



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Elektricky nastavitelná optická mohutnost elastické čočky

Electrically Adjustable Focal Lens of the Flexible Lens

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Michal Matějka

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Michal Matějka**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Elektricky nastavitelná optická mohutnost elastické čočky**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte odbornou literaturu týkající se umělých elektricky ovládaných svalů a přípravy kontaktních čoček.
- 2) Na základě 1) navrhnete a realizujete několik typů soustavy čočka-elektricky ovládaný umělý sval (EAP). Případně vyzkoušejte další možné multimediální aplikace elektrického svalu.
- 3) Provedte měření na několika pokusných vzorcích.
- 4) Vyhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Husák, M.: Přednášky z předmětu Senzory v elektronice a informatice. ČVUT FEL, Praha 2013.
- [2] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia 2008.
- [3] Kutějová, L.: Syntetický sval. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně. Zlín 2008.
- [4] Bar-Cohen, Y.: Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles. Spie Press, Washington 2004.

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

L.S.

Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 2. 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. 05. 2014

Michal Matějka

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Luboru Jiráskovi CSc. za poskytnutí odborných rad, cenné připomínky, ochotu a trpělivost při vypracování bakalářské práce.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku elektroaktivních polymerů a jejich výrobu a použití. Hlavní cíl práce je vyrobit elastickou čočku, která bude ovládána umělým svalem.

V teoretické části jsou charakterizovány jednotlivé druhy elektroaktivních polymerů, jejich vlastnosti, principy funkce a materiály, z kterých se vyrábějí. V další části je popsána problematika čoček, jejich vad a způsobů výroby

Praktická část bakalářské práce zahrnuje návrhy způsobu realizace soustav čočka-elektricky ovládaný umělý sval, jejich realizaci měření parametrů realizované soustavy.

Klíčová slova: elektroaktivní polymery, umělý sval, dielektrický elastomer, elastická čočka

Abstract

The thesis is focused on the issue of electroactive polymers and their production and use. The main goal is to produce elastic lens that is controlled by an artificial muscle.

In the theoretical part are characterized by various types of electroactive polymers, their properties, principles, functions and materials from which they are made. The next section describes the problem of lens defects and their methods of manufacture

The practical part includes proposals for the method of implementation of systems lens-electrically actuated artificial muscle, their implementation, measurement parameters implemented system.

Keywords: electroactive polymer artificial muscle, dielectric elastomer, flexible lens

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1. Úvod	9
2. Elektroaktivní polymery	10
2.1 Polem ovládané EAP	10
2.1.1 Dielektrické polymery	11
2.1.2 Feroelektrické polymery	13
2.1.3 Elektrostriční roubované polymery.....	14
2.2 Iontové EAP	16
2.2.1 Uhlíkové nanotrubičky.....	16
2.2.2 Vodivé polymery.....	18
2.2.3 Iontové gely	19
2.2.4 Kovopolymerové iontové kompozity	19
3. Čočky	20
3.1 Zákon lomu	20
3.2 Optická mohutnost	21
3.2.1 Akomodace oka	21
3.3 Druhy čoček	22
3.3.1 Spojná čočka	22
3.3.2 Rozptylná čočka	23
3.4 Vady čoček	23
3.4.1 Barevná vada	23
3.4.2 Sférická vada.....	23

3.4.3	Astigmatická vada.....	24
3.4.4	Koma	24
3.4.5	Zkreslení obrazu.....	24
3.5	Kontaktní čočky	24
3.5.1	Výroba tvrdých kontaktních čoček.....	25
3.5.2	Výroba měkkých kontaktních čoček	25
4.	Elektricky ovládaná čočka.....	26
4.1	Rámeček soustavy.....	26
4.2	Příprava umělého svalu.....	26
4.3	Elektrody.....	27
4.4	Elastická čočka	28
4.5	Ovládání umělého svalu.....	28
5.	Měření soustavy	29
6.	Pokusy o další soustavy	31
7.	Další multimediální využití EAP	33
7.1	Hmatové displeje	33
7.2	Iontový reproduktor	34
8.	Závěr.....	35
9.	Literatura.....	36
10.	Přílohy	39
10.1	Rámeček z desky na plošné spoje	39
10.2	Přípravek na rovnoměrné natahování	39

Seznam použitých zkratk a symbolů

a	(cm)	Předmětová vzdálenost
a'		Obrazová vzdálenost
d	(mm)	Tloušťka
E	(Vm ⁻¹)	Intenzita elektrického pole
f	(cm)	Předmětová ohnisková vzdálenost
f'		Obrazová ohnisková vzdálenost
l		Délka po natažení
L		Délka před natažením
n	(-)	Index lomu
p	(Pa)	Tlak
P _s	(Cm ⁻²)	Spontální polarizace
s _z	(%)	Změna tloušťky
T _c	(°C)	Curieova teplota
Y	(Pa)	Youngův modul pružnosti
ε ₀	(Fm ⁻¹)	Permitivita vakua
ε _r	(-)	Relativní permitivita
ε		Poměrné prodloužení
φ	(D)	Optická mohutnost
EAP		Electroactive Polymers – Elektroaktivní polymery
k		Kolmice

1. Úvod

Jako téma své bakalářské práce jsem si zvolil praktickou aplikaci elektroaktivních polymerů, známých také pod označením „umělé svaly“. Umělé svaly jsou látky, které reagují na určitý podnět okolí, může to být jako v našem případě působení elektrického pole, nebo mohou umělé svaly reagovat na teplo, světlo nebo na působení určité chemické látky. Umělé svaly tak mohou měnit svoji velikost, tvar nebo také zabarvení. Tato práce je však zaměřena na umělé svaly ovládané elektrickým polem, základní typy elektroaktivních polymerů a principy. Jejich funkce jsou probrány v následující teoretické části.

Na úvod shrnu některé vlastnosti, které by měl umělý sval splňovat. Pro dobrou spolehlivost je dobré, když je sval pokud možno co nejjednodušší konstrukce. V ideálním případě homogenní látka, která v závislosti na přiloženém napětí mění své parametry. Další parametr je dostatečně rychlá reakce na řídicí impuls, která je důležitá při výběru technologie pro danou aplikaci. Dále by měl umělý sval mít malou spotřebu energie, dlouhou životnost, časovou stálost a v neposlední řadě by měl pracovat při pokud možno bezpečném napětí. Tato poslední podmínka není bohužel splněna u zatím nejrozšířenějšího a pro mnoho aplikací nejvhodnějšího kandidáta, a to u dielektrických elastomerů. Dielektrické elastomery pracují při vysokých napětích řádově jednotky kilovoltů.

V praktické části je řešen návrh a konstrukce soustavy elastické čočky ovládané elektrickým umělým svalem dielektrického typu. Jsou měřeny optické parametry vytvořené čočky pro několik konfigurací čočky a uvedeny způsoby dalších možných konstrukcí. Jsou uvedené další zajímavé multimediální aplikace umělého svaly, mezi které patří například průhledný a velmi tenký reproduktor.

2. Elektroaktivní polymery

Elektroaktivní polymery (EAP – electroactive polymers) jsou takové polymery, které vykazují změny velikosti nebo tvaru při stimulaci elektrickým polem. Jsou schopny změnit svůj rozměr nebo tvar o desítky až stovky procent proti původnímu rozměru. Tento materiál se nejčastěji používá na akční členy (aktuátory) a snímače. EAP by mohli být alternativou k dosud používaným mechanismům jako je motor nebo hydraulická zařízení. Vodivé EAP mají řádově 10x větší vodivost než běžné polymery a zároveň mají 3-5x nižší vodivost než kovy [24]. První experimenty jsou datovány již roku 1880, kdy Wilhelm Röntgen zkoumal účinek elektrického proudu na mechanické vlastnosti gumičky, na které bylo zavěšeno závaží [23].

V literatuře [1] je zavedeno základní dělení elektroaktivních polymerů na tzv. elektronické (výstižnější označení je však polem ovládané EAP) a iontové polymery. Oba typy jsou po stranách vybaveny elektrodami, které po přivedení napětí deformují polymer v daném směru. Rozdíl mezi polem ovládanými a iontovými polymery je v tom, při jakém napětí pracují. Pro pohon iontových elektroaktivní polymerů je potřeba napětí v řádech jednotek voltů, pro pohon druhého typu elektroaktivních polymerů je potřebné vysoké napětí v řádech kilovoltů.

Tab. 1: Rozdělení EAP. Převzato z [1].

Polem ovládané EAP	Iontové EAP
<ul style="list-style-type: none">• Dielektrické polymery	<ul style="list-style-type: none">• Uhlíkové nanotrubičky
<ul style="list-style-type: none">• Elektrostriční roubované polymery	<ul style="list-style-type: none">• Vodivé polymery
<ul style="list-style-type: none">• Feroelektrické polymery	<ul style="list-style-type: none">• Iontové gely
	<ul style="list-style-type: none">• Kovopolymerové iontové kompozity

2.1 Polem ovládané EAP

Tento typ elektroaktivních polymerů mění svůj tvar v závislosti na působení elektrického pole [3]. Polem ovládané elektroaktivní polymery vyžadují pro ovládnutí vysoké napětí (stovky až tisíce voltů), které vytvoří silné elektrické pole. Procesy, které způsobí změnu

tvaru, jsou například změna uspořádání molekul v polymeru, deformace na základě Coloumbovy síly, či natáčení dipólových molekul v polymeru [3]. Výhody a nevýhody polem ovládaných elektroaktivních polymerů shrnuje následující přehled [1].

Výhody:

- Rychlá doba odezvy (řádově ms).
- Vysoká hustota energie.
- Stálý tvar při konstantním budicím napětí.
- Schopnost generovat velké síly.

Nevýhody:

- Většinou jednostranný pohyb při obou polaritách pole.
- Vysoká pracovní intenzita pole (až 100 V/μm).
- Nutný kompromis mezi rozsahem pohybu a velikostí vyvíjené síly.
- Ovládací elektrické pole se blíží elektrické pevnosti materiálu.

2.1.1 Dielektrické polymery

Dielektrické polymery jsou lehké a mají vysokou elastickou hustotu energie. Z následujícího obrázku (viz Obr. 1) je vidět uspořádání aktuátoru s dielektrickým polymerem. Princip je obdobný jako u deskového kondenzátoru, kde dielektrický polymer je sevřen mezi dvě poddajné elektrody. Po přiložení napětí se začnou elektrody vlivem elektrostatické síly přitahovat, jelikož polymer je elastický a nestlačitelný dojde ke zmenšení jeho tloušťky podle vztahu (1) a zároveň k jeho plošné expanzi. Změna tloušťky polymeru je dána vztahem

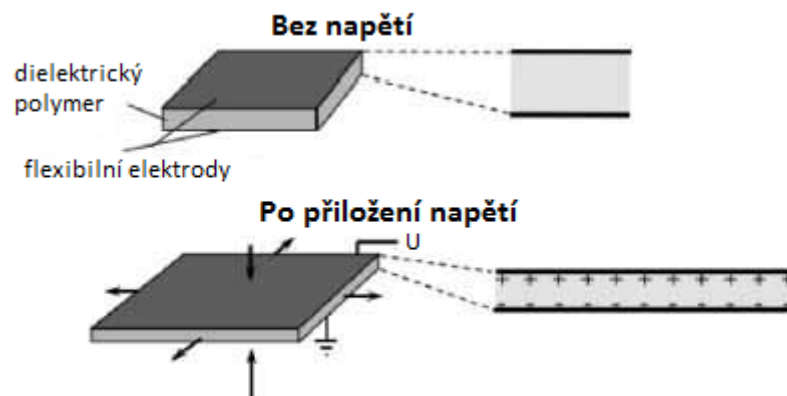
$$S_z = -\frac{p}{Y} = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{Y} = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{Y d_0^2} \quad (1)$$

kde S_z je relativní změna tloušťky polymeru a Y je Youngův modul pružnosti a d_0 původní tloušťka. Převzato z [3].

Způsobený elektrostatický tlak způsobený opačnými náboji na elektrodách je roven

$$p = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (2)$$

kde ε_r je relativní permitivita polymeru, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ je permitivita vakua, E je intenzita elektrického pole, U je přiložené napětí na elektrody a d je vzdálenost mezi elektrodami. Ze vztahu (2) je zřejmé, že pro docílení většího tlaku aktuátoru je výhodné použít velmi tenký film polymeru.

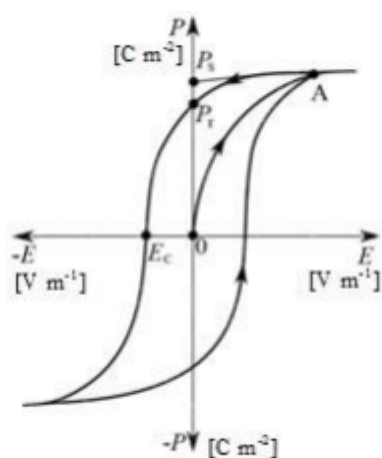


Obr. 1. Struktura aktuátoru z dielektrického polymeru, šipky znázorňují deformaci aktuátoru vlivem elektrického pole. Převzato z [2].

Materiály používané na výrobu aktuátorů z dielektrických polymerů jsou nejčastěji akryláty a silikony. Akrylátové polymery jsou viskóznější, ale mají menší modul pružnosti, to má za následek větší prodloužení a zároveň nižší frekvence pohybových cyklů. Velmi často používaný akrylátový materiál je běžně dostupná akrylátová páska VHB^{TM} 4910 od společnosti $3M^{TM}$. Tato viskoelastická oboustranně lepicí transparentní akrylátová páska vyniká vysokým rozsahem elastických deformací, poměrně vysokou dielektrickou konstantou, dobrou elektrickou i mechanickou pevností [3]. Silikonové polymery mají proti akrylátovým vyšší modul pružnosti, ale mají mnohem menší viskozitu což umožňuje vyšší frekvence pohybových cyklů. Více informací o akrylátových a silikonových polymerech obsahuje například [4] nebo [5].

2.1.2 Feroelektrické polymery

Feroelektrické polymery se v elektrickém poli chovají obdobně, jako feromagnetické materiály v magnetickém poli. U feromagnetických polymerů dochází v elektrickém poli k natáčení polárních molekul, tzv. elektrické polarizaci. Při odpojení elektrického pole molekuly zůstávají v polarizovaném stavu, vykazují tedy hysterezi. Polarizaci je možné otočit přiložením opačně orientovaného elektrického pole. Feroelektrika mají vysokou hodnotu relativní permitivity a nelineární závislost jejich polarizace na intenzitě přiloženého elektrického pole. Průběh prvotní polarizace a hysterezní smyčky je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2. Hysterezní smyčka, závislost polarizace feroelektrického vzorku na elektrickém poli a prvotní polarizace. Převzato z [7].

Křivka prvotní polarizace probíhá mezi body 0 až A, kdy v bodě A je materiál plně polarizován. Při snižování intenzity elektrického pole nesleduje vektor polarizace křivku prvotní polarizace, ale probíhá po hysterezní smyčce. Plocha hysterezní smyčky reprezentuje množství tepla uvolněného při jednom průchodu touto smyčkou [7].

U feroelektrických látek je důležitý parametr tzv. Curieova teplota T_c , po jejím překročení se z feroelektrického materiálu stává paraelektrický materiál. U paraelektrického materiálu sice také dochází k polarizaci vlivem elektrického pole, ale po odpojení tohoto pole se elektrické dipóly vrátí do nepolarizovaného stavu.

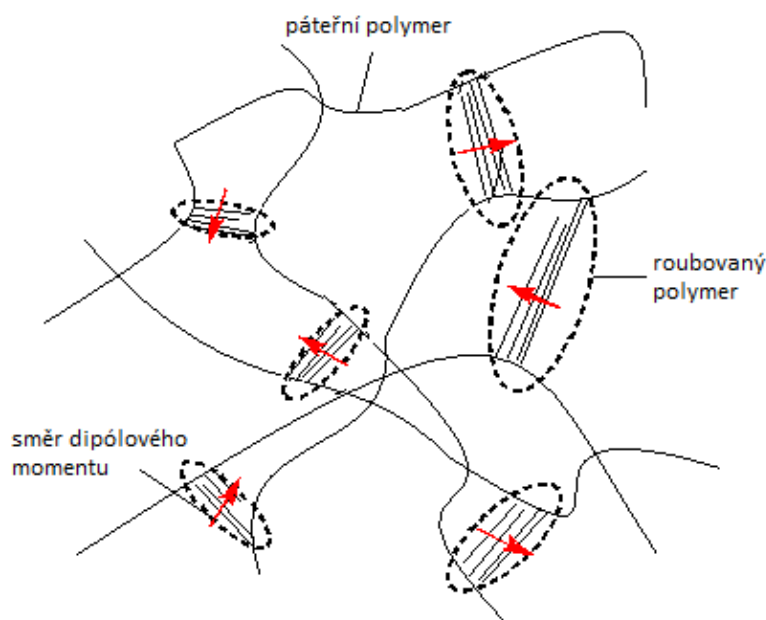
Existují ale materiály, u kterých lze při teplotě vyšší, než je Curieova teplota mezi těmito stavy přecházet pomocí elektrického pole [2]. Tyto materiály jsou na bázi polyvinylidenfluoridu (PVDF), který při fázovém přechodu mění uspořádání monomerů

v řetězci, a tím i jejich vzdálenost, které využíváme při konstrukci aktuátoru. Základní materiál je polyvinyliden-fluorid-trifluorethylen (PVDF-TrFE), který vykazuje změnu tvaru okolo 4 % [8], ale pro přechod do paraelektrické fáze (nad Curieovu teplotu) je potřeba velmi vysoká teplota, proto je lepší řešení přidat do polymeru chlorofluoroethylen, čímž vznikne PVDF-TrFE-CFE, který sníží Curieovu teplotu na přibližně pokojovou teplotu. Přidání dalšího monomeru zajistí ovládání aktuátoru polem pouze jedné polarity, protože po odpojení pole materiál přejde do paraelektrické fáze, díky vyšší teplotě než je Curieova.

Jak již bylo zmíněno výše tyto EAP nedosahují velkých změn tvaru, proto se použijí tam, kde není potřeba velké změny tvaru.

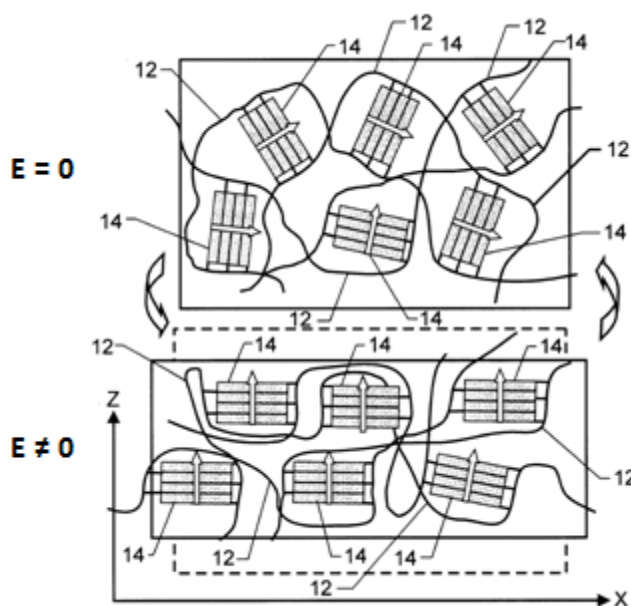
2.1.3 Elektrostriční roubované polymery

Elektrostriční roubované polymery se skládají ze dvou částí, pružné základní makromolekuly a naroubovaných (připojených) postraních řetězců, které mohou tvořit krystalickou strukturu (viz Obr. 3.). Připojované řetězce jsou monomery, které mají vlastní dipólový moment a po vložení do elektrického pole, se dipóly roubovaného polymeru otáčejí vlivem elektrického pole [1]. Toto otáčení dipólů roubovaného monomeru způsobuje tvarovou deformaci polymeru.



Obr. 3. Struktura roubovaných polymerů. Převzato z [3].

Přeuspořádání a natočení dipólových momentů roubovaných polymerů je znázorněno na Obr. 4, kde je v horní části znázorněn roubovaný polymer (v náhodné konfiguraci) bez přiloženého elektrického pole a ve spodní části polarizován elektrickým polem. Páteřní polymer je na obrázku označen číslem 12 a roubovaný polymer číslem 14. Jak je z obrázku zřejmé, přeuspořádáním a otočením dipólů roubovaného polymeru dojde k jeho prodloužení v ose x a zároveň dojde k zúžení v ose z.



Obr. 4. Znázornění otáčení a přeorientování momentů naroubovaného polymeru z původně náhodné konfigurace. Převzato z [9].

Jako vhodné materiály pro vývoj těchto typů EAP se považují různé kopolymery poly(vyniliden-fluoridu) s chlorofluoroethylenem, nebo trifluorethylenem. Například páteřní řetězce z P(VDF-TrFE) s naroubovanými vyniliden-fluoridovými monomery [3]. Dosažitelná deformace je obdobná feroelektrickým polymerům a činí přibližně 4 %, ale proti feroelektrickým polymerům mají horší dynamické vlastnosti a pracují při nižším napětí.

2.2 Iontové EAP

Iontové elektroaktivní polymery jsou založeny na přemísťování iontů uvnitř polymeru, to způsobí změnu hustoty látky a v závislosti na ní také jeho tvar [3]. Výhody a nevýhody iontových elektroaktivních polymerů shrnuje následující přehled [1]:

Výhody:

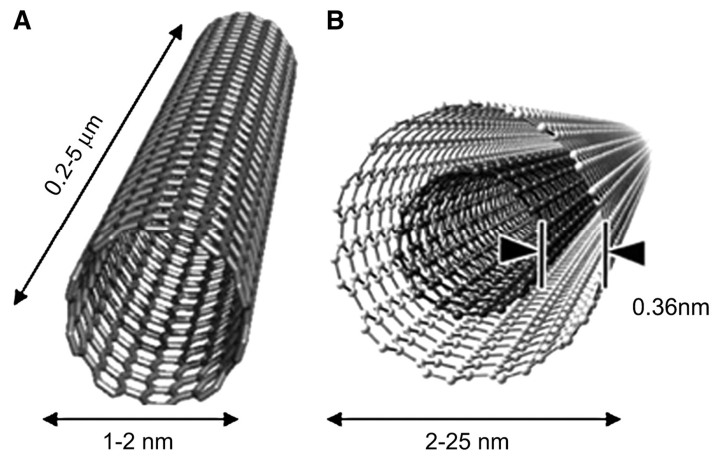
- Přirozený obousměrný pohyb závislý na polaritě napětí.
- Nízké pracovní napětí (jednotky až desítky voltů).
- Nejčastěji ohebný pohyb.
- Široký rozsah ohebného pohybu.

Nevýhody:

- Většina materiálů musí být v elektrolytu - nutnost zapouzdření.
- Nízká účinnost převodu elektrické energie na mechanickou.
- Nestálý tvar při konstantním budicím napětí (mimo vodivé polymery).
- Pomalá odezva (desetiny až jedna sekunda).
- Produkuje malé síly.

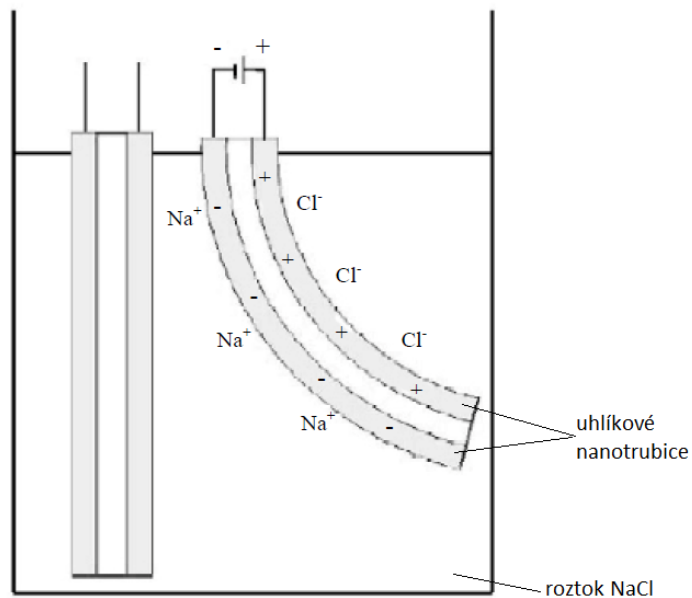
2.2.1 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanotrubičky jsou miniaturní trubičky, jejichž stěny jsou tvořeny atomy uhlíku. Nanotrubičky mají průměr jednotek až desítek nanometrů (10^{-9} m) a mohou mít jednu či více stěn. Protože má uhlík velkou tepelnou stabilitu, mohou být uhlíkové nanotrubičky použity i při teplotách přesahujících 1000°C , což rozšiřuje možnost jejich využití [1]. Mají velkou pevnost, vysokou elektrickou vodivost a jsou chemicky inertní. Nicméně nejsou nejvhodnější materiál pro umělé svaly pro svoji malou schopnost měnit rozměr.



Obr. 5. Nákres struktury jednovrstvené (A) a dvouvrstvené uhlíkové nanotrubic (B). Převzato z [11].

Aktuátor z uhlíkových nanotrubic (viz Obr. 6.) se skládá ze dvou vrstev nanotrubic spojených elektricky ionizovaným lepidlem s membránou a ponořených do roztoku chloridu sodného [3]. Po připojení elektrického napětí mezi uhlíkové nanotrubicе dojde k přeorganizování elektronů na povrchu trubic. Důsledek toho je nepatrná změna velikosti a tvaru aktuátoru, která činí necelé jedno procento. Směr ohýbání závisí na polaritě elektrického zdroje.

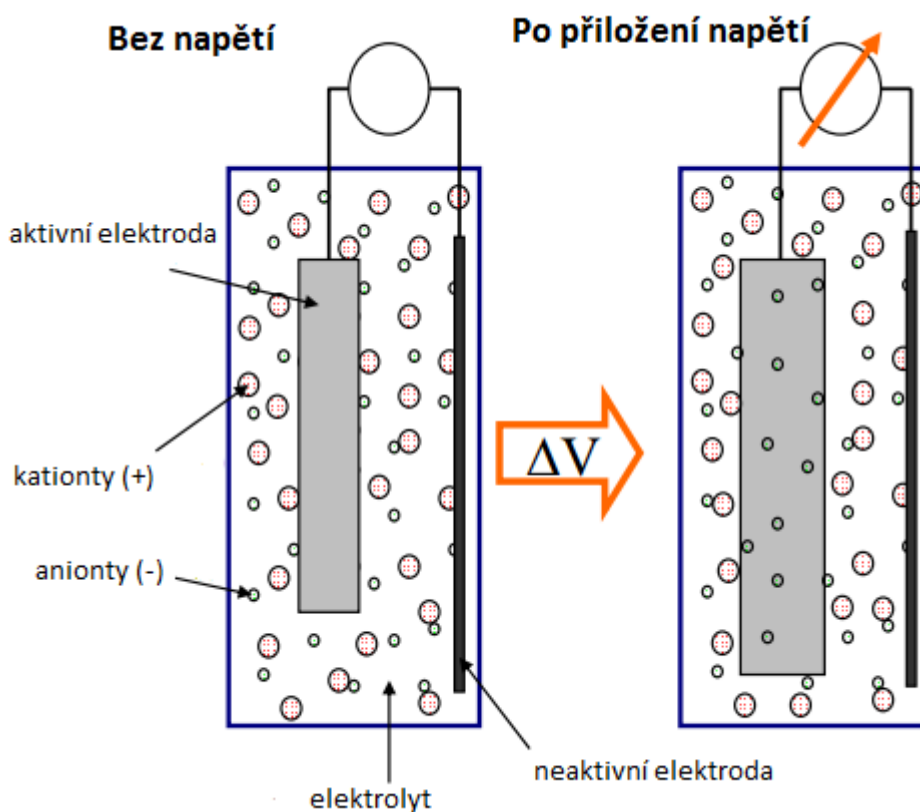


Obr. 6. Aktuátor vytvořený z nanotrubic. Převzato z [12].

2.2.2 Vodivé polymery

Polymery jsou všeobecně známy jako izolanty, vodivé polymery mají vlastnosti jako polovodiče nebo vodiče. Vedle vodivých kompozitů, tj. polymerů obsahujících nejrůznější plniva, existují také konjugované polymery. Konjugované polymery vykazují vlastní vysokou elektrickou vodivost, kterou způsobuje pravidelné střídání jednoduchých a dvojných vazeb (konjugace) v molekulární struktuře. Neméně důležité jsou také pohyblivé nosiče náboje, které zprostředkovávají transport po konjugovaném řetězci [14].

Jeden z konjugovaných polymerů je polypyrrol, který má vodivost v řádu 10^{-10} Sm^{-1} , po dotaci jódem jeho vodivost vzroste na 10^4 Sm^{-1} [3]. Princip aktuátoru z vodivého polymeru je znázorněn na Obr. 7. Dotovaný vodivý polymer může vykazovat až několikaprocentní změnu objemu způsobenou absorpcí volných iontů z elektrolytického roztoku při přiložení napětí (jednotek voltů) mezi aktivní elektrodu (vodivý polymer) a neaktivní elektrodu [3].



Obr. 7. Princip aktuátoru z vodivého polymeru. Převzato z [14].

Další vodivé polymery jsou polyacetylen, polythiofen, polyanilin, polyfenylen a poly(p-fenylenvinylem).

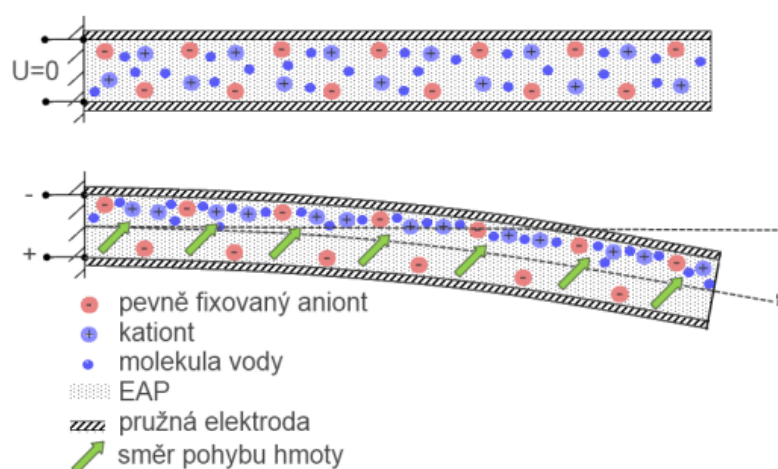
2.2.3 Iontové gely

Iontové polymerní gely jsou trojrozměrné sítě složené ze sítě makromolekulárních polyelektrolytů, které bobtnají nebo se zmenšují ve vodných roztocích alkalického kovu nebo kyselin [22]. V důsledku malých změn okolního prostředí, jako je intenzita elektrického pole, hodnota pH nebo teplota, dochází ke změnám jejich vlastností. Dochází u nich ke změnám objemovým, mechanickým, ale také optickým. Tyto změny jsou plně vratné, což je nesporná výhoda těchto iontových gelů. Iontové gely jsou schopny měnit lineárně svůj objem až o tisíc procent. Velmi často používaný materiál je polyakrylonitrilový gel (PAN), který je ponořen do roztoku kyseliny karboxylové [6]. Dále používaný polymerní gel je polyvinylalkohol (PVA).

Nevýhoda těchto gelů je rychlost odezvy, která je velmi malá, řádově desítky milisekund. Další nevýhoda jinak výhodných polymerních gelů je krátká životnost, velmi rychle totiž degradují. V současné době se iontové gely používají jako aktuátory, ale také jako chemické senzory.

2.2.4 Kovopolymerové iontové kompozity

Kovopolymerové iontové kompozity se skládají z ionomerického polymeru doplněného z obou stran o dokonale pružné elektrody (více o elektrodách v [3]). Po přivedení napětí na elektrody, které je řádově jednotky voltů, dojde k přesunu volných iontů k opačně nabitě elektrodě [3]. To způsobí nerovnoměrnou hustotu látky, kdy u jedné elektrody se hustota zvětší a u druhé elektrody se zmenší. Tím dojde k prohnutí aktuátoru, jak ilustruje Obr. 8.



Obr. 8. Princip kovopolymerového kompozitu. Převzato z [12]

V případě nerovnoměrného uspořádání elektrod, lze vyvolat i jiné druhy deformace, jako je například kroucení nebo otáčení. Tento typ aktuátoru prokazuje velmi vysokou deformaci při nízkém napětí. Nevýhoda ovšem je, že tento aktuátor nedokáže udržet výchylku po delší dobu.

3. Čočky

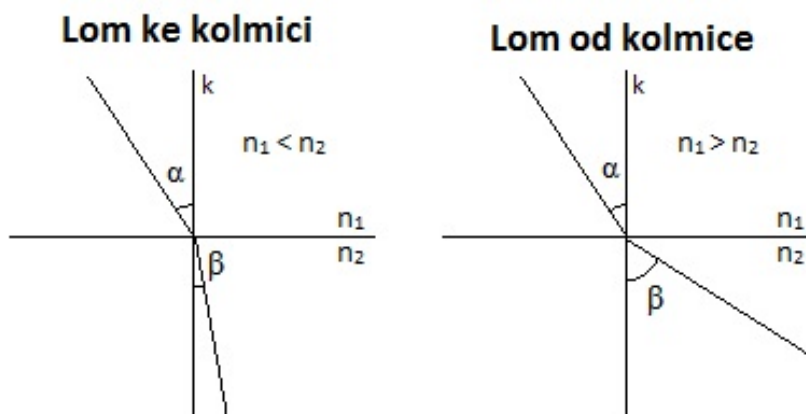
Čočka je jeden ze základních prvků používaných v optice. Klasická čočka je homogenní průhledné těleso ohraničené buď dvěma kulovými plochami, nebo jednou kulovou a jednou rovinnou plochou. Nejčastěji se čočky vyrábějí ze skla, plastu, nebo jiného průhledného materiálu, který má větší index lomu, než má vzduch. Materiál čočky by měl mít také index absorpce blízký nule.

3.1 Zákon lomu

Též nazývaný jako Snellův zákon, popisuje šíření paprsku světla na rozhraní při přechodu z jednoho prostředí do jiného, kde se skokově mění index lomu. Zákon definuje vztah (3)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

kde α je úhel dopadu, β je úhel lomu, n_1 je index lomu prostředí, z kterého dopadá paprsek a n_2 je index lomu prostředí, do kterého paprsek prochází. Po dopadu paprsku na rozhraní se paprsek láme od kolmice nebo ke kolmici, podle indexu lomu daného materiálu. Kolmice, jak už z názvu vyplývá je čára kolmá k rovině dopadu. V případě, že jde paprsek z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí, tedy index lomu $n_1 > n_2$, hovoříme o lomu od kolmice. Při lomu od kolmice je úhel dopadu α menší než úhel lomu β . Naopak při lomu ke kolmici jde paprsek z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí ($n_1 < n_2$). Úhel dopadu α je tedy větší než úhel lomu β .



Obr. 9. Zákon lomu na rozhraní dvou prostředí.

3.2 Optická mohutnost

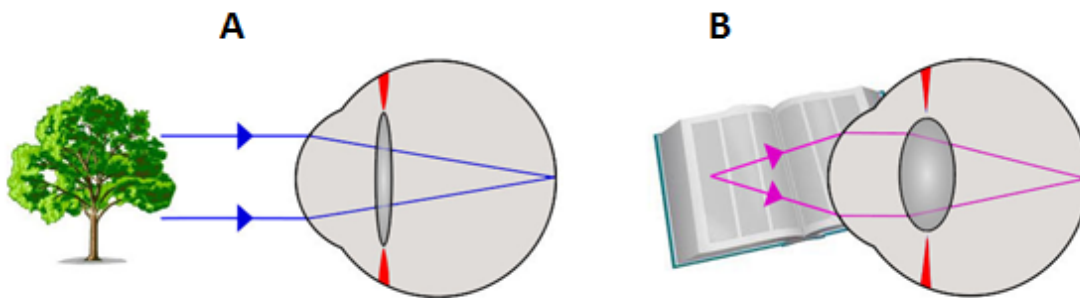
Je veličina, která popisuje zakřivení čočky. Určí se ze vztahu (4) jako převrácená hodnota obrazové ohniskové vzdálenosti čočky.

$$\varphi = \frac{1}{f'} \quad (4)$$

kde φ je optická mohutnost a f' je obrazové ohnisko čočky. Jednotka optické mohutnosti je dioptrie.

3.2.1 Akomodace oka

Akomodace je proces, při kterém se mění optická mohutnost čočky v oku. To umožňuje zaostřovat předměty na různé vzdálenosti. Akomodaci zajišťují ciliární svaly tím, že natahují nebo povolují čočku, čímž mění ohniskovou vzdálenost [15]. Lidské oko je schopno měnit svoji optickou mohutnost v rozsahu až 15 dioptrií. Při sledování blízkých předmětů svaly ochabnou a čočka se stane tlustší, to způsobí, že se paprsky na čočce více lámou. Naopak při sledování vzdálených předmětů svaly čočku napnou, ta se ztenčí a zaostří vzdálené předměty (viz Obr. 10.).

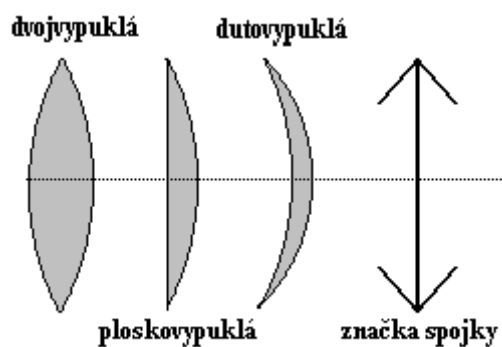


Obr. 10. Akomodace oka při sledování vzdálených (A) a blízkých (B) předmětů. Převzato z [16].

3.3 Druhy čoček

3.3.1 Spojná čočka

Spojná čočka, též nazývaná spojka je uprostřed širší než na okraji. Základní vlastností spojné čočky je lom paprsků, které přicházejí na čočku rovnoběžné s optickou osou ve sbíhavé. Bod, ve kterém se paprsky protnou, se nazývá ohnisko. Za spojkou tak vzniká skutečný obraz předmětu před čočkou.

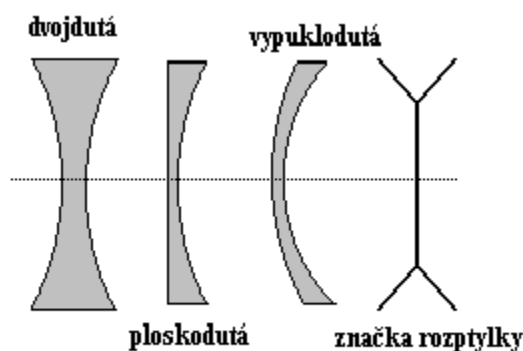


Obr. 11. Základní tvary spojných čoček a schematická značka spojky. Převzato z [17].

Spojně čočky mohou mít různé tvary, základní tvary jsou dvojvypuklá, ploskovypuklá a dutovypuklá (viz Obr. 11.). Spojné čočky jsou využívány v mnoha oblastech, například v objektivěch fotoaparátů, dalekohledech, lupách a brýlích.

3.3.2 Rozptylná čočka

Rozptylná čočka, též nazývaná rozptylka je uprostřed tenčí než na krajích. Základní vlastnost rozptylné čočky je rozptyl paprsků jdoucích rovnoběžně s optickou osou. Rozptýlený paprsek zdánlivě vychází z ohniska před čočkou. Před rozptylkou vzniká obraz neskutečný a zmenšený. Základní tvary rozptylných čoček jsou znázorněny na Obr. 12.



Obr. 12. Základní tvary rozptylných čoček a schematická značka rozptylky. Převzato z [17].

3.4 Vady čoček

Při zobrazování čočkami mohou vznikat různé vady a deformace. Mezi nejčastější vady zobrazení patří následující. Podrobnější informace obsahuje [18] a [19].

3.4.1 Barevná vada

Barevná, též chromatická vada je zapříčiněna tím, že index lomu závisí na vlnové délce světla. Při dopadu paprsku bílého světla čočkou dochází k disperzi (rozkladu) bílého světla a každá barva se na čočce láme pod jiným úhlem, paprsky jednotlivých barev se nestřetnou v jednom ohnisku, ale každá barva v jiném ohnisku. Barevná vada má za následek duhové zbarvení obrazu. Tuto vadu lze odstranit použitím vhodné kombinace spojných a rozptylných čoček.

3.4.2 Sférická vada

Sférická, též otvorová vada je způsobena odlišnými úhly lomu paprsku na okraji čočky a v jejím středu. Tato vada způsobuje neostrost obrazu směrem ke krajům. Odstranění této vady spočívá v použití clony a zakrytí okraje čočky, kde dochází k této vadě.

3.4.3 Astigmatická vada

Astigmatická vada, též astigmatismus, se projeví i při zobrazování předmětu úzkým svazkem, který není v optické ose čočky. Paprsky, které na čočku dopadají kolmo se lámou jinak než ty, které na ni dopadají šikmo [18]. Astigmatismus způsobuje různé zklenutí a zkreslení. Odstranit tuto vadu lze použitím soustavy čoček, nebo zmírnit clonou [18].

3.4.4 Koma

Obdobně jako astigmatismus vzniká při zobrazení bodu, který leží mimo optickou osu, ale při zobrazení širokým svazkem. Obrazem bodu pak není bod, ale protáhlá kulová ploška připomínající kometu [19]. Tato vada způsobuje neostrost obrazu. Zmírnit tuto vadu lze použitím clony.

3.4.5 Zkreslení obrazu

O zkreslení obrazu hovoříme tehdy, je-li zvětšení odlišné uprostřed a na krajích. V případě, že je zvětšení větší uprostřed jedná se o soudkovité zkreslení a je-li zvětšení větší na krajích, jedná se o poduškovité zkreslení. Tuto vadu nelze odstranit [18].

3.5 Kontaktní čočky

Kontaktní čočky jsou dnes velmi oblíbené a využívané zdravotní pomůcky. Používají se pro korekci očních vad jako je krátkozrakost, dalekozrakost a jiné oční vady (další vady v [20]). Kontaktní čočky jsou známé již od konce 19. století, od té doby se ale výrazně změnil materiál, ze kterého se vyrábějí. První kontaktní čočky byly vyrobeny ze skla, které se na jejich výrobu neosvědčilo. Další materiál, ze kterého se vyráběly kontaktní čočky bylo plexisklo (polymethylmethakrylát), to mělo proti sklu velkou výhodu spočívající v nižší hmotnosti kontaktních čoček [21]. Velký zlom ve výrobě kontaktních čoček však nastal, vynalezením gelových kontaktních čoček, o které se zasloužil český vynálezce Otto Wichterle. Na rozdíl od předchozích kontaktních čoček vyráběných foukáním ze skla a lisováním z plexiskla se gelové kontaktní čočky vyrábějí odstředivým litím [21]. To výrazně snížilo náklady na jejich výrobu a došlo k jejich masovému využívání.

3.5.1 Výroba tvrdých kontaktních čoček

Na výrobu tvrdých kontaktních čoček se používá již výše jmenovaný polymethylmethakrylát (PMMA), známy pod názvem plexisklo. Kontaktní čočky se z tohoto materiálu vyrábějí lisováním ve formách, které se skládají ze dvou částí. Materiál se nejprve zahřeje infračerveným zářením a poté se z něho vylisuje ve formě kontaktní čočka. Tento způsob výroby je rychlý, ale výrobce musí mít velké množství forem, odpovídajících čočkám s různými parametry. Další metoda na výrobu tvrdých kontaktních čoček je soustružení již polymerizovaného materiálu. Polotovar z polymerovaného materiálu se poté opracovává na soustruhu na požadovaný průměr. Nejprve se opracovává vnitřní strana čočky a až poté vnější strana. Po dokončení soustružení má kontaktní čočka všechny požadované parametry a její povrch se leští, aby byl dokonale hladký. Po vyleštění následuje přeměření požadovaných parametrů a čištění čočky od nečistot a látek vzniklých při výrobě [21].

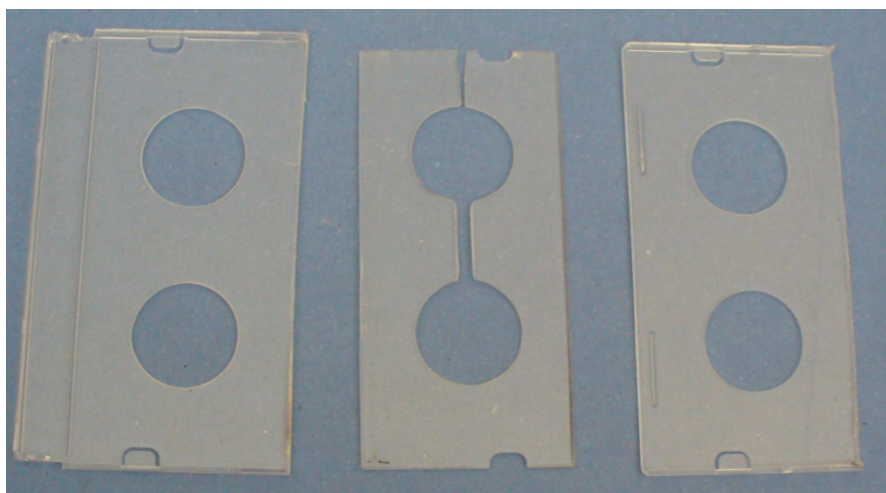
3.5.2 Výroba měkkých kontaktních čoček

Měkké kontaktní čočky se vyrábějí odstředivým litím, nebo litím do formy. Při použití metody odstředivého lití se do odlévací formy aplikuje odměřené množství monomeru. Těsně před započítím výrobního procesu se spustí polymerace monomeru přidáním katalyzátoru. Čočka se během výroby stále otáčí a odstředivou silou vzniká požadovaný tvar kontaktní čočky. Výsledné parametry čočky ovlivňuje množství použitého monomeru a hlavně rychlost otáček při polymeraci. Druhá, častější metoda výroby kontaktních čoček je lití do formy. Přesně odměřený kapalný monomer se nejprve aplikuje do jedné části formy s požadovanými parametry a poté se zalisuje druhou částí formy. Během lisování dochází vzniklým teplem a tlakem k polymeraci. Po dokončení výrobního procesu se z formy vyndá již hotová kontaktní čočka bez nutnosti dalšího opracování. Na výrobu měkkých kontaktních čoček se nejčastěji používají hydrogely jako je poly(2-hydroxyethylmethakrylát s přidáním jednoho procenta ethylendimethakrylátu [21]. Jako další materiály se používají silikon-hydrogely. Často používaný zástupce silikon-hydrogelových čoček je materiál vzniklý smícháním hydrogelové složky ve formě 1-vinyl-2-pyrrolidon a silikonové složky, kterou tvoří polydimethylsiloxan [21].

4. Elektricky ovládaná čočka

4.1 Rámeček soustavy

Základ této soustavy tvoří plastový rámeček, který spojuje čočku s umělým svalem, který nepřímo ovládá čočku. Rámeček, který je vyobrazen na Obr. je vyroben z polypropylenového obalu na CD. Rámeček je složen ze tří vrstev a má vnější rozměr 7cm x 12cm. Tento rozměr se odvíjí od velikosti CD krabičky. Ve dvou vnějších vrstvách jsou vyřezány dva kruhové otvory o průměru 3cm, jejichž účel bude popsán v dalších kapitolách. Ve vnitřní vrstvě rámečku jsou také vyřezány dva kruhové otvory o stejném průměru, které jsou spojeny kanálkem (viz Obr. 13.). Na vnějších vrstvách jsou záměrně ponechané okraje původního CD obalu pro zvýšení pevnosti vzorku. Bohužel rámečky z obalu na CD jsou velmi křehké, a proto byly nahrazeny rámečky vyrobenými ze sklolaminátových desek (viz příloha 10.1), které se používají k výrobě desek plošných spojů.



Obr. 13. Plastový rámeček soustavy.

4.2 Příprava umělého svalu

Pro konstrukci vzorku soustavy čočka-elektricky ovládaný umělý sval je na umělý sval použita již výše zmiňovaná akrylátová páska *VHBTM 4910* vyráběná společností *3MTM*.

Tato viskoelastická oboustranně lepicí transparentní akrylátová páska vyniká vysokým rozsahem elastických deformací, poměrně vysokou dielektrickou konstantou a dobrou elektrickou i mechanickou pevností. Páska je vyráběna v šířce 5 cm a tloušťce 1 mm. Tato tloušťka je pro výrobu umělého svalu příliš velká, proto je potřeba pásku nejdříve

natáhnout, a tím snížit její tloušťku. Dle [3] je možné pásku natáhnout až o 500 %. Pro potřeby výroby svalu pro tento účel je vhodné pásku natáhnout na rozměr 20 cm x 20 cm. Vztah (5), který udává relativní prodloužení v procentech

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l} = \frac{l-L}{L} \quad (5)$$

kde L je původní délka strany a l je délka strany po natažení. Pomocí předchozího vztahu lze spočítat relativní prodloužení po natažení na požadovaný rozměr.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l} \cdot 100 \% = \frac{l-L}{L} \cdot 100 \% = \frac{20-5}{5} \cdot 100 \% = \underline{300 \%}$$

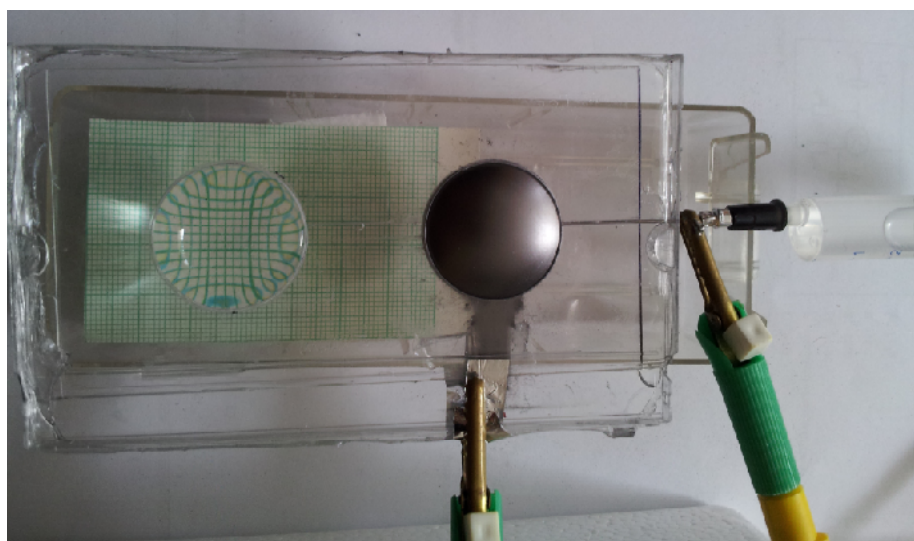
Původní rozměr pásky je tedy natažen o 300 %. Aby bylo natažení pásky rovnoměrné v obou směrech, je použit přípravek zobrazený v příloze 10.2. Po natažení pásky na požadovaný rozměr je na ni nalepen rámeček popsáný v předchozí kapitole 4.1.

4.3 Elektrody

Elektrody na výrobu umělého svalu musí splňovat určité parametry, mezi které patří velká mechanická poddajnost, stálá vodivost i při ohybu polymeru a časová stabilita elektrod. Tyto vlastnosti elektrody musí být, aby byla zajištěna stálá vodivost i při maximální možné deformaci polymeru. Na výrobu elektrod lze použít například, uhlíkový prach, vodivé vazelíny, nebo vhodně uzpůsobené slabé kovové fólie. Více informací o testování různých elektrod v [3]. Pro kontaktování této dielektrické pásky se nejvíce osvědčil uhlíkový prach. Vzhledem k tomu, že páska zůstává i po natažení lepivá, vetřený uhlíkový prach na ní dobře drží, nepadává a vytvoří rovnoměrnou velmi tenkou, ale přitom přiměřeně vodivou vrstvu. Elektrody z uhlíkového prachu jsou velmi mechanicky poddajné, i při deformaci polymeru mají stále dobrou vodivost a jsou časově velmi stálé.

4.4 Elastická čočka

Elastická čočka je v tomto prípade tvořená veľmi tenkým filmom dielektrické pásky naplnené vodou. Pro odstranění problémů s elektrodami uvnitř zásobníku, byl použit místo čisté vody 10% roztok chloridu sodného. Samotná čočka má kruhový tvar o průměru 3 cm a díky vedlejšímu zásobník s tekutinou a přepouštěcímu kanálku dokáže měnit svoji optickou mohutnost. Takto připravená čočka má index lomu 1,34. Na Obr. 14. je patrné poduškovité zkreslení, které bylo vysvětleno v teoretické části.



Obr. 14. Soustava elektricky ovládaní elastické čočky.

4.5 Ovládání umělého svalu

Dielektrický umělý sval potřebuje pro svoji činnost vysoké napětí v řádu jednotek kilovoltů, proto je pro napájení, ale také řízení, použit počítačem řízený vysokonapěťový pulzní zdroj. Podrobné informace o použitém zdroji v [25]. Tento zdroj generuje přibližně lichoběžníkové pulzy s amplitudou od 0 V až do 7 kV a dobou trvání od 50 ms do 5000 ms. Velikost napětí tohoto zdroje našim účelům zcela vyhovuje, nicméně by se nám hodily delší doby trvání úrovní, zejména horní úrovně signálu.

5. Měření soustavy

Měření soustavy probíhalo na provizorní optické lavici, kdy jako zdroj světla byl použit vyřazený diaprojektor. Světelný svazek procházel přes rámeček s motivem, který tvořila milimetrová mřížka. Zobrazovaný motiv byl poté promítán na stínítko ve vzdálenosti 43 cm od čočky a pomocí čočky byl obraz zaostřován. Obrazová vzdálenost se při měření měnila podle následujících tabulek.

Měření probíhalo při dvou objemech tekutiny v soustavě a to při 5 ml a 8 ml. Naměřené hodnoty uvádí následující tabulka Tab. 2

- 5ml

Tab. 2. Naměřené a dopočítané parametry čočky při 5 ml slané vody v soustavě.

napětí (V)	904	1062	1219	1416	1612	1848	2006	2202
a (cm)	8,3	8,4	8,5	8,6	9	9,2	9,3	9,9
f (cm)	10,29	10,44	10,59	10,75	11,38	11,70	11,87	12,86
φ (D)	9,72	9,58	9,44	9,3	8,79	8,55	8,42	7,78

2478	2635	2831	3028	3264	3421	3657	3846	4011
10,4	10,9	11,6	12,4	13	13,8	15,3	16,6	18,4
13,72	14,60	15,89	17,42	18,63	20,32	23,75	27,04	32,16
7,29	6,85	6,3	5,74	5,37	4,92	4,21	3,7	3,11

- 8ml

Tab. 3. Naměřené a dopočítané parametry čočky při 8 ml slané vody v soustavě.

napětí (V)	904	1022	1219	1416	1612	1809	2006	2202
a (cm)	4,7	5	5,2	5,3	5,5	5,6	5,7	5,8
f (cm)	5,28	5,66	5,92	6,05	6,31	6,44	6,57	6,70
φ (D)	18,94	17,67	16,89	16,53	15,85	15,53	15,22	14,93

2452	2674	2831	3028	3264	3421	3618	3815	4011
5,9	6,1	6,5	6,9	7,6	8,5	9	9,7	10,8
6,84	7,11	7,66	8,22	9,23	10,59	11,38	12,53	14,42
14,62	14,06	13,05	12,17	10,83	9,44	8,79	7,98	6,93

Během měření byly zaznamenávány předmětové vzdálenosti při ostrém obrazu na stínítku v závislosti na připojeném napětí. Z naměřených předmětových vzdáleností a ze známé obrazové vzdálenosti lze snadno podle zobrazovací rovnice čočky (6) dopočítat ohniskovou vzdálenost pro dané napětí jako

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (6)$$

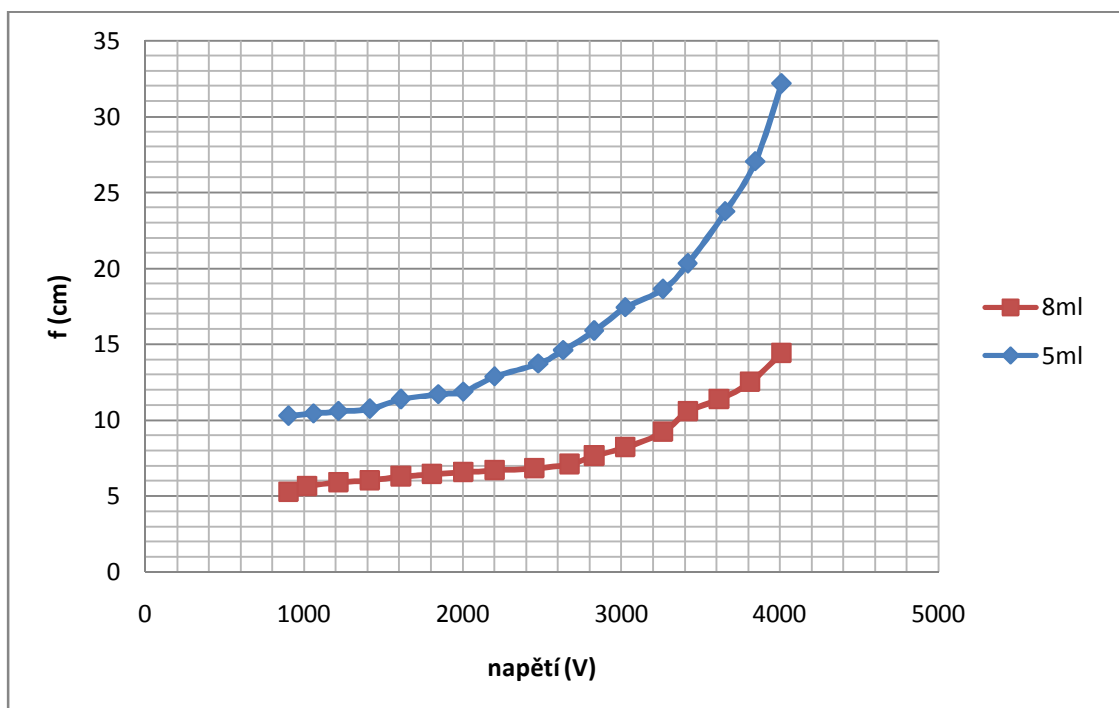
kde f je ohnisková vzdálenost, a je předmětová vzdálenost a a' je obrazová vzdálenost. Protože je prostředí před a za čočkou stejné $f = f'$. Po dosazení pro napětí 904 V vychází

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f} = \frac{1}{43} - \frac{1}{8,3} = \frac{347}{3569} \Rightarrow \underline{f = 10,29 \text{ cm}}$$

Optická mohutnost čočky se podle vztahu (4) uvedeného v teoretické části vypočítá jako

$$\varphi = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,1029} = \underline{9,72 \text{ D}}$$

kde φ je optická mohutnost a f je ohnisková vzdálenost čočky dosazovaná v metrech.



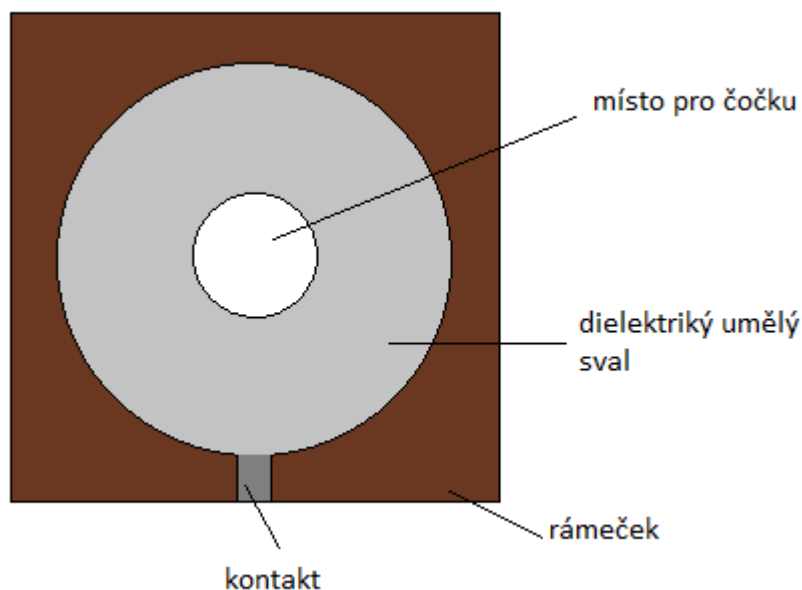
Obr. 15. Graf závislosti ohniskové vzdálenosti na napětí pro dvě konfigurace čočky

Měřením bylo zjištěno, že při naplnění soustavy 5ml slané vody lze měnit ohniskovou vzdálenost o více než 20 cm a to od 10,29 cm do 32,16 cm. Optická mohutnost se mění od

hodnoty 9,72 D při 904 V do 3,11 D při maximálním napětí 4011 V. Při naplnění soustavy 8 ml slané vody dosahovala změna ohniskové vzdálenosti přibližně 9 cm a to od hodnot 5,28 cm do 14,42 cm. Optická mohutnost se v tomto případě mění od 18,94 D při napětí 904 V do hodnoty 6,93 D pro 4011 V. Z měření vyplývá, že větších změn ohniskové vzdálenosti se dosahuje při 5 ml kapaliny v soustavě. Nicméně podle způsobu použití lze použít i jiné objemy.

6. Pokusy o další soustavy

Další možný způsob realizace elektricky ovládané optické mohutnosti čočky je použití čočky z pružného materiálu. Čočka by byla natahována okolním umělým dielektrickým svalem, který by v závislosti na připojeném napětí natahoval elastickou čočku, která by tím měnila optické vlastnosti. Bohužel tento typ soustavy se nepodařilo realizovat, neboť žádná z mnoha oslovených firem vyrábějících optiku nebyla ochotna vyrobit takovou čočku.



Obr. 16. Návrh elektricky nastavitelné optické mohutnosti čočky

Návrh soustavy je znázorněn na Obr. 16. Umělý sval navržený pro tuto soustavu je dielektrického typu vytvořený z již výše zmiňované akrylátové pásky VHB 4910 kontaktované z obou dvou stran grafitovým prachem. Sestavený aktuátor má tvar kruhu

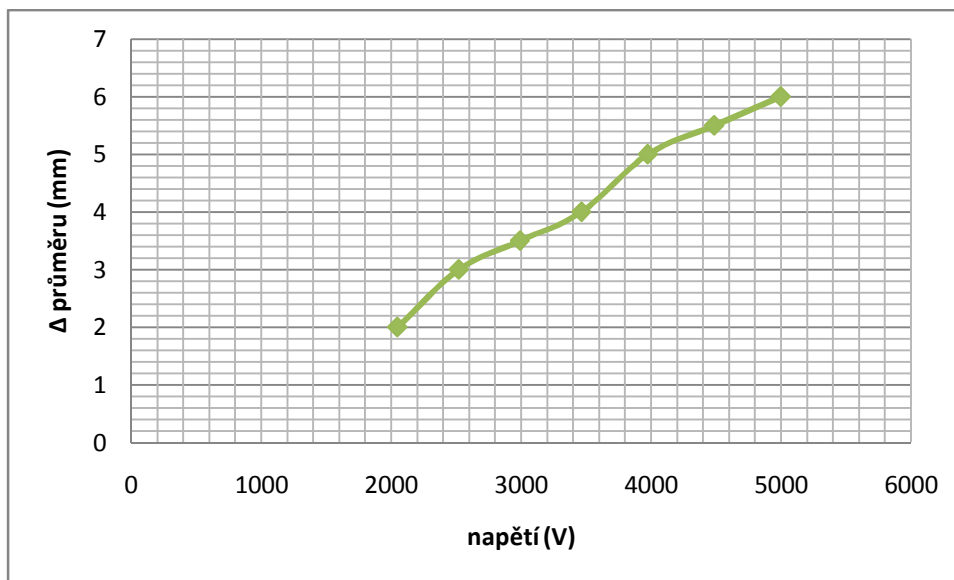
o vnějším průměru 14 cm a vnitřním průměru 5 cm, kde by měla být umístěna elastická čočka.

Měřením vlastností aktuátoru pro tuto soustavu byly zjištěny změny průměru v oblasti umístění čočky v závislosti napětí. Výsledky měření obsahuje Tab. 4.

Tab. 4. Změny průměru v oblasti čočky v závislosti na napětí.

napětí (V)	2045	2517	2989	3461	3972	4483	4994
Δ průměru (mm)	2	3	3,5	4	5	5,5	6

Zvětšování vnitřního kruhu (místa pro čočku) má podle obr. 17 takřka lineární průběh, kdy se zvyšujícím se napětí ne umělý sval více smršťuje, a tím se zvětšuje vnitřní kruh, tedy čočka by byla více napínána.



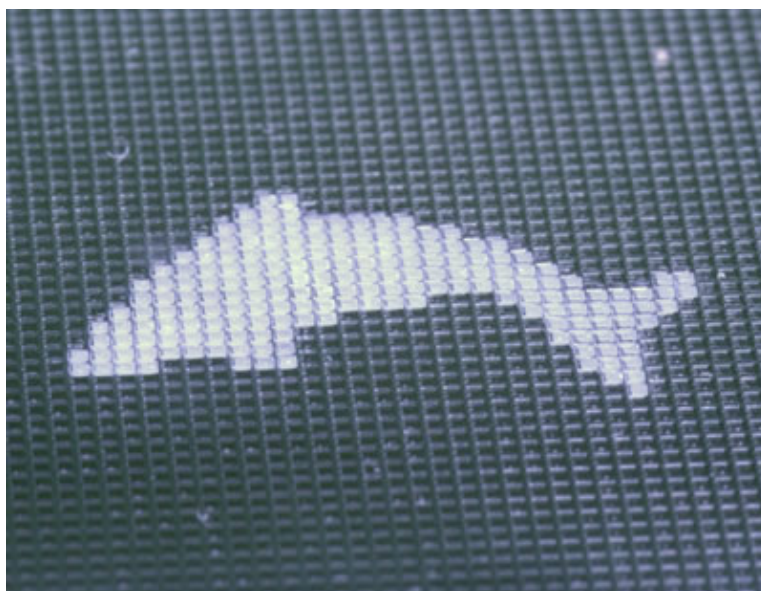
Obr. 17. Graf závislosti změny průměru na napětí

7. Další multimediální využití EAP

Umělé svaly mají mnohostranné využití od protéz, robotů až po samozatmívací žaluzie. V multimediální technice je lze využít například displej pro čtení Braillova písma nebo, průhledný reproduktor.

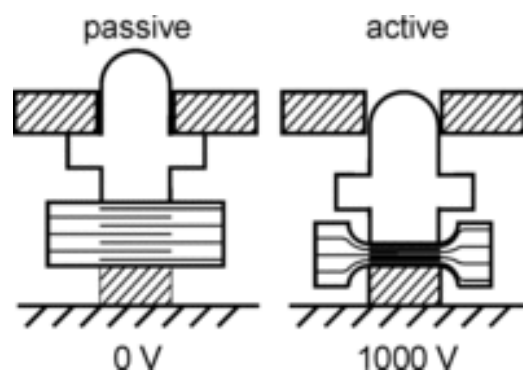
7.1 Hmatové displeje

Hmatové displeje využívající elektroaktivní polymery slouží především pro osoby se zrakovým postižením. Typický příklad hmatového displeje je na Obr. 18. Kdy vhodně zvolenými barvami podložky a jednotlivých pohyblivých elementů lze displej použít jak pro dvojbarevné zobrazení, tak i pro zobrazení Braillova písma.



Obr. 18. Hmatový displej. Převzato z [26].

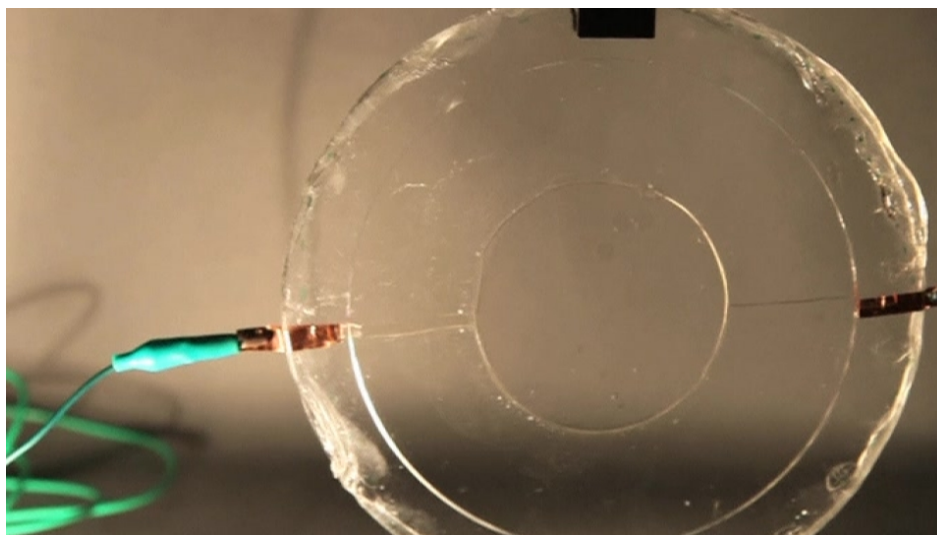
Princip hmatového displeje využívajícího dielektrický polymer je znázorněn na Obr. 19. Bez připojeného napětí je elastomer v původní velikosti a element je zobrazen na displeji, v případě připojeného napětí se elastomer smrští a element zůstane na úrovni podložky a je nehmatatelný. Tato technologie umožňuje vytvářet elementy až do velikosti 1 mm, což je lidský hmatový práh [27].



Obr. 19. Princip hmatového displeje. Převzato z [27].

7.2 Iontový reproduktor

Iontové vodiče, z nichž je také vyroben iontový reproduktor, mají proti klasickým vodičům řadu výhod. Největší výhodou je, že jakékoliv natažení nezpůsobí změnu elektrického odporu a další velkou výhodou je transparentnost vodičů [28]. Iontový reproduktor se skládá ze slabé vrstvy gumy sevřené mezi dvě průhledné elektrody ze slaného hydrogelu. Tento typ reproduktoru pro svoji činnost potřebuje vysoké napětí. Vysokonapěťový střídavý signál prochází přes jednotlivé vrstvy a nutí vrstvu gumy vibrovat, čímž se produkuje zvuk v celém slyšitelném pásmu od 20 Hz do 20 kHz [28]. Velkou výhodou tohoto reproduktoru je transparentnost a velmi malá tloušťka.



Obr. 20. Iontový reproduktor. Převzato z [29]

8. Závěr

Cíl mé bakalářské práce byl seznámení se s problematikou elektroaktivních polymerů, jejich vlastností, způsobu přípravy aktuátorů a materiálů, které se na jejich výrobu používají. Další spočíval v návrhu, realizaci a proměření soustavy elastické čočky ovládané elektrickým umělým svalem. Poslední bod stanoveného cíle byl najít možnosti dalšího využití elektricky ovládaných umělých svalů v multimediální technice.

Po prostudování odborné literatury týkající se elektroaktivních polymerů bylo zjištěno, že pro účely ovládní čočky se nejvíce hodí použít umělý sval dielektrického typu. Tento typ umělého svalu dosahuje potřebných prodloužení pro ovládní čočky při působení dostatečnou silou. Další velká výhoda dielektrického svalu pro tento účel je jeho stálý tvar a síla při konstantním napětí. Naopak velká nevýhoda tohoto typu aktuátoru je nutnost napájení vysokým napětím v řádu jednotek kilovoltů, další velká nevýhoda je zatím krátká životnost aktuátoru. V práci byla úspěšně navrhována, realizována a proměřena soustava elektricky ovládané elastické čočky. Změna optické mohutnosti čočky je realizována pomocí dvou spojených nádobek, z nichž jedna je elastická čočka a druhá nádobka je tvořena dielektrickým umělým svalem, který v závislosti na připojeném napětí mění svůj tvar, a tím se mění poměr kapaliny mezi zásobníkem a čočkou. Změnou objemu kapaliny v čočce dojde ke změně její optické mohutnosti. Optická mohutnost se při objemu 5 ml mění o přibližně 6 D, při objemu 8 ml se optická mohutnost mění o 12 D. Měřeními byly ověřeny parametry čočky a byly zjištěny zobrazovací vady čočky, mezi které patří poduškovité zkreslení a sférická vada. Poduškovité zkreslení se projevilo tím, že čočka má větší zvětšení na krajích čočky, než ve středu. Sférická vada čočky se projevila neostrotí obrazu směrem k okrajům čočky. Obě tyto vady by bylo možné zatím odstranit pouze použitím vhodné clony, která by zakryla tyto okraje, na kterých dochází k těmto vadám. V případě nalezení nového typu umělého svalu, který bude mít totožné parametry s dielektrickým svalem, ale bude pracovat při nižším napětí by bylo možné využití takto nastavitelné čočky tam, kde je potřeba měnit ohniskovou vzdálenost například v objektivěch. Další možné využití umělých svalů v multimediální technice jsou displeje pro nevidomé, nebo průhledný iontový reproduktor.

9. Literatura

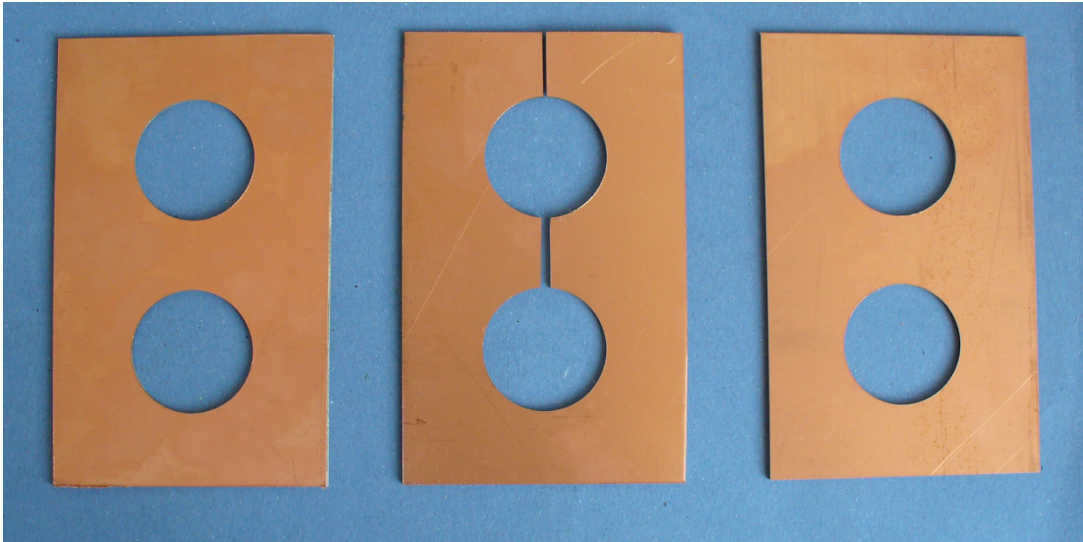
- [1] Bar-Cohen, Y.: *Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential*. Shrnutí autorovy knihy: Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Reality. Potential and Challenges [online]. Dostupné z: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/37602/1/05-1898.pdf>.
- [2] Brochu, P. – Pei, Q.: *Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles*. Macromolecular Rapid Communications. 2010.
- [3] Vlach, J.: *Elektrický umělý sval*. Praha: ČVUT 2012. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky.
- [4] Michel S. a kol.: *A comparison between silicone and acrylic elastomers as dielectric materials in electroactive polymer actuators*. Polym Int 2010.
- [5] Kofod, G.: *Dielectric elastomer actuators*. Denmark, Pitney Bowes Management Services A/S 2001, ISBN 87–550–2924–8, Ph.D. thesis. Technical University of Denmark.
- [6] Kutějová, L.: *Syntetický sval*. Zlín: UTB ve Zlíně 2008. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů.
- [7] Pavelka, P.: *Feroelektrika v elektrickém poli*. Brno: VUT 2012. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [8] Madden, J.: *Relaxor Ferroelectric Polymer Actuators*. The University of British Columbia, Department of electrical and computer engineering [online], 2005 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.actuatorweb.org/index.php?page=actuatorRFP>.
- [9] J. Su, J. S. Harrison, T. L. St. Clair, Y. Bar-Cohen and S. Leary.: *Electrostrictive Grafr Elastomers and Applications* [online], 2000. Dostupné z <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8052409>
- [10] *Carbon Nanotubes: Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine*. Journal of Nuclear Medicine [online], 2007 [cit. 2014-04-29], Dostupné z: <http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039/F1.expansion.html>.
- [11] Fraysse, J. a kol.: *Carbon nanotubes acting like actuators*. Carbon. 2002, 40: pp. 1735–1739.

- [12] Deyle T.: *Electroactive Polymers (EAP) as Artificial Muscles (EPAM) for Robot Applications* [online], [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.hizook.com/blog/2009/12/28/electroactive-polymers-eap-artificialmuscles-epam-robot-applications>
- [13] Vandesteeg, N. A.: *Synthesis and characterization of conducting polymer actuators*. Ph.D. thesis, 2007, Massachusetts Institute of Technology. Dostupné z: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/38514/156557861.pdf>
- [14] S. Nešpůrek, J. Prokeš, J. Stejskal. Vodivé polymery. In: *Časopis vesmír* [online]. Vesmír, spol. s r. o., ISSN 1214-4029, 2001. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z <http://casopis.vesmír.cz/clanky/clanek/id/5505..#box3>
- [15] Randulová, J.: *Akomodace a konvergence*. Brno: Masarykova univerzita v Brně 2008. Bakalářský práce. Masarykova univerzita v Brně, Lékařská fakulta. Dostupná z http://is.muni.cz/th/175182/lf_b/Bakalarska_prace_k40k2.pdf
- [16] Akomodace oka. In. *O zrakových vadách* [online]. <http://www.tyflokabinet-cb.cz>. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z <http://www.tyflokabinet-cb.cz/zrak.htm>
- [17] Čočky - encyklopedie [online]. J. Reichl [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/480-cocky>
- [18] Zmeškal, O.: *Vady optických a zobrazovacích prvků*. Text k přednášce, Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/presentace_2002/01_vady_cocek.pdf
- [19] Kolektiv katedry fyziky FSV ČVUT v Praze: *Geometrická optika*. Text k přednášce, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/aberace_opt_soustav.pdf
- [20] Zavřelová, E.: *Kontaktní čočky – jejich druhy a použití*. Brno: Masarykova univerzita v Brně 2007. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně, Lékařská fakulta. Dostupná z http://is.muni.cz/th/142337/lf_b/zavrelova_eva_bp.pdf
- [21] Sulek, M.: *Materiály kontaktních čoček v současnosti*. Brno: Masarykova univerzita v Brně 2006. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně, Lékařská fakulta. Dostupná z http://is.muni.cz/th/142337/lf_b/zavrelova_eva_bp.pdf
- [22] T. Hirai, J. Zheng, M. Watanabe, H. Shirai. Electrically active polymer materials – application of non-ionic polymer gel and elastomers for artificial muscles [online], 2003. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z <http://www.tex.tuiasi.ro/biblioteca/carti/CARTI/Textile/Smart%20Fibres,%20Fabrics%20and%20Clothing/004.pdf>
- [23] Wikipedia - Electroactive polymers. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electroactive_polymers

- [24] Hradil, A.: *Návrh aktuátoru s využitím smart materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Dostupná z http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40145
- [25] Skořepa, V.: *Zdroj vysokého napětí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze 2012. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra mikroelektroniky.
- [26] *Hydrogel tactile display*. In: Technovelgy [online].Technovelgy 2009. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z <http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=2096>
- [27] M. Matysek, P.Lotz, H. Schlaak. In: *Tactictile display with dielectric multilayer elastomer actuatorsq* [online]. The International Society for Optical Engineering, 2009. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=821756>
- [28] C. Perry. *Transparent artificial muscle plays music*. In: HARWARDgazzete [online]. Harward university, 2013. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z <http://news.harvard.edu/gazette/story/2013/08/transparent-artificial-muscle/>
- [29] Ionic speaker. In: *Researchers make big noise about ionic conductors* [online]. YAHOO, 2013. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z <http://news.yahoo.com/video/researchers-big-noise-ionic-conductors-184002592.html>

10. Přílohy

10.1 Rámeček z desky na plošné spoje



10.2 Přípravek na rovnoměrné natahování

