napětím působící na těleso zhotovené z piezoelektrického materiálu. Tento jev se využívá při konstrukci určitých senzorů mechanických veličin.

#### 1.1 Akční členy z hlediska konstrukčního uspořádání

#### 1.1.1 Samostatná piezoelektrická destička s elektrodami

Je to nejjednodušší akční člen s posuvným pohybem (obr. 1). Napětí Upřivedené na elektrody vytvoří mezi nimi elektrické pole o intenzitě  $E_3 = U/h$ , kde h je tloušťka destičky. Destička se zdeformuje ve směru svislé osy  $X_3$ , ve kterém bude efektivní piezoelektrický koeficient  $d_{33}$ . Mechanické posunutí tohoto členu je opakovatelné s velkou přesností, ale je však velmi malé (řádově nm až μm) a závisí na velikosti koeficientu elektromechanické vazby použitého materiálu.

Výsledná jednoosá deformace

$$S_3 = \frac{\Delta h}{h} = d_{33}E_3, \tag{1}$$

kde  $S_3$  je deformace ve směru osy X<sub>3</sub>,  $\Delta h$  posunutí piezoelektrické destičky ve směru osy X<sub>3</sub> a *h* tloušťka destičky,

Mechanické posunutí ve směru X3 je dáno vztahem

$$\Delta h = d_{33}U, \qquad (2)$$

kde h je tloušťka destičky a U napájecí napětí.



Zdroj: [7] Obr. 1. Mechanické posunutí ∆h úměrné elektrickému poli E<sub>3</sub>

#### 1.1.2 Vícevrstvý akční člen

Někdy nazýván také multilayer. Je to akční člen se zvětšením mechanického posunutí. Zvyšuje účinnost převodu elektrické a mechanické formy energie a zmenšuje napájecí napětí při stejném výkonu. Výsledné posunutí *n* destiček s posunutím  $\Delta_1$ u každé, dává celkové posunutí  $\Delta_{celk} = n \Delta_1$ . Na obr. 2 je zobrazeno schematické uspořádání piezoelektrického aktuátoru typu multilayer s nejčastější konfigurací elektrod mezi piezoelektrickými vrstvami. Vícevrstvý akční člen MLA od firmy CEDRAT TECHNOLOGIES (Grenoble, Francie) má tloušťku piezokeramické vrstvy 100 pm a elektroda uvnitř keramiky 2 pm.



Zdroj: [1] **Obr. 2. Struktura vícevrstvého aktuátoru** 

#### 1.1.3 Akční člen typu bimorf

Využívá ohybovou deformaci vetknutého nosníku, složeného ze dvou elektroaktivních materiálů. Uspořádání bimorfu (obr. 3) vykazuje relativně velká posunutí až stovky µm. Tento člen se používá například jako mikropumpa pro lékařské přístroje. "Bimorfy se používají jako aktuátory (převodníky elektrického signálu na mechanické posunutí) v pletacích strojích při zvedání jehel nebo v jednotkách pro převod slepeckého Braillova písma do počítače." [6]



Zdroj: [1] Obr. 3. Akční člen typu bimorf

#### 1.1.4 Piezohydraulický akční člen

Podstatnou částí je piezokeramický válec naplněný nestlačitelnou kapalinou. Radiální elektrické pole válce je vytvořeno pomocí elektrod, které jsou připevněny na vnějším a vnitřním povrchu válce. Při aktivaci piezoelektrického válce dojde k jeho radiální deformaci a kapalina v objemu válce vytlačí pracovní píst menšího průměru z válce. Výsledná síla a mechanické posunutí pístu odpovídají hydraulickému převodu systému. Nevýhodou je pomalejší odezva systému a problémy spojené s těsností pístu. Uspořádání částí piezohydraulického válce je zobrazeno na obr. 4. [7]



Zdroj: [7] Obr. 4. Piezohydraulický akční člen

#### 1.1.5 DPA

Zkratka DPA je složena z počátečních písmen anglického názvu Direct Piezo Actuator. Název přeložený do češtiny znamená přímý piezoelektrický aktuátor. Tyto aktuátory nemají nijak zvětšené mechanické posunutí.



Zdroj: [3] Obr. 5. a) Uspořádání piezo členu v DPA, b) Fotografie DPA

Vlastní pouzdro zajišťuje sériové předpětí piezoelektrického členu pomocí tuhé pružiny. Piezoelektrický člen je většinou tvaru disku a využívá tloušťkovou deformaci. Pro zvětšení výsledné tloušťkové deformace mohou být disky uspořádány obdobně jako multilayer (obr. 5a). Válcové pouzdro udržuje vše pohromadě a chrání piezoelektrický materiál. Posunutí je úměrné napájecímu napětí v rozsahu 170 V. Typická deformace aktuátoru je 0,1 % (1 µm/mm), ale jejich posunutí je omezeno na 100 µm. Výhodou jsou velké síly, které dosahují až 3,5 kN. DPA jsou snadno identifikovatelné podle jejich válcového tvaru pouzdra (obr. 5b). Výška těchto aktuátorů od firmy CEDRAT TECHNOLOGIES se pohybuje v rozmezí od 50 mm do 110 mm. V průměru měří 25 mm a jejich hmotnost je od 150 g do 310 g. [3]

#### 1.1.6 PPA

Zkratka PPA je složena z počátečních písmen anglického názvu Parallel Prestressed Actuator. Přeložený název znamená paralelní předpjatý aktuátor. Tyto aktuátory mají takové uspořádání konstrukce, která v klidovém stavu zajišťuje určité mechanické předpětí, potřebné pro eliminaci nesouosých deformací. Využívají piezoelektrického koeficientu d<sub>33</sub>. Posunutí je úměrné napájecímu napětí v rozsahu 170 V. Typická deformace aktuátoru je 0,1 % (1 µm/mm), ale jejich posunutí je omezeno na 100 µm. Výhodou jsou velké síly, které dosahují až 1 kN. PPA jsou levnější a kompaktnější než DPA a mají mnohem lepší dynamické chování než DPA. Výška těchto aktuátorů od firmy CEDRAT TECHNOLOGIES se pohybuje od 18 mm do 140 mm. Jejich hmotnost je v rozmezí od 6 g do 384 g. [3]



Zdroj: [3] Obr. 6. Aktuátor typu PPA

#### 1.1.7 APA

Pod obchodním označením APA společnosti CEDRAT TECHNOLOGIES rozumíme Amplified Piezoelectric Actuator. Přeložený název znamená piezoelektrický aktuátor se zvětšením mechanického posunutí. Tento typ aktuátoru má patent a ochrannou známku společnosti CEDRAT TECHNOLOGIES. Patří do skupiny "moonies". Tento název vznikl podle tvaru konstrukce, která se skládá ze dvou půlměsíců, tvořených pružnými ocelovými lamelami. Jejich mechanické předpětí je uvolňováno malým mechanickým posunutím akčního piezoelektrického členu. Jako akční člen umístěný uvnitř konstrukce se používá vícevrstvá PZT keramika, u jednoduchého prvku pak podélný piezoelektrický jev. Konstrukce má za úkol převést malé posunutí akčního členu na několikanásobně větší posunutí. Akční člen je předpjatý podél hlavní osy eliptické konstrukce, která je zhotovena z nerezové oceli. Životnost aktuátoru za cyklických podmínek je více než 10<sup>10</sup> cyklů plného zdvihu. Zesílený posun je úměrný napětí v rozsahu 170 V. Výhodou je poměrně velký posun v kombinaci s vysokými silami a kompaktní velikostí podél aktivní osy. To vede k deformaci větší než 1 % (10 μm/mm). Proto jejich zdvih může dosáhnout až 1 mm. [3]



Zdroj: [3] **Obr. 7. Chování aktuátoru APA** 

Aktuátor má lineární ovládání tahem. To znamená, že při přivedení napětí na aktuátor se zmenšuje jeho výška podél vedlejší osy eliptické konstrukce. Tato vlastnost je vidět na obr. 7, kde tečkovaná čára znázorňuje strukturu v klidu a plná čára strukturu deformovanou piezoelektrickým efektem. [3]

Na obr. 8 je popsán aktuátor APA 100S. Pro představu velikosti má tento aktuátor délku 25 mm, výšku 10 mm, šířku 9 mm a váží 4,2 g. Cena aktuátoru je asi

18 tis. Kč. Každý aktuátor typu APA má různé rozměry, velikost posunutí, velikost blokovací síly a různou hmotnost. Velikost aktuátorů APA se pohybuje v rozmezí od 4 mm do 214 mm a hmotnost od pouhých 0,15 g do 650 g. [3]



Zdroj: [3] Obr. 8. Aktuátor APA 100S

#### 1.1.8 SPA

Zkratka SPA je složena z počátečních písmen anglického názvu Stepping Piezoelectric Actuator. Přeložený název zní krokové piezoelektrické aktuátory. SPA jsou piezoelektrické motory s dlouhým lineárním zdvihem pro aplikace mikro/nano polohování. Využívají aktuátory typu APA, protože mají rychlý čas odezvy, schopnost odolávat vnějším vibracím, robustní konstrukci a dobré dynamické vlastnosti. Používá nahromadění malých kroků pro polohování. Mezi každým krokem je pohon uzamčen v pozici. Může pracovat v režimu pro jemné nastavení, i když se provádí operace s dlouhým zdvihem. Zdvih je úměrný přiloženému napětí, což vede k rozlišení jednotek nm. [3]

Příkladem SPA je na zakázku zhotovený miniaturní piezoelektrický motor pro lékařské implantáty kompatibilní s magnetickou rezonancí, obr. 9b. Na tento motor nemá vliv magnetické pole a vyhovuje testu magnetické rezonance. Jeho hmotnost je menší než 1 g. Dosahuje zdvihu až 3 mm s řízením rychlosti od 0 do 70 mm/s. Blokovací síla v klidu je kolem 0,5 N a síla v průběhu ovládání až 0,2 N. [3]



Zdroj: [3] Obr. 9. a) Princip posunu SPA, b) Příklad miniaturního SPA

#### 1.2 Akční členy z hlediska výsledného mechanického posunutí a síly

Tab. 2 popisuje různé typy aktuátorů podle výsledného mechanického posunutí a velikosti působící síly. Velikosti posunutí a sil závisí na výrobci. Akční členy MLA, DPA, PPA, APA a SPA jsou výrobky firmy CEDRAT TECHNOLOGIES.

Akční člen	Posunutí	Síla	
piezo destička	řádově nm až μm	desetiny N	
multilayer	jednotky až stovky µm	stovky až tisíce N	
bimorf	desítky až stovky µm	jednotky N	
MLA	až 20 µm	stovky N až 4000 N	
DPA	desítky µm	až 3500 N	
PPA	až 130 µm	stovky N až 7000 N	
APA	desítky µm až 1000 µm	jednotky N až 1900 N	
SPA	až 5000 µm	jednotky N	

Tab. 2	2: P	Posunutí	a	síla	akčních	členů
--------	------	----------	---	------	---------	-------

Zdroj: [3]

#### Příklady použití aktuátorů s posuvným pohybem:

- a) aktivní potlačování vibrací
- b) miniaturní polohovací zařízení
- c) řízené obtékání profilů těles
- d) nastavení polohy snímací hlavy videorekordérů
- e) inteligentní tlumiče automobilů
- f) vstřikovací jednotky spalovacích motorů

# 2 Možnosti měření malých mechanických posunutí (v rozsahu 0,1–300 μm) a výsledných sil (1–50 N)

#### 2.1 Senzory posunutí

#### 2.1.1 Indukčnostní senzory

"Indukčnostní senzory jsou pasivní senzory, v nichž je měřená veličina převáděna na změnu indukčnosti (jedna cívka, tzv. tlumivkové senzory) nebo vzájemné indukčnosti (nejméně dvě cívky – tzv. transformátorové senzory). Magnetický obvod senzorů může být otevřený nebo uzavřený, uspořádání jednoduché nebo diferenciální." [2]

#### • Indukčnostní senzory s proměnnou vzduchovou mezerou

Základní uspořádání senzoru je na obr. 10. Mění se velikost vzduchové mezery v rozmezí  $d\pm\Delta d$  a měří se posuv x. Můžeme zanedbat rozptylový tok mimo vzduchovou mezeru, pokud je d<<a href="mailto:a.a."><a href="mailto:downation-complex: mailto: mailto: mailto: mailto: mailto: mailto: complex: mailto: complex: mailto: mailto: complex: mailto: c



Zdroj: [2] Obr. 10. Indukčnostní senzor mezerový

#### • Indukčnostní senzory transformátorové (LVDT)

Základem těchto senzorů je změna vzájemné indukčnosti M mezi primárními a sekundárními cívkami. Podobně jako u transformátoru je primární cívka napájena ze zdroje střídavého napětí, takže výstupní napětí sekundární cívky je úměrné měřené veličině. Změnu vzájemné indukčnosti M lze měřeným posuvem ovlivnit několika způsoby. Nejčastější je otevřený magnetický obvod s posuvným jádrem, jak ukazuje uspořádání lineárního diferenciálního transformátorového snímače LVDT na obr. 11. Na obr. 11a je zobrazen řez LVDT (P – primární vinutí, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> – sekundární vinutí) a v části obr. 11b je schéma náhradního obvodu tohoto senzoru. [2]



Zdroj: [2] Obr. 11. Lineární diferenční transformátorový senzor posunutí

Na obr. 12 jsou vyneseny průběhy vzájemných indukčností  $M_1$ ,  $M_2$ , výsledný rozdíl těchto indukčností  $M_1-M_2$  a výstupní napětí  $U_{V0}$  LVDT snímače v závislosti na poloze jádra. Výhodou senzorů tohoto typu je rozlišení směru posuvu. Jádro má uvnitř cívky minimální tření, to znamená, že senzor zatěžuje měřenou soustavu minimálně. Má téměř neomezenou životnost, protože neobsahuje žádné mechanické kontakty. Dále má velkou přesnost a dosahuje linearity až 0,1 %. Výhodou je, že při překročení rozsahu nedojde k poškození, jelikož dutina je průchozí. [2]



Zdroj: []

Obr. 12. Závislost vzájemných indukčností a výstupního napětí na poloze LVDT senzoru

Vinutí sekundáru jsou zapojena proti sobě, to znamená, že výstupní napětí naprázdno  $U_{v0}(j\omega)$  je rozdíl obou napětí sekundárů. Platí vztah

$$U_{V0}(j\omega) = j\omega \left(M_1 - M_2\right) \frac{U_z(j\omega)}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{U_z(j\omega)}{R_1} \cdot \frac{j\omega \left(M_1 - M_2\right)}{1 + j\omega\tau},$$
(3)

kde  $\tau = L_l/R_l$  je časová konstanta primárního obvodu.  $U_{VO}(j\omega)$  je nezávislé na  $\omega$ při napájení zdrojem napětí. Napětí  $U_{VO}(j\omega)$  je nenulové při  $\Delta l = 0$  a důvodem jsou vyšší harmonické primárního proudu a také parazitní kapacita mezi primárem a sekundárem. [2]

#### 2.1.2 Kapacitní snímače

Metoda využívá převod měřené veličiny na změnu parametru určujícího kapacitu kondenzátoru. Ta je dána geometrií elektrod (plocha, vzdálenost) a permitivitou prostoru, v němž se uzavírá elektrické pole. V případě rovinného deskového kondenzátoru platí pro kapacitu vztah

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}, \tag{4}$$

kde *C* je kapacita kondenzátoru,  $\varepsilon_0$  permitivita vakua,  $\varepsilon_r$  poměrná permitivita, *S* účinná plocha elektrod a *d* vzdálenost elektrod.

Základní typy kapacitních snímačů jsou uvedeny v přehledu v tab. 3 spolu se vztahy pro výpočet kapacity.

Mezerové kapacitní senzory jsou vhodné pro měření malých posunutí do 1 mm. Změna kapacity způsobená změnou vzdálenosti vzduchové mezery *d* je dána vztahem

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d + \Delta d} - \frac{\varepsilon \cdot S}{d} = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \cdot \frac{-\Delta d}{d + \Delta d},\tag{5}$$

kde  $\Delta C$  je změna kapacity snímače,  $\varepsilon$  permitivita materiálu mezi elektrodami, *S* účinná plocha elektrod, *d* vzdálenost elektrod a  $\Delta d$  změna velikosti vzduchové mezery.

Diferenční kapacitní mezerový snímač (tab. 3 – druhý řádek), spojený s rozdílovým měřicím obvodem, je popsán vztahem

$$C_1 - C_2 = C + \Delta C - (C - \Delta C) = 2\Delta C; \qquad \frac{C_1 - C_2}{C} = -2\frac{\Delta d}{d} \left[ 1 - \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 - \dots \right].$$
(6)

Z tohoto vztahu vyplývá dvojnásobné zvýšení citlivosti diferenciálním uspořádáním senzoru.

Tab.	3:	Kapacitní	snímače	posunutí
------	----	-----------	---------	----------

Typ snimače	schéma	funkční vztahy	charakteristika
deskový jednoduchý s proměnnou mezerou		$C = \varepsilon \frac{S}{d(x)};  \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)$	C .
deskový diferenční s proměnnou mezerou		$ \begin{array}{l} C_1 = \varepsilon \frac{S}{d(x)}; \\ C_2 = \varepsilon \frac{S}{d(x)}; \end{array} \qquad \qquad \frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq - \frac{C}{d} \bigg[ 1 + 2 \bigg( \frac{\Delta d}{d} \bigg)^2 \bigg] \end{array} $	,×, C, C,
deskový s vrstvou dielektrika s proměnnou mezerou		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2}}; \qquad \frac{\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2} \cdot \frac{1}{N} - \frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2}}{N = \frac{\varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}}$	°
deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)}$	c'
deskový s proměnnou plochou překryti		$C = \epsilon \frac{S(x)}{d};  \frac{\Delta C}{\Delta \ell} \doteq -\frac{C_{max}}{l_{max}} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right)$	° /

Typ snimače	schema	funkční vztahy	charakteristika
deskový s proměnnou plochou překryti		$\mathbf{C} = \varepsilon \frac{\mathbf{S}(\mathbf{x})}{\mathbf{d}};  \frac{\Delta \mathbf{C}}{\Delta t} \doteq -\frac{\mathbf{C}_{max}}{t_{max}} \left[ 1 + \left(\frac{\Delta \mathbf{d}}{\mathbf{d}}\right)^2 \right]$	
deskový diferenční s proměnnou plochou překrytí dielektrika	$\begin{bmatrix} z_1 & \mathbf{x} \\ \mathbf{x} \\$	$C = \frac{\epsilon_1 S}{d_1 + d_2} \left[ 1 + \frac{\ell(x)}{\ell_{max}} \cdot \frac{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \right]$	C.
válcový s proměnnou plochou překryti	×	$C = \epsilon \frac{2\pi \cdot \tilde{t}(x)}{ln \frac{D_1}{D_2}};  \frac{\Delta C}{\Delta \tilde{t}} \doteq -\frac{C_{max}}{\tilde{t}_{max}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$	
diferenčni s proměnnou plochou překryti	°∕≓~~	$C = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d}$	

Zdroj: [2]

#### 2.1.3 Optoelektronické senzory

"Pro měření posuvu lze obecně využít jakoukoliv posunem ovlivněnou závislost mezi výstupní veličinou detektoru a parametry zdroje optického záření. Posuv objektu může vyvolat:

- \* změnu polohy zdroje světelného záření,
- \* zastínění světelného toku mezi zdrojem a detektorem světelného záření,
- \* změnu úhlu odrazu paprsku zdroje,
- \* interferenci vyslaného a odraženého paprsku." [2]

#### • Polohově citlivé senzory PSD

"Jsou určeny pro aplikace, kdy měřená veličina ovládá polohu světelné stopy. Podstatou senzoru PSD je generování párů elektron – díra v intristické vrstvě velkoplošné fotodiody PIN při dopadu světelné stopy na její čelní plochu (obr. 13a). Elektrické pole na přechodu PI a NI vyvolá posuv děr k vrstvě P a elektronů k vrstvě N. Můžeme vyjít z představy, že při dopadu světla generované páry nábojů představují zdroj proudu  $I_0$  působící v místě dopadu světelné stopy, pak tečou proudy nakrátko v levé ( $I_A$ ) a pravé ( $I_B$ ) elektrodě. Základním předpokladem je rovnoměrné rozložení odporu vrstvy P." [2]

Na obr. 13 je uveden princip řádkového PSD senzoru a jeho zjednodušený náhradní obvod.



Zdroj: [2] Obr. 13 a) Princip řádkového PSD senzoru, b) náhradní obvod

#### Optoelektronické senzory polohy na interferometrickém principu

Interferometrická měření jsou nejvhodnější pro měření velmi malých mechanických posunutí elektroaktivních prvků v řádu nm. "Základní princip senzorů využívající jevu skládání neboli interference světelných vln je v uspořádání známém jako Michelsonův interferometr na obr. 14." [2]



Zdroj: [2] **Obr. 14 Michelsonův interferometr** 

"Svazek rovnoběžných paprsků dopadá pod úhlem 45° na polopropustnou plochu. Zde se část světla odráží k pevnému (referenčnímu) zrcadlu a část postupuje k pohyblivému (měřicí, spojené s měřeným objektem). Paprsky odražené od obou zrcadel se vektorově sčítají na polopropustné ploše. Intenzita osvětlení v tomto místě je měřena optoelektronickým senzorem." [2]

#### • Dvojitý laserový interferometr (Michelsonův)

"Na přesnost interpolace má zásadní vliv amplituda intenzity elektrického pole obou paprsků  $|\vec{E}_1|, |\vec{E}_2|$ . Nulové intenzity osvětlení lze dosáhnout pouze při rovnosti obou složek, to však je prakticky nerealizovatelné, jelikož počet průchodů děličem svazku je pro paprsky různý a prostředí v dráze měřicího paprsku i koeficient odrazivosti objektu se mění. Dále v základním uspořádání nelze rozeznat směr pohybu." [2]

"Dvojitý Michelsonův interferometr na obr. 15 řeší tyto nedostatky zavedením dalšího optického kanálu, v němž se používá svazku posunutého o  $\lambda/4$  (dvojnásobný průchod vrstvou zpožďující o  $\lambda/8$ , tj. 45°). Při posuvu měřicího zrcadla (koutového

odražeče) o měřený úsek  $\Delta x$  vznikají na výstupu fotodiod signály úměrné sin  $\beta \Delta x$ a cos  $\beta \Delta x$ , z nichž se vyhodnotí směr pohybu a poloha jemně." [2]



Zdroj: [2] Obr. 15. Dvojitý Michelsonův interferometr

"Popsaná modifikace Michelsonova interferometru je vhodná pro realizaci technologii integrované optiky na jednom Si čipu. Kanály (světlovou) jsou realizovány jako dielektrické vrstvy s různým indexem lomu (obdoba světelných vláken). Integrovaný interferometr je udržován na stálé teplotě elektronickým termoregulátorem a lze dosáhnout rozlišení řádově až 10 nm." []

#### • Dvoupaprskový laserový interferometr (Mach-Zehnderův)

Je to poupravený Mach-Zehnderův interferometr, který byl vylepšen a je umístěn v Laboratoři laserové interferometrie na Technické univerzitě v Liberci. Tento interferometr (obr. 16) je vhodný pro měření tloušťkových deformací tenkých piezoelektrických vrstev, nanesených na Si substrátu. Uspořádání umožňuje eliminovat deformaci Si substrátu, která by měření tloušťkové deformace tenké vrstvy znehodnocovala. Typická tloušťka tenké vrstvy je 1 µm, tloušťka Si substrátu 380 µm, deformace PZT tenké vrstvy v ose  $X_3$  je v řádu pm, případně nm.

"Optické části jsou opatřeny antireflexními vrstvami, aby odražené paprsky nevytvářely při dopadu na fotodiodu parazitní signál. K nastavení fázového rozdílu mezi větvemi interferometru je použit fázový modulátor, vyrobený v Laboratoři laserové interferometrie a založený na krystalu LiNbO<sub>3</sub>, namísto standardně používaného piezoelektrického aktuátoru. Další podmínkou bylo měřit v širokém rozsahu teplot, zvláště potom při nízkých teplotách, blízkých teplotě kapalného He. Byl sestrojen miniaturní interferometr, který byl celý vložen dovnitř kryostatu. Umístěním interferometru do kryostatu se částečně eliminoval i problém teplotních nehomogenit. U Mach-Zehnderova interferometru, používaného pro měření deformací tenkých piezoelektrických vrstev, bylo nutné redukovat počet optických prvků. To si vyžádalo konstrukci nového typu interferometru, který je i patentován." [5]



Zdroj: [5] Obr. 16. Dvojitý Mach-Zehnderův interferometr

"V laboratoři laserové interferometrie jsou měřena posunutí, vyvolaná obráceným piezoelektrickým jevem, v rozmezí od  $2 \cdot 10^{-12}$  m do  $10^{-5}$  m v rozsahu teplot 160 K až 330 K s užitím héliového kryostatu s uzavřeným cyklem a v rozsahu 270 K až 450 K s pomocí vyhřívané komůrky. Dále jsou měřeny i elektro-optické koeficienty v teplotním rozsahu 100 K až 330 K." [5]

#### 2.2 Senzory síly

Princip těchto senzorů je založen na využití fyzikálních účinků síly. Podle Newtonova zákona ( $F(t) = m \cdot a$ ) vyvolávají časově proměnné síly zrychlení *a*, hmotnosti *m*. Pro senzory statických sil se ve většině případů užívá jejich obecných deformačních účinků na objekt vhodného tvaru a složení. [2]

#### 2.2.1 Senzory síly s převodem deformace na polohu

Využívají pružné členy, ale navržené tak, aby působící síla vyvolala co největší změnu polohy některého významného bodu tohoto členu (měří celkovou deformaci). Výsledná poloha se většinou snímá pomocí indukčnostních a kapacitních senzorů. Průhyb konstrukce nosníku je typicky měřen diferenčním transformátorovým senzorem polohy (LVDT). Většinou se jako pružný člen používá pružný rám tvaru prstence s jádrem a pouzdrem LVDT senzoru upevněným na protilehlých místech prstence. Uspořádání tohoto senzoru je zobrazeno na obr. 17. [2]



Zdroj: [2] Obr. 17. Prstencový pružný člen se senzorem LVDT

#### 2.2.2 Senzory síly s přímým převodem deformace

Tyto senzory jsou založeny na principu převodu deformace na jiné fyzikální veličiny.

#### • Piezoelektrické senzory síly

Fyzikální podstatou těchto senzorů je přímý piezoelektrický jev, který spočívá v polarizaci některých krystalických nebo i polykrystalických dielektrik, v tomto případě ke vzniku elektrického náboje Q působením mechanické síly či tlaku. Piezoelektrické, resp. feroelektrické látky vykazující přímý nebo nepřímý piezoelektrický jev jsou využívány pro konstrukci senzorů nebo aktuátorů. Využití obou jevů vede k realizaci piezoelektrických rezonátorů.

V piezoelektrických senzorech působí mechanické napětí buď kolmo na elektrody (podélný jev) nebo rovnoběžně s jejich rovinou (příčný jev). Další využívanou možností je smyková deformace (střihový jev), jejíž výhodou je větší citlivost. Tyto tři možnosti piezoelektrického jevu jsou zobrazeny na obr. 18. [2]



Zdroj: [2] Obr. 18. Podélný, příčný a střihový piezoelektrický jev

V měřicí technice se nejčastěji využívá křemen (SiO<sub>2</sub>), který v modifikaci vykazuje velmi dobré vlastnosti mechanické, elektrické i chemické, a to až do teploty 573 °C. Křemen této modifikace krystalizuje v trigonálně trapezoidální skupině (třída 32). Monokrystal křemene má tři základní osy, jež jsou pro popis piezoelektrického jevu velmi důležité. Podélná osa z se nazývá optická, osy x protínající hrany kolmo na optickou osu jsou elektrické a osy y, které jsou kolmé k osám x a ose z označujeme jako mechanické nebo neutrální.

Typické materiály pro piezoelektrické senzory (ale i aktuátory a rezonátory) patří do některé z následujících skupin: [2]

- \* monokrystaly bez středu symetrie (např. křemen SiO<sub>2</sub>),
- \* polarizované polykrystalické látky (polarizovaná piezoelektrická keramika jako tuhý roztok typu PZT – zirkonát olova PbZrO<sub>3</sub>, titaničitan olovnatý PbTiO<sub>3</sub>)
- \* polarizované organické polymery (např. polyvinylidendifluorid)
- Rezonanční senzory sil

Základním principem rezonančních senzorů je závislost mechanické rezonanční frekvence pružného prvku na deformaci vyvolané působením síly. Diferenciálním uspořádáním "strun" se dosahuje nelinearity 0,03 %. Senzory s povrchovými akustickými vlnami (PAV, anglicky SAW) využívají změn parametrů vlnění, šířícího se

z hřebenovité struktury vysílače do místa přijímače. Hřebenovité obrazce elektrod vytvořené na základní destičce generují na vysílací straně synchronní deformaci. Vzniká povrchová akustická vlna Rayleighova typu, šířící se k přijímacímu měniči, kde se na principu přímého piezoelektrického jevu mění vlnění na elektrický signál. [2]

Tyto senzory lze použít pouze při specifické frekvenci, závislé na rozměrech vzorku. Tuto nevýhodu odstraňují subrezonanční metody. Ty pracující v širokém rozsahu frekvencí a měří deformaci v jednom směru.

#### • Senzory síly s optickými vlákny (OVS)

Mechanická deformace optického vlákna má za následek změnu podmínek šíření světelného svazku, protože se mění geometrie jádro – plášť, a také index lomu (účinek mechanického napětí). Účinky jsou různé podle toho, zda jde o deformaci podél nebo kolmo na osu světlovodu. [2]

Na povrchu tělesa deformovaného silou je v senzoru s OVS úsek optického vlákna s odkrytým jádrem přilepen speciálním lepidlem. Podélné uspořádání obr. 19a je citlivější. Síla působící kolmo na osu světlovou obr. 19b. Citlivost senzorů se dá výrazně zvýšit aplikací jednovidových vláken.



Zdroj: [2]



#### • Senzory síly na fotoelastickém principu

"U některých přirozených nebo umělých transparentních materiálů vzniká dvojlom světelného svazku při působení mechanického napětí. Rychlost světla se mění v závislosti na směru šíření vzhledem ke směru hlavních napětí a současně na velikosti rozdílu mezi hlavními napětími. Aplikace tohoto jevu spočívá v prosvětlování transparentního modelu zkoumaného objektu polarizovaným světlem. Pozoruje se obrazec tmavých a světlých oblastí, ukazující rozdělení napětí. Tyto senzory se používají jen zřídka." [2]

# 3 Návrh experimentálního pracoviště, které umožní ověřit základní vlastnosti aktuátoru APA 100S

V této kapitole jsou uvedeny základní katalogové údaje aktuátoru APA 100S a návrh experimentálního pracoviště pro ověření určitých vlastností. Dále jsou zde popsány použité přístroje a blokové schéma jejich propojení. Je zde také zmíněno pracoviště s LVDT senzorem.

#### 3.1 Základní vlastnosti aktuátoru APA 100S

Zadaný aktuátor APA 100S je výrobek firmy CEDRAT TECHNOLOGIES. Katalogový list jsem k aktuátoru neobdržel a v současnosti chybí i na stránkách společnosti CEDRAT TECHNOLOGIES. Katalogový list aktuátoru APA 100S jsem dohledal (tab. 4) [4] a právě experimentální měření má ověřit určité vlastnosti.

Typ aktuátoru	APA 100S
Posunutí	130 µm
Blokovací síla	19,5 N
Tuhost	0,15 N/µm
Rezonanční frekvence (volný – volný)	6900 Hz
Doba odezvy (volný – volný)	0,10 ms
Rezonanční frekvence (blokovaný – volný)	1400 Hz
Doba odezvy (blokovaný – volný)	0,5 ms
Rozsah napětí	–20 V až 150 V
Kapacita	1,00 μF
Rozlišení	13 nm
Tepelně-mechanická konstanta	0,96 μm/K
Výška	10,0 mm
Délka	25 mm
Šířka (včetně hrany)	9,0 mm
Hmotnost	4,2 g
Standardní mechanická rozhranní	2 ploché povrchy 3 × 5 mm se závitem velikosti M2
Standardní elektrické rozhranní	2 PTFE izolované AWG30 vodiče 100 mm dlouhé s banánkem Ø 1 mm

#### Tab. 4: Vlastnosti aktuátoru APA 100S

Zdroj: [4]

Aktuátor má lineární ovládání tahem. To znamená, že při přivedení napětí na aktuátor, se zmenšuje jeho výška podél vedlejší osy eliptické konstrukce (další informace viz kapitola 1.1.7).

#### 3.2 Zvážení použití LVDT senzoru

Z počátku jsem pro vyhodnocování výsledného posunutí měřeného aktuátoru APA 100S zvažoval použití LVDT senzoru. V laboratoři na Katedře Fyziky (KFY) bylo k dispozici pracoviště s LVDT senzorem. Toto pracoviště, viz obr. 20, bylo na KFY navrženo pro měření mechanických posunutí na tenkých vrstvách. Součástí pracoviště je blok vyrobený z mědi (obr. 20 popisek 10), který je určen k udržování konstantní teploty měření. Uvnitř tohoto bloku je v oleji ponořen měřený vzorek. Výška konstrukce je přibližně 110 mm.

Uspořádání tohoto pracoviště nebylo vhodné pro daný typ aktuátoru APA 100S, protože by bylo možné měřit pouze nezatížený aktuátor. Navíc by bylo nutné vyrobit nový měděný blok pro umístění aktuátoru, ale problém se zatěžováním by se stejně nevyřešil. Proto jsem se rozhodl zvolit vhodnější a zároveň jednodušší řešení, kterým je optický měřicí přístroj MTI-2100 Fotonic Sensor.



Obr. 20. LVDT na KFY

Popis jednotlivých částí pracoviště obr. 20: 1 – LVDT senzor, 2 – stupnice, 3 – pružina, 4 – přívod vysokého napětí, 5 – jezdec, 6 – kolejnička, 7 – měřený vzorek uvnitř Cu bloku, 8 – izolace, 9 – vyhřívání Cu bloku, 10 – Cu blok

#### 3.3 Měřicí přístroje a softwarové prostředky použité v experimentu

#### **Program Agilent VEE Pro**

Využil jsem připravený program, který komunikoval se zdrojem napětí KEITHLEY 6517. Program umožňuje nastavit rozsah napětí, velikost kroku, který se bude přičítat až do maximální nastavené hodnoty napětí, dále počet cyklů měření a dobu, po kterou bude přiložena každá hodnota napětí. Nastavuje se rovněž konstanta pro přepočet výstupního napětí sondy na výsledné posunutí.

#### **KEITHLEY 6517 electrometer/high resistance system**

Je to víceúčelový měřicí přístroj, který obsahuje i zdroj napětí o maximálním výkonu 1 W.

#### TREK MODEL 610D high voltage power supply amplifier controller

Je to vysokonapěťový zesilovač, jehož stejnosměrné výstupní napětí se může pohybovat v rozsahu od 0 V až do  $\pm 10$  kV. Výstupní proudový rozsah je v mezích od 0 do  $\pm 2000 \mu$ A.

#### **MTI-2100 Fotonic Sensor**

Na KFY jsem měl k dispozici přístroj na měření malých mechanických posunutí a tím byl tento optický senzor. MTI-2100 Fotonic Sensor je dvoukanálový optický měřicí systém, který používá bezkontaktní metodu měření posunutí a měření vibrací. Použitím technologie optických vláken přístroj MTI-2100 nezatěžuje měřený objekt a měření není ovlivněno magnetickým ani elektrickým polem. Výměnné měřicí sondy MTI-2100 se snadno přizpůsobí měnícím se požadavkům aplikací. Dostupné měřicí sondy jsou kalibrovány a naprogramovány při výrobě a nabízejí široký rozsah měřicích možností. Přístroj je schopen měřit posunutí v rozmezí od 0,25 nm do 5 mm na frekvencích v rozsahu od stejnosměrného napětí až do 500 kHz.

Pro měření jsem používal standardní měřicí sondu, která je určená pro měření posunutí na odrazných plochách. Typická citlivost standardních sond se pohybuje v rozsahu od méně než 0,025 μm/mV do více než 1 μm/mV. Specifická citlivost sondy je vyznačená na konektoru a na izolaci optického kabelu. Maximální lineární rozsah se pohybuje od 0,1 mm do více než 5 mm. Frekvenční rozsah od stejnosměrného napětí až do 190 kHz.

Konkrétně jsem používal standardní měřicí sondu MTI-2047R. Její průměr je 1,194 mm a aktivní průměr je 0,686 mm. Maximální frekvenční rozsah pro útlum 3 dB je 130 kHz a výstupní šum signálu je maximálně 10 mV<sub>p-p</sub>. Sondou lze měřit na rozsahu 1 nebo na rozsahu 2. Každý rozsah má jiné parametry, které jsou uvedeny v tab. 5.

MTI-2047R	Rozlišení (µm)	Citlivost (µm/mV)	Lineární rozsah (mm)	Odstup (mm)	Optická špička - střed (mm)	Optická špička - šířka (mm)
Rozsah 1	0,01	0,02	0,127	0,127	0,457	0,127
Rozsah 2	0,1	0,203	1,016	1,118	0,457	0,127

Tab. 5: Vlastnosti standardní sondy MTI-2047R

Zdroj: [8]

Rozsah 1 má vyšší rozlišení a vyšší citlivost než rozsah 2, ale rozsah 2 má lineární charakteristiku v širším pásmu. Na obr. 21 je kalibrační křivka sondy, což je závislost výstupního napětí sondy na vzdálenosti sondy od měřeného objektu. Při měření jsem používal rozsah 2, protože při počáteční kalibraci se sonda nastaví na střed měřícího rozsahu a vyhodnocuje se posunutí v rozmezí poloviny tohoto rozsahu do kladných a záporných hodnot. Měřená hodnota by se mohla dostat mimo rozsah, tzn. do nelineární části charakteristiky.



Zdroj: [8] Obr. 21. Typická kalibrační křivka sondy

Na obr. 22. jsou zobrazeny tři možné způsoby zakončení optických vláken v sondě. Při měření jsem používal sondu MTI-2047R, která používá náhodné (R) rozmístění přijímacích a vysílacích optických vláken. Černé body představují přijímací vlákna a naopak světlé body vysílací vlákna.



Zdroj: [8] Obr. 22. Rozložení vláken v sondě

#### 3.4 Konstrukce mechanicky tuhého rámu pro upevnění aktuátoru

Hlavními požadavky na vlastnosti konstrukce byla tuhost samotné konstrukce a možnost zároveň měřit posunutí aktuátoru při působení definované síly na aktuátor. Konstrukci jsem navrhnul tak, aby bylo možno měřit posunutí aktuátorů působící tlakem i tahem.

Základem konstrukce je ocelová 8 mm tlustá deska, na které je vše uspořádáno. V jedné části této základny je z ocelového jeklu 25 × 25 mm vytvořena konstrukce obdélníkového průřezu vyčnívající do výšky 203 mm nad základnu a tato konstrukce je přivařena k základně. Na opačné straně základny je vytvořena další konstrukce z ocelového jeklu 25 × 25 mm, také obdélníkového průřezu vyčnívající do výšky 130 mm a také přivařena k základně. Na vrcholu této nižší konstrukce je umístěn hrot a z každé strany hrotu zarážka jako zabezpečení před případným sklouznutím páky působící silou na aktuátor. Tyto dvě obdélníkové konstrukce jsou na každé straně spojeny pásem ocelového plechu 25 × 3 mm, aby měla konstrukce vyšší tuhost. Aktuátor se připevní pomocí šroubu na spodní stěnu jeklu vyšší konstrukce. Celková hmotnost konstrukce je 5,38 kg. Na celou konstrukci byla aplikována povrchová úprava nátěrem. Technický výkres konstrukce je uveden v příloze č. 1.

Aktuátor APA 100S vyvíjí sílu tahem, takže pro změření zatěžovací charakteristiky se musí na daný aktuátor zavěsit závaží, aby síla vyvolaná závažím

působila proti síle vyvolané samotným aktuátorem. Pomocí šroubu se na spodní část aktuátoru umístí přípravek z plechu ve tvaru písmene H s dvěma výřezy, které slouží k zavěšení závaží. Používal jsem vždy dva kusy závaží o hmotnostech 20 dkg, 50 dkg, 1 kg a 2 kg. Vyrobil jsem dva kusy těchto přípravků. První přípravek váží 52,7 g a je určen pro dva kusy závaží do celkové hmotnosti 2 kg. Druhý přípravek byl vyroben dodatečně pro závaží o celkové hmotnosti 4 kg a jeho hmotnost je 58 g.

Jak jsem již dříve zmínil, tak tato konstrukce tuhého rámu je navržena i pro měření zatěžovací charakteristiky takového aktuátoru, který vyvíjí sílu tlakem. Při tomto měření by bylo vhodné celou konstrukci připevnit pomocí šroubů k pevnému podkladu. Daný aktuátor se pomocí šroubu připevní na stejné místo jako v předchozím případě. K vyvození síly působící na aktuátor se použije páka zhotovená také z ocelového jeklu 25 × 25 mm. Poměr ramen páky je 1:1 a délka jednoho ramene je 200 mm. Jedno rameno páky se přišroubuje k aktuátoru a na druhé rameno páky se zavěšuje závaží, jehož hmotnost je úměrná zatěžovací síle.



Obr. 23. Měřicí přípravek a tuhý rám s aktuátorem APA 100S

Popis jednotlivých částí pracoviště obr. 23: 1 – konstrukce, 2 – aktuátor APA 100S, 3 – přípravek pro zavěšení závaží, 4 – materiál s dobrou odrazivostí, 5 – optická sonda, 6 – dvojice závaží

#### 3.5 Uspořádání měřicího pracoviště

Aktuátor je připevněný na již zmiňovanou konstrukci tuhého rámu. Je napájen stejnosměrným napětím v mezích od –20 V do 150 V. Programem z PC se řídí velikost napětí zdroje, které je dále zesíleno v zesilovači. Při měření jsem nastavil krok 2 V a dobu přiložení napětí 1 s. Akorát pro zátěž 4 kg jsem dobu přiložení napětí zvýšil na 3 s, aby se výsledné posunutí ustálilo na určité hodnotě. Pro každou hodnotu napětí se odečte 5 hodnot posunutí a vypočte se průměrná hodnota, která se zapíše do souboru společně s přiloženým napětím. Dále se v programu nastaví konstanta pro použitý rozsah měřicí sondy, která má hodnotu 0,18567 μm/mV.

Měřicí sondu jsem umístil kolmo pod aktuátor, do vzdálenosti přibližně 1 mm, což je střed rozsahu 2 kalibrační křivky sondy MTI-2047R. Na aktuátor jsem musel nalepit folii s dobrou odrazivostí, aby výstupní napětí sondy dosáhlo optické špičky v kalibrační křivce, viz obr. 21. Z měřicího přístroje MTI-2100 Fotonic Sensor je výstupní napětí sondy přivedeno do počítače, kde se vyhodnocuje výsledné posunutí úměrné tomuto napětí. Na obr. 24. je nakresleno blokové schéma propojení jednotlivých přístrojů.



Obr. 24. Blokové schéma propojení přístrojů

#### 4 Experimentální ověření vlastností aktuátoru APA 100S

V této kapitole jsou popsány naměřené výsledky aktuátoru APA 100S. Jsou zde uvedeny převodní charakteristiky pro působení různě velkých sil na aktuátor. Dále pro různé hodnoty napájecího napětí zatěžovací charakteristika, ze které je odečtena blokovací síla  $F_b$  a posuntí  $d_0$ .

Převodní charakteristika d=f(U) je závislost výsledného posunutí na napájecím napětí. Zatěžovací charakteristika d=f(F) je závislost výsledného posunutí na velikosti vyvozené síly. Blokovací síla  $F_b$  je minimální velikost síly, která zcela zablokuje posunutí aktuátoru při nejvyšším napájecím napětí. Posunutí  $d_0$  je maximální posunutí nezatíženého aktuátoru při nejvyšším napájecím napětí.

Podmínkou průběhu měření byl klid v laboratoři, protože otřesy způsobené došlápnutím na podlahu by ovlivnily naměřené výsledky. Měřicí pracoviště bylo totiž umístěno v prvním patře budovy a silnější otřes podlahy nebo stolu rozkmital aktuátor se závažím a otřes byl zaznamenán na takovémto malém posunutí. Měření probíhalo při pokojové teplotě 24 °C, barometrickém tlaku 994 hPa a relativní vlhkosti 48 %.

#### 4.1 Převodní charakteristiky

Charakteristiky jsou změřeny pro zatěžovací síly 0 N, 0,52 N, 2,53 N, 4,44 N, 10,3 N, 20,1 N a 39,8 N. Pro každou zatěžovací sílu jsou jednotlivé charakteristiky proměřeny od 0 V do 150 V s krokem 2 V. Na obr. 25 jsou tyto charakteristiky vyneseny pro daný aktuátor APA 100S.

Všechny charakteristiky mají na začátku měření při přiloženém napětí 0 V výsledné posunutí nulové. Při postupném zvyšování napětí se zvyšuje i posunutí, ale průběh není lineární. Výsledkem je naměřená charakteristika s určitou hysterezí. Z obr. 25 je vidět, že zatěžovací síla snižuje maximální výsledné posunutí.



Obr. 25. Naměřené převodní charakteristiky

Všechny charakteristiky na obr. 25 mají podobný tvar, kromě charakteristiky při zátěži 39,8 N. Daný tvar je možná způsoben velkým zatížením, protože blokovací síla uváděná v dostupném katalogovém listu je 19,5 N. Větší zatěžovací sílu aktuátoru jsem nezkoušel měřit, protože jsem měl obavy, jestli by tak velkou zátěž udržel šroub M2 a jestli by nezpůsobila aktuátoru nevratné deformace.

Na obr. 26 je vynesena převodní charakteristika pro zatěžovací sílu 20,1 N v rozmezí napájecího napětí od 0 V do 150 V. V grafu jsou vykresleny dva po sobě následující cykly. Druhý cyklus začíná v koncovém bodě prvního, což je o hodnotu posunutí 4,2  $\mu$ m výše než první cyklus a celý druhý cyklus je o tuto hodnotu posunut s maximální odchylkou ±5  $\mu$ m.



Obr. 26. Naměřená převodní charakteristika pro sílu 20,1 N

Na obr. 27 jsou vyneseny charakteristiky pro zatěžovací síly 0 N a 2,53 N v rozmezí napájecího napětí od –20 V do 150 V. Vykreslena je vlastně jedna smyčka s počátečním a koncovým bodem při napájecím napětí 0 V.



Obr. 27. Naměřené převodní charakteristiky pro síly 0 N a 2,53 N

Při nezatíženém aktuátoru je maximální posunutí 117,9 μm. Při působící síle 2,53 N je sklon charakteristiky menší a aktuátor dosáhne menšího maximálního

posunutí 104,7  $\mu$ m. Toto platí i pro záporné hodnoty napětí, kdy u nezatíženého aktuátoru dosahuje maximální posunutí –11,4  $\mu$ m a při působící síle 2,53 N je maximální posunutí –4,8  $\mu$ m. Po změření jedné smyčky zůstane aktuátor na určité hodnotě posuntí. Při nezatíženém aktuátoru zůstalo posunutí na hodnotě –1,9  $\mu$ m a při působící síle 2,53 N bylo zbytkové posunutí 3,5  $\mu$ m.

Na obr. 28 je vynesena charakteristika pro zatěžovací sílu 2,53 N v rozmezí napájecího napětí od -20 V do 150 V. V grafu jsou vykresleny dva po sobě následující cykly. Druhý cyklus začíná o hodnotu posunutí 3,5 µm výše než první cyklus a celý druhý cyklus je o tuto hodnotu posunut s maximální odchylkou ±1 µm.



Obr. 28. Naměřená převodní charakteristika pro sílu 2,53 N

Na obr. 29 je vynesena charakteristika pro zatěžovací sílu 20,1 N v rozmezí napájecího napětí od 0 V do -20 V. V grafu jsou vykresleny dva po sobě následující cykly. Aktuátor má na opačnou stranu výchylku  $-10 \mu m$ , ale po prvním cyklu zůstane posunutí na hodnotě  $-2 \mu m$ . Druhý cylkus je užší než první a rozdíl počátečního a koncového bodu je 0,5  $\mu m$ .



Obr. 29. Naměřená převodní charakteristika pro sílu 20,1 N

#### 4.2 Zatěžovací charakteristiky

Na obr. 30 jsou vyneseny zatěžovací charakteristiky pro napájecí napětí aktuátoru 150, 140, 126, 100, 80 a 60 V. V grafu jsou vynesena výsledná posunutí odpovídající měřeným silám 39,8 N, 20,1 N, 10,3 N, 4,44 N, 2,53 N, 0,52 N a 0 N. Na jednotlivé křivky pro konstantní napětí je použita lineární interpolace, pomocí níž lze zjistit blokovací sílu. Ideálně by tyto zatěžovací charakteristiky měly být rovnoběžné. Přímky pro napájecí napětí 150 V a 140 V jsou rovnoběžné, přímka pro napětí 126 V má o něco menší sklon, ale ostatní přímky mají výrazně znatelný menší sklon. Různý sklon těchto zatěžovacích charakteristik je z určité míry způsoben hysterezí a částečně odlišným tvarem převodní charakteristiky pro 39,8 N. V části převodní charakteristiky pro napájecí napětí 80 až 100 V, dosahuje charakteristika pro zátěž 39,8 N stejného posunutí jako charakteristika pro 20,1 N, a to z určité míry ovlivňuje sklon zatěžovacích charakteristik. Při nižším napájecím napětí, např. 60 V se výsledné posunutí pro různá zatížení liší o menší hodnotu, než při vyšším napájecím napětí a tím je ovlivněn sklon zatěžovací charakteristiky. Pro zatěžovací síly do 2,53 N je pokles naměřené zatěžovací charakteristiky strmý oproti vyšším zatěžovacím silám. Tyto hodnoty také ovlivňují výsledný sklon interpolované zatěžovací charakteristiky.

Blokovací síla je odečtena z charakteristiky pro napájecí napětí 150 V a dosahuje hodnoty 172 N. Maximální naměřené posunutí  $d_0$  aktuátoru APA 100S má hodnotu 117,9 µm a maximální posunutí zjištěné lineární interpolací má hodnotu 109 µm.



Obr. 30. Naměřené zatěžovací charakteristiky

#### 4.3 Naznačení výpočtu piezoelektrického koeficientu d<sub>11</sub>

Složky tenzoru piezoelektrického koeficientu  $d_{i\lambda}$  jsou definovány [9] pomocí parciální derivace deformace  $S_{\lambda}$  podle elektrického pole  $E_i$ , indexy nabývají hodnot i = 1, 2, 3 a  $\lambda$  = 1, 2, ...6

$$d_{i\lambda} = \frac{\partial S_{\lambda}}{\partial E_i} , \qquad (7)$$

kde symbol  $S_{\lambda}$  značí deformaci vyjádřenou pomocí tenzoru druhého řádu,  $E_i$  značí intenzitu elektrického pole vyjádřenou tenzorem prvního řádu (což je vektor). [9]

Výpočet piezoelektrického koeficientu  $d_{11}$  vícevrstvého akčního členu aktuátoru APA 100S, který se skládá z *n* destiček, využívá již zkráceného indexového značení podle [9]

$$n \cdot d_{11} = \frac{d_1}{L \cdot E_3}$$
 [m/V], (8)

kde *n* je počet vrstev piezoelektrického akčního členu,  $d_I$  posunutí piezoelektrického členu aktuátoru v délce, to je v ose X<sub>1</sub>, *L* délka piezoelektrického členu aktuátoru v ose X<sub>1</sub> a  $E_I$  intenzita podélného elektrického pole v ose X<sub>1</sub> vyvolaná elektrickým napětím, přiloženým na elektrody. Koeficient  $d_{II}$  nelze vypočítat z tohoto vztahu bez znalosti posunutí  $d_I$ . Bylo by možné posunutí  $d_I$  změřit, ale výsledky měření by nejspíš byly ovlivněné elastickými vlastnostmi samotné konstrukce ocelových lamel aktuátoru, jež vykazují potřebná mechanická posunutí. Pro věrohodně změřené hodnoty posunutí  $d_I$ by se musel piezoelektrický elektroaktivní člen vyjmout z konstrukce, čímž by se ale celý aktuátor zničil.

Maximální intenzita podélného elektrického pole aktuátoru APA 100S by se nechala vypočítat z následujícího vztahu

$$E_1 = \frac{U}{w} = \frac{150}{1 \cdot 10^{-6}} = 150 \ MV/m, \tag{9}$$

kde *U* je maximální napájecí napětí aktuátoru v ose  $X_1$  a *w* tloušťka jedné destičky vícevrstvého piezoelektrického členu v ose  $X_1$ . Budu-li předpokládat tloušťku jedné destičky *w* 1 µm, vyjde maximální intenzita podélného elektrického pole 150 MV/m.

#### 4.4 Porovnání naměřených a katalogových hodnot a diskuze

Tab. 6 pro porovnání katalogových údajů a naměřených hodnot. Katalog uvádí hodnotu posunutí 130 µm, ale měřením jsem zjistil hodnotu o 9,3 % nižší. Experimentálním měřením a lineární interpolací jsem zjistil hodnotu blokovací síly 172 N, což je hodnota mnohem vyšší než uváděná v katalogu. Přesnost stanovení hodnoty blokovací síly velmi závisí na přesnosti stanovení jednotlivých bodů závislosti mechanického posunutí na vyvozené síle. Poněvadž se naměřené hodnoty pohybují v oblasti malých mechanických posunutí, každá nepřesnost v jejich stanovení (např. drobná vůle ve šroubovém připevnění aktuátoru k měřicímu rámu) se projeví ve významné změně směrnice přímky zatěžovací charakteristiky a v důsledku v určení hodnoty blokovací síly (viz obr. 30). Dalším možným faktorem ovlivňující naměřené hodnoty mechanického posunutí můžou být i drobné otřesy způsobené např. chůzí člověka. Náhodné změny světelných podmínek v okolí měřicí sondy optického přístroje mohou také ovlivnit naměřené hodnoty mechanického posunutí projeví významnou změnou směrnice přímky zatěžovací

charakteristiky. Tyto změny by se případně nechali eliminovat umístěním pracoviště na místo s konstantními světelnými podmínkami.

Parametr	Katalogový údaj	Naměřený údaj
Posunutí d₀ [μm]	130	117,9
Blokovací síla F <sub>b</sub> [N]	19,5	172
Tuhost [N/µm]	0,15	1,45
71		

Tab. 6: Porovnání naměřených a katalogových hodnot APA 100S

Zdroj: [4]

Vztah (9) ukazuje na relativně velkou hodnotu intenzity elektrického pole v piezoelektrickém členu aktuátoru. Naměřené výsledky (zvláště převodní charakteristiky) ukazují právě na nelineární chování a hysterezi aktuátoru APA 100S, typické pro PZT piezoelektrickou polarizovanou keramiku, případně pro obdobný feroelektrický materiál. Tento nelineární efekt lze dobře ovládat použitím odpovídající zpětnovazební elektroniky, která linearizuje chování systému.

Velmi výrazné nelineární a hysterezní chování feroelektrických materiálů lze očekávat při hodnotách intenzity elektrického pole přesahující několik MV/m. To je fenomén typický zvláště u tenkých piezoelektrických vrstev.

# 5 Návrh úlohy pro laboratorní cvičení předmětu "Převodníky fyzikálních veličin"

Navrhl jsem úlohu pro předmět Převodníky fyzikálních veličin (PFV). V této úloze je úkolem změřit převodní charakteristiku d=f(U) aktuátoru APA 100S pro různé síly. Dále z naměřených hodnot vynést do grafu zatěžovací charakteristiku d=f(F) pro různé hodnoty napájecího napětí. Nakonec vyčíslení blokovací síly  $F_b$  a maximální posunutí  $d_0$ . Zadání úlohy je v příloze č. 2.

#### Závěr

V první části práce jsem se seznámil s akčními členy využívající vlastností materiálů pevné fáze a s možnostmi měření malých mechanických posunutí. Aktuátory typu APA, vyvinuté společností CEDRAT TECHNOLOGIES, mají lineární ovládání tahem. To byl hlavní důvod pro sestrojení takové konstrukce tuhého rámu, aby zatěžovací síla působila tahem podél vedlejší osy eliptické konstrukce aktuátoru. Konstrukci jsem navrhl pro experimentální ověření vlastností aktuátorů vyvozující sílu tahem i tlakem. Z počátku jsem pro vyhodnocování výsledného posunutí zvažoval použít LVDT senzor, ale nakonec se jako vhodnější a zároveň jednodušší řešení ukázalo použití optického měřicího přístroje MTI-2100 Fotonic Sensor.

Z experimentálního měření vyplynulo, že aktuátor APA 100S má nelineární přechodovou charakteristiku a hysterezi, která omezuje přesnost polohování. Tyto jevy způsobuje poměrně velké elektrické pole, které dosahuje hodnot až 150 MV/m. Ze zatěžovací charakteristiky jsem odečetl maximální posunutí  $d_0$  a blokovací sílu  $F_b$ . Experimentálním měřením jsem zjistil hodnotu maximálního posunutí aktuátoru, která je 117,9 µm, i když hodnota udávaná katalogem je 130 µm. Blokovací síla zjištěná interpolováním zatěžovací charakteristiky pro maximální napájecí napětí je 172 N a katalogová hodnota  $F_b$  je 20 N. (Katalogový list k aktuátoru APA 100S jsem neobdržel a v současnosti chybí i na stránkách společnosti CEDRAT TECHNOLOGIES. Katalogový list jsem dohledal a právě experimentální měření mělo ověřit některé jeho vlastnosti.) Přesnost stanovení hodnoty blokovací síly velmi závisí na přesnosti stanovení jednotlivých bodů závislosti mechanického posunutí na vyvozené síle. Jakákoli malá nepřesnost stanovení hodnoty mechanického posunutí způsobí významnou změnu směrnice přímky zatěžovací charakteristiky a v důsledku se projeví v určení blokovací síly.

Významným výsledkem práce je právě navrhnutá a realizovaná konstrukce tuhého rámu, která je připravena pro experimentální úlohu do předmětu "Převodníky fyzikálních veličin", resp. "Smart Sensors and Actuators".

#### Seznam literatury

- [1] *Brevier Technical Ceramics* [online]. [cit. 11. 5. 2012]. URL: <a href="http://www.keramverband.de/brevier\_engl/3/4/2/3\_4\_2\_8.htm">http://www.keramverband.de/brevier\_engl/3/4/2/3\_4\_2\_8.htm</a>>.
- [2] ĎAĎO, Stanislav., KREIDL, Marcel. Senzory a měřicí obvody. 2. vydání.
   Vydavatelství ČVUT. Praha. 1996. ISBN 80-01-02057-6
- [3] Greenlight Solutions [online]. [cit. 9. 5. 2012]. URL:
   <a href="http://www.greenlightsl.com/pdfs/Catalogue\_Piezo\_2010.pdf">http://www.greenlightsl.com/pdfs/Catalogue\_Piezo\_2010.pdf</a>>.
- [4] *INNOTICS* [online]. [cit. 27. 3. 2012]. URL:<a href="http://www.innotics.com/products/cedrat/datasheets/APA.pdf">http://www.innotics.com/products/cedrat/datasheets/APA.pdf</a>>.
- [5] Katedra Fyziky TUL [online]. [cit. 9. 5. 2012]. URL:<a href="http://katedry.fp.tul.cz/kfy/interferometrie.html">http://katedry.fp.tul.cz/kfy/interferometrie.html</a>>.
- [6] Katedra Fyziky TUL [online]. [cit. 9. 5. 2012]. URL:
   <a href="http://katedry.fp.tul.cz/kfy/katedra/erhart/clanky/Elektro\_3-2002\_4.pdf">http://katedry.fp.tul.cz/kfy/katedra/erhart/clanky/Elektro\_3-2002\_4.pdf</a>>.
- [7] MAIXNER, Ladislav a kolektiv. *Mechatronika*. 1. vydání. Computer Press.
   Brno. 2006. ISBN 80-251-1299-3
- [8] MTI Instruments [online]. [cit. 31. 3. 2012]. URL:
   <a href="http://www.mtiinstruments.com/pdf/products/mti2100.pdf">http://www.mtiinstruments.com/pdf/products/mti2100.pdf</a>>.
- [9] ZELENKA, Jiří. Piezoelectric Resonátore and their Applications. 1. vydání. Academia. Prague. 1986. ISBN 0444995161

### Seznam obrázků

Obrázek 1	Mechanické posunutí $\Delta h$ úměrné elektrickému poli E <sub>3</sub>
Obrázek 2	Struktura vícevrstvého aktuátoru
Obrázek 3	Akční člen typu bimorf
Obrázek 4	Piezohydraulický akční člen
Obrázek 5	a) Uspořádání piezo členu v DPA, b) Fotografie DPA
Obrázek 6	Aktuátor typu PPA
Obrázek 7	Chování aktuátoru APA
Obrázek 8	Aktuátor APA 100S
Obrázek 9	a) Princip posunu SPA, b) Příklad miniaturního SPA
Obrázek 10	Indukčnostní senzor mezerový
Obrázek 11	Lineární diferenční transformátorový senzor posunutí
Obrázek 12	Závislost vzájemných indukčností a výstupního napětí na poloze
	LVDT senzoru
Obrázek 13	a) Princip řádkového PSD senzoru, b) Náhradní obvod
Obrázek 14	Michelsonův interferometr
Obrázek 15	Dvojitý Michelsonův interferometr
Obrázek 16	Dvojitý Mach-Zehnderův interferometr
Obrázek 17	Prstencový pružný člen se senzorem LVDT
Obrázek 18	Podélný, příčný a střihový piezoelektrický jev
Obrázek 19	Senzor síly s optickými vlákny v uspořádání a) podélném, b)
	příčném
Obrázek 20	LVDT na KFY
Obrázek 21	Typická kalibrační křivka sondy
Obrázek 22	Rozložení vláken v sondě
Obrázek 23	Měřicí přípravek a tuhý rám s aktuátorem APA 100S

Obrázek 24	Blokové schéma propojení přístrojů
Obrázek 25	Naměřené převodní charakteristiky
Obrázek 26	Naměřená převodní charakteristika pro sílu 20,1 N
Obrázek 27	Naměřené převodní charakteristiky pro síly 0 N a 2,53 N
Obrázek 28	Naměřená převodní charakteristika pro sílu 2,53 N
Obrázek 29	Naměřená převodní charakteristika pro sílu 20,1 N
Obrázek 30	Naměřené zatěžovací charakteristiky

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Nejvýznamnější fyzikální jevy využitelné pro aktuátory pevné fáze
Tabulka 2	Posunutí a síla akčních členů
Tabulka 3	Kapacitní snímače posunutí
Tabulka 4	Vlastnosti aktuátoru APA 100S
Tabulka 5	Vlastnosti standardní sondy MTI-2047R
Tabulka 6	Porovnání naměřených a katalogových hodnot APA 100S

## Seznam příloh

Příloha č. 1	Technický výkres mechanicky tuhého rámu konstrukce
Příloha č. 2	Zadání úlohy pro předmět Převodníky fyzikálních veličin

Příloha č. 1



#### Příloha č. 2

#### Měření základních vlastností aktuátoru APA 100S

#### Zadání:

Změřte převodní a zatěžovací charakteristiku aktuátoru APA 100S.

#### Popis úlohy:

Převodní charakteristikou aktuátoru rozumíme závislost výsledného mechanického posunutí *d* aktuátoru na elektrickém napětí *U* aplikovaném na elektrody piezoelektrického členu. Úkolem je změření závislosti d=f(U) pro působící síly F = 0 N, 2,53 N, 4,44 N, 10,3 N a 20,1 N. Měření je citlivé na otřesy, proto je třeba dbát na klid na pracovišti. Napájecí napětí aktuátoru volte od –20 V do 150 V a krok 2 V. Zakreslete do grafu zatěžovací charakteristiku – závislost d=f(F) pro hodnoty napájecího napětí 60 V, 100 V, 130 V a 150 V. Vyhodnoť maximální posunutí  $d_0$  a blokovací sílu  $F_b$  aktuátoru APA 100S.

#### Schéma zapojení:

Na obrázku je blokové schéma zapojení úlohy.



#### Použité přístroje a pomůcky:

- mechanicky tuhý rám pro upevnění aktuátoru APA 100S, závaží
- počítač s programem Agilent VEE Pro
- měřicí přístroj se zdrojem napětí KEITHLEY 6517 electrometer/high resistance system
- zesilovač TREK MODEL 610D high voltage power supply amplifier controller
- optický měřicí přístroj MTI-2100 Fotonic Sensor

#### Naměřené hodnoty a jejich diskuze:

Naměřené hodnoty vyneste do grafů a proved'te jejich zhodnocení.

#### Závěr: