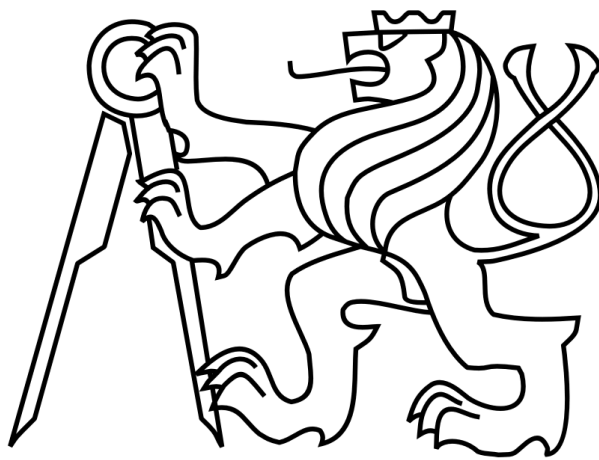


**České vysoké učení technické v Praze**

**fakulta elektrotechnická**

**katedra mikroelektroniky**



**Diplomová práce**

**Aktuátory z dielektrických elastomerů**

**Autor:** Bc. Jan Vlach

**Vedoucí práce:** Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. V L A C H Jan**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Elektronika

Název tématu: **Aktuátory z dielektrických elastomerů**

### **Pokyny pro vypracování:**

1. Prostudujte odbornou literaturu týkající se umělých elektricky ovládaných svalů z dielektrických elastomerů.
2. Na základě 1) upravte měřicí pracoviště pro proměrování vlastností aktuátoru z DE, jako jsou síla, délka a prodloužení v závislosti na přiloženém napětí, krátkodobá a dlouhodobá časová stabilita těchto parametrů (hystereze), vliv stárnutí materiálu.
3. Proveďte měření na několika pokusných vzorcích.
4. Zkonstruuje funkční vzorek svalu pro model kloubu a u něho proveďte charakteristiky dle bodu 2).
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky.

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] <http://eap.jpl.nasa.gov/>
- [2] Y. Bar-Cohen: Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles - Reality, Potential and Challenges, SPIE Press, 2001, ISBN 0-8194-4054-X

Vedoucí: **Ing. Lubor Jirásek, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 27. 1. 2014

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci „Aktuátory z dielektrických elastomerů“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 4. 5. 2014.

Jan Vlach

**ANOTACE:**

Tato diplomová práce navazuje na mou bakalářskou práci [1] a hlouběji se zabývá aktuátory z dielektrických elastomerů. První část práce je věnována obecným parametrům charakterizujícím chování lineárních aktuátorů s důrazem na parametry významné pro lineární aktuátory z dielektrických elastomerů. Prostor je věnován také popisu fyzikálního principu těchto aktuátorů a možnostem konstrukce konkrétních uspořádání využívajících tento princip. V druhé, experimentální části práce jsou proměřeny a porovnány vlastnosti dvou materiálů vhodných ke konstrukci aktuátorů od firmy 3M (VHB<sup>TM</sup> 4910 a VHB<sup>TM</sup> 4905), a to především z hlediska dlouhodobé stability dosahovaných parametrů. Dále je prezentován konkrétní návrh konstrukce lineárního aktuátoru a jeho naměřené parametry. V závěru práce jsou zhodnoceny možnosti uspořádání elementů navržené konstrukce pro aplikaci jako umělý sval pro robotickou končetinu.

*Klíčová slova: aktuátor z dielektrických elastomerů, elastomerové dielektrikum, DEA, VHB 4910, VHB 4905*

**ABSTRACT:**

This diploma thesis follows my bachelor thesis [1] and brings deeper view on dielectric elastomer actuators. In the first part there is an overview about general actuator parameters for characterization of different actuators with an emphasis on parameters relevant for dielectric elastomer actuators. It also describes physical principles of dielectric elastomer actuators and possibilities of different constructions which use that principle. In the second (experimental) part of this thesis, characteristic of two materials suitable for dielectric elastomer actuators from the company 3M (VHB<sup>TM</sup> 4910 and VHB<sup>TM</sup> 4905) are measured and compared in terms of their parameters long term stability. The experimental part deals also with a particular construction of linear dielectric elastomer actuator and its properties description. In the conclusion, possible construction methods for artificial muscles applications in robotics are described.

*Key words: dielectric elastomer actuator, DEA, VHB 4910, VHB 4905*

# Obsah

ZADÁNÍ.....	2
Čestné prohlášení.....	3
Obsah.....	5
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	7
1. Úvod.....	10
2. Obecné parametry aktuátorů.....	14
2.1. Převodní charakteristika.....	14
2.2. Reprodukovatelnost.....	15
2.3. Hystereze.....	16
2.4. Tuhost.....	17
2.5. Zatěžovací charakteristika.....	17
3. Princip aktuátorů s elastomerovým dielektrikem .....	19
3.1. Elektrostatický aktuátor s podélným pohybem .....	19
3.2. Charakteristické vlastnosti DEA .....	21
3.2.1. Předepínání elastomerů.....	23
3.2.2. Vybrané konstrukce lineárních DEA.....	24
3.2.3. Charakter zátěže DEA .....	26
3.2.4. Omezení rychlosti DEA.....	28
3.2.5. Požadavky na napájení .....	28
4. Experiment – porovnání VHB™ 4910 a VHB™ 4905 .....	29
4.1. Materiály a konstrukce vzorků.....	29
4.2. Metodika měření a vyhodnocení výsledků.....	32
4.3. Měření vlivu časového stárnutí .....	32
4.3.1. Výsledky.....	33
4.4. Měření vlivu elektrického namáhání.....	39
4.4.1. Výsledky.....	41
5. Experiment – konstrukce a měření lineárního DEA.....	47

5.1.	Konstrukce lineárního aktuátoru .....	47
5.2.	Metodika měření .....	49
5.3.	Výsledky měření .....	50
5.3.1.	Převodní charakteristika .....	51
5.3.2.	Reprodukovatelnost .....	52
5.3.3.	Hystereze .....	54
5.3.4.	Tuhost aktuátoru .....	57
5.3.5.	Zatěžovací charakteristika .....	58
6.	Závěr .....	59
6.1.	Stručný souhrn práce .....	63
7.	Literatura.....	64
8.	Přílohy.....	66
8.1.	Vybrané fotografie z průběhu experimentu .....	66
8.2.	Přílohy na CD.....	67

---

## Seznam použitých zkratk a symbolů

DEA		Dielectric Elastomer Actuator – aktuátor s elastomerovým dielektrikem, aktuátor z dielektrického elastomeru
FSO		Full Scale Output – rozsah výstupní veličiny
$D$	(m)	tloušťka elastomeru před předeprnutím
$E$	$\left(\frac{V}{m}\right)$	intenzita elektrického pole
$E_{akt}$	(J)	výstupní energie aktuátoru za polovinu cyklu
$E_{aktmax}$	(J)	maximální výstupní energie aktuátoru za polovinu cyklu
$F$	(N)	síla
$F_{akt}$	(N)	síla generovaná ideálním aktuátorem
$F_{pruž}$	(N)	síla generovaná ideální pružinou
$F_{MAX}$	(N)	maximální síla generovaná aktuátorem
$H$	( <sup>1</sup> )	hystereze, největší rozdíl mezi převodními charakteristikami měřenými se vzrůstající vstupní veličinou a sestupující vstupní veličinou
$H_{\%}$	(%)	hystereze, největší rozdíl mezi převodními charakteristikami měřenými se vzrůstající vstupní veličinou a sestupující vstupní veličinou, vztažená k maximálnímu výstupnímu rozsahu
$H_{\%F15s}$	(%)	hystereze síly pro 15 s ustálení na každém měřeném napětí
$H_{\%\Delta15s}$	(%)	hystereze prodloužení pro 15 s ustálení na každém měřeném napětí
$H_{\%F60s}$	(%)	hystereze síly pro 60 s ustálení na každém měřeném napětí
$H_{\%\Delta60s}$	(%)	hystereze prodloužení pro 60 s ustálení na každém měřeném napětí
$L$	(m)	rozměr strany konstrukční plochy vzorku po natažení – střední obvod konstrukčního rámu
P	(-)	pracovní bod aktuátoru
$Q$	(C)	elektrický náboj
$Rep_{ik}$	( <sup>1</sup> )	reprodukovatelnost, největší rozdíl mezi i-tou a k-tou převodní charakteristikou
$Rep_{ik\%}$	(%)	reprodukovatelnost, největší rozdíl mezi i-tou a k-tou převodní charakteristikou, vztažená k maximálnímu výstupnímu rozsahu
$Rep_{\%F}$	(%)	reprodukovatelnost síly
$Rep_{\%\Delta l}$	(%)	reprodukovatelnost prodloužení
$S$	(m <sup>2</sup> )	plocha

---

$\Delta S_{\%}$	(%)	procentuální nárůst plochy elektrod
$\Delta S_{1.den}$	(%)	plošná výchylka měřená na vzorku starém 1 den
$\Delta S_{28.den}$	(%)	plošná výchylka měřená na vzorku starém 28 dnů
$\Delta S_{MAX}$	(%)	největší plošná výchylka po elektrickém namáhání vzorků
$\Delta S_{MIN}$	(%)	nejmenší plošná výchylka po elektrickém namáhání vzorků
$U$	(V)	elektrické napětí
$U_{dol}$	(V)	spodní úroveň průběhu napětí používaného k elektrickému namáhání vzorků
$U_{hor}$	(V)	horní úroveň průběhu napětí používaného k elektrickému namáhání vzorků
$U_{MAX}$	(V)	nejvyšší elektrické napětí přikládáné na jednotlivé vzorky
$W_C$	(J)	energie elektrostatického pole v kondenzátoru
$d$	(m)	tloušťka dielektrika bez napětí
$d_{akt}$	(m)	tloušťka dielektrika po přiložení napětí
$k$	$\left(\frac{N}{m}\right)$	tuhost
$k_{akt}$	$\left(\frac{N}{m}\right)$	tuhost ideálního aktuátoru
$k_{pr}$	$\left(\frac{N}{m}\right)$	tuhost ideálního prostředí
$l$	(m)	velikost strany konstrukční plochy vzorku před předeprnutím
$l_0$	(m)	délka měřené části lineárního aktuátoru bez napětí
$\Delta l$	(m)	lineární výchylka aktuátoru
$\Delta l_{MAX}$	(m)	maximální prodloužení aktuátoru
$p$	(Pa)	elektrostatický tlak
$px$	(-)	počet pixelů, které zabírají elektrody s přiloženým napětím
$px_0$	(-)	počet pixelů, které zabírají elektrody bez napětí
$s$	(%)	procentuální hodnota o kolik je předeprnuta elastomerová vrstva
$s_x, s_y, s_z$	(%)	procentuální hodnota o kolik je prodloužena elastomerová vrstva v jednotlivých směrech v prostoru
$x(t)$	( <sup>1</sup> )	obecná časově proměnná vstupní veličina
$x_{akt}$	(m)	výchylka zatíženého ideálního lineárního aktuátoru
$x_{max}$	(m)	maximální výchylka nezatíženého ideálního lineárního aktuátoru
$x_{PC\%}$	(%)	procentuální prodloužení měřené části lineárního aktuátoru



---

$x_{PC}$	(-)	velikost měřené části lineárního aktuátoru s přiloženým napětím v jednotkách rastru grafického programu
$x_{0PC}$	(-)	velikost měřené části lineárního aktuátoru bez napětí v jednotkách rastru grafického programu
$y(t)$	<sup>(1)</sup>	obecná časově proměnná výstupní veličina
$y_{FSO}$	<sup>(1)</sup>	maximální rozsah výstupní veličiny – Full Scale Output
$y_i(x)$	<sup>(1)</sup>	výstupní veličina $i$ -té převodní charakteristiky
$y_k(x)$	<sup>(1)</sup>	výstupní veličina $k$ -té převodní charakteristiky
$y_{MAX}$	<sup>(1)</sup>	maximální hodnota výstupní veličiny
$y_{MIN}$	<sup>(1)</sup>	minimální hodnota výstupní veličiny
$y_{\downarrow}(x)$	<sup>(1)</sup>	hodnota převodní charakteristiky při klesající vstupní veličině
$y_{\uparrow}(x)$	<sup>(1)</sup>	hodnota převodní charakteristiky při stoupající vstupní veličině
$\varepsilon_0$	$\left(\frac{F}{m}\right)$	permitivita vakua
$\varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita

---

<sup>1</sup> V závislosti na výstupní veličině aktuátoru

# 1. Úvod

Vývoj elektrotechniky v posledních desetiletích vytváří velký prostor pro elektronické zpracování informací. Elektronické zpracování je velice výhodné i u signálů a informací neelektrického původu. Mnoho současných elektronických systémů se tak neobejde bez převodu neelektrických veličin na elektrické a naopak. Jakýkoli elektronický systém, který definovaně reaguje na nějakou vnější fyzikální veličinu, popřípadě definovaně ovlivňuje vnější fyzikální veličinu, má na svém vstupu, popřípadě výstupu blok, který tuto mezidoménovou „komunikaci“ zprostředkovává. Uvažujme rozdělení všech fyzikálních veličin do šesti základních energetických (signálových) domén: elektrické, mechanické, magnetické, biochemické, teplotní a domény záření. Pro elektronické zpracování fyzikálních veličin neelektrických domén (např. teplota, tlak, pohyb, ...) je třeba využít převodník neelektrické veličiny na elektrickou – *senzor*. V případě potřeby ovlivnit neelektrickou veličinu elektronicky zpracovaným signálem je třeba použít převodník z elektrické veličiny na neelektrickou – *aktuátor*. Znárodnění jednoduchého systému, který reaguje na vnější neelektrickou veličinu, elektronicky ji zpracovává a po zpracování ovlivňuje neelektrickou veličinu, je na Obr. 1.



**Obr. 1.: Základní struktura systému elektronicky zpracovávajícího neelektrickou veličinu a působící na neelektrickou veličinu.**

Tato práce se zabývá vlastnostmi a návrhem elektrostatického aktuátoru s elastomerovým dielektrikem. **Aktuátory s elastomerovým dielektrikem (aktuátory z dielektrických elastomerů, dielectric elastomer actuator, DEA)** jsou často v odborných publikacích zařazovány do skupiny tzv. elektroaktivních polymerů. Rešerší odborné literatury zabývající se studiem mechanismů generování pohybu různých elektroaktivních polymerů se zabývá má bakalářská práce [1]. Generace pohybu u DEA se v mnohém odlišuje od většiny elektroaktivních polymerů. DEA pracují na principu elektrostatického aktuátoru s podélným pohybem, kdy dochází k přibližování dvou elektrod

elektrostatickou silou. Principu elektrostatických aktuátorů se hlouběji věnuje kapitola 3.1. Dielektrikum DEA je tvořeno nestlačitelným elastickým filmem (v této práci akrylovými páskami firmy 3M, VHB™ 4910 a VHB™ 4905) díky němuž mají tyto aktuátory mnohé zajímavé vlastnosti.

Elektrostatické aktuátory se používají především v mikroelektromechanických systémech (MEMS), kde lze využít jejich jednoduchou konstrukci, kompatibilitu s CMOS technologií a možnost generování velké síly vzhledem k rozměrům systému [2]. Nevýhodou je potřeba poměrně vysokého napětí, i když v MEMS je díky malým rozměrům tato nevýhoda do značné míry kompenzována. Ovládací napětí elektrostatických aktuátorů v MEMS se podle [2] pohybuje v řádu desítek voltů. Při zvětšování rozměrů, především pak vzdálenosti elektrod, je potřeba k vybuzení stejného elektrického pole výrazně vyšší napětí. Typické hodnoty tloušťky elastomerového dielektrika (vzdálenosti elektrod), napětí a elektrického pole v provozním režimu DEA z materiálů VHB™ 4910 a VHB™ 4905 shrnuje podle vlastního výzkumu Tab. 1.

<b>Materiál</b>	<b>Tloušťka membrány<sup>2</sup></b>	<b>Provozní napětí</b>	<b>Elektrické pole</b>
VHB™ 4910 VHB™ 4905	cca 50 μm	cca 4 kV	cca 80 V/μm

**Tab. 1.: Typické provozní parametry aktuátoru s membránou z pásky VHB™ 4910**

Transparentní akrylové pásky VHB™ vyráběné společností 3M, které jsou podle odborných publikací často používané v mnohých experimentech s DEA, jsou vyráběny v tloušťkách 1 mm (VHB™ 4910) nebo 0,5 mm (VHB™ 4905). Pro dostatečné snížení napájecího napětí aktuátoru je nutné tyto pásky předepnout, a tím snížit jejich tloušťku na řádově desítky mikrometrů. Toto předepnutí materiálu má kromě potřebného snížení tloušťky vliv také na další vlastnosti dielektrické vrstvy, jako je její dielektrická pevnost (více informací např. v [3][4]), časová stabilita parametrů aktuátorů a v neposlední řadě udává možná konstrukční uspořádání. Mnoho odborných prací zabývajících se DEA, kde

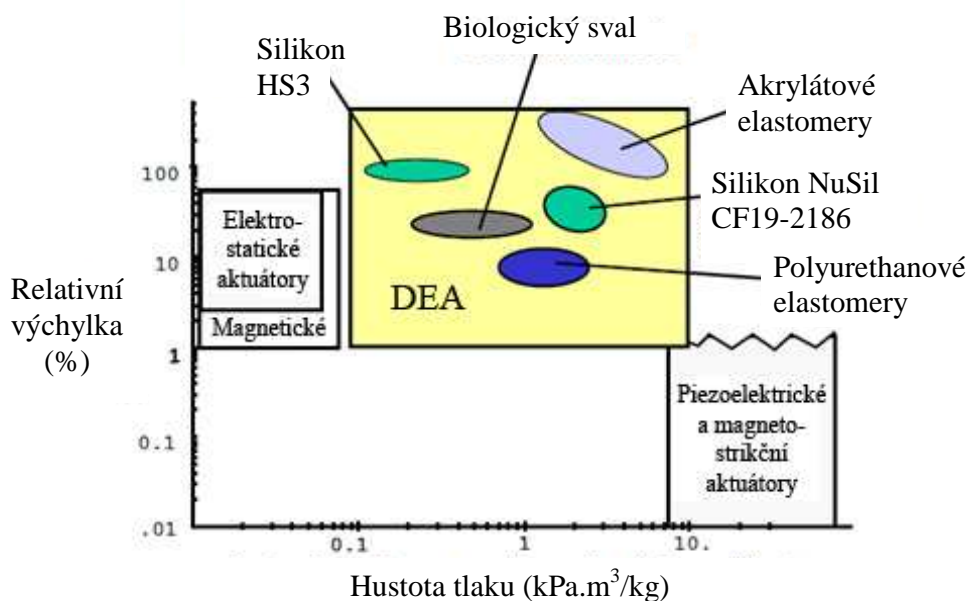
---

<sup>2</sup> Hodnoty tloušťky v tabulce platí po nezbytném předepnutí materiálu.

dielektrikum tvoří páska VHB<sup>TM</sup> 4910, reportuje dosažení velkých výchylek až 380 % [11]. Málo se jich ale zabývá tím, zda lze těchto velmi dobrých parametrů dosahovat dlouhodobě, což je jedna z klíčových vlastností pro praktické použití aktuátorů založených na tomto materiálu.

Jedním z cílů této práce bylo experimentálně ověřit časovou stabilitu vlastností elastomerů VHB<sup>TM</sup> 4910 a VHB<sup>TM</sup> 4905 jako dielektrik v DEA. Výsledky tohoto srovnání mohou říci mnoho o potenciálu VHB<sup>TM</sup> materiálů pro praktické použití, kdy je nutné dosahovat konzistentních vlastností po delší dobu. V druhé části experimentu byl navržen vzorek lineárního aktuátoru a změřeny jeho vybrané parametry. Konstrukce vzorku byla přizpůsobena zamýšlené aplikaci jako pohonu robotické končetiny. Možnosti použití a vylepšení měřeného aktuátoru jsou diskutovány v závěru práce.

Hlavní motivace k výzkumu DEA je jejich odlišnost od ostatních v současné době používaných aktuátorových technologií, a to zejména v rozsahu a principu generace pohybu. Generovat lineární pohyb je jen jedna z mnoha možností využití potenciálu DEA. Mezi další možné aplikace patří např. mikropumpy [5], adaptivní čočky [6], tvarovatelné aerodynamické prvky [7] apod. Srovnání různých lineárních aktuátorových technologií z hlediska generované síly a výchylky orientačně shrnuje Obr 2.



Obr. 2.: Orientační porovnání lineárních aktuátorových technologií (převzato z [8])

DEA se podle Obr 2. z hlediska poměru síly a výchylky nejvíce blíží k pro člověka přirozenému poměru z hlediska pohybu vlastních lidských biologických aktuátorů – svalů. Proto jsou lineární (lineární ve smyslu generování lineárního pohybu, ne ve smyslu lineární závislosti výchylky na napětí) DEA zajímavé především pro konstrukci pohonů robotických končetin apod.

## 2. Obecné parametry aktuátorů

Na DEA, jakožto aktivní<sup>3</sup> převodníky elektrické veličiny na fyzikální, lze podle [2] pohlížet jako na systém s časově proměnným vstupem  $x(t)$  a výstupem  $y(t)$ . Obecná rovnice chování takového aktivního systému má tvar

$$y(t) = f(x(t)). \quad (1)$$

Převodníky elektrické veličiny v neelektrickou jsou široká skupina systémů, založených na nejrůznějších fyzikálních jevech, systémů, které působí na jakékoli fyzikální nebo biochemické prostředí. Za účelem jejich charakterizace lze sestavit skupinu několika parametrů, které lze obecně definovat pro jakýkoli systém se vstupní veličinou  $x(t)$  a výstupní veličinou  $y(t)$ . Jejich vyčerpávající popis uvádí [2]. V této kapitole uvádím podle této literatury pouze parametry významné pro charakterizaci lineárních DEA. Většina těchto parametrů je považována za statické, tzn. že nereflektují dynamické jevy. U DEA je složité určit tyto parametry a přitom eliminovat dynamické jevy v elastomeru (především silnou viskoelasticitu). Vzhledem k tomu nejsou tyto parametry určené v experimentální části pouze statické, ale reflektují i dynamické procesy v materiálu.

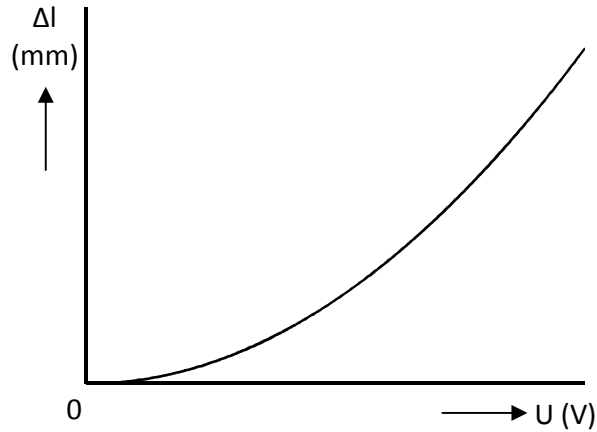
### 2.1. Převodní charakteristika

Převodní charakteristika definuje vztah mezi vstupní a výstupní veličinou, konkretizuje obecnou rovnici (1). Ideální aktuátor má lineární závislost výstupní veličiny na vstupní. U reálného aktuátoru mohou mít převodní charakteristiky různé tvary, podle principů, na kterých dané aktuátory pracují, a jejich konstrukce. Tlak elektrod způsobující pohyb u DEA je podle (13) v kapitole 3.2. závislý na kvadrátu elektrického pole. Převodní charakteristika základního elementu DEA se pro malé výchylky blíží kvadratické funkci. Přesné modelování převodní charakteristiky je však u DEA značně obtížné. Při návrhu modelu je třeba počítat s materiálovými vlastnostmi elastomeru i elektrodové vrstvy,

---

<sup>3</sup> Aktivním (generátorovým) aktuátorem myslíme aktuátor, který nepotřebuje jiný zdroj napájení, než je vstupní veličina  $x(t)$ .

možném stárnutí materiálu, konkrétním geometrickém uspořádáním apod. Některé modely elektromechanického chování DEA publikuje [3][9].



**Obr. 3.:** Příklad jedné z možných převodních charakteristik aktivního lineárního aktuátoru, vstupní veličina je budící napětí a výstupní veličina je výchylka aktuátoru

### 2.2. *Reprodukovatelnost*

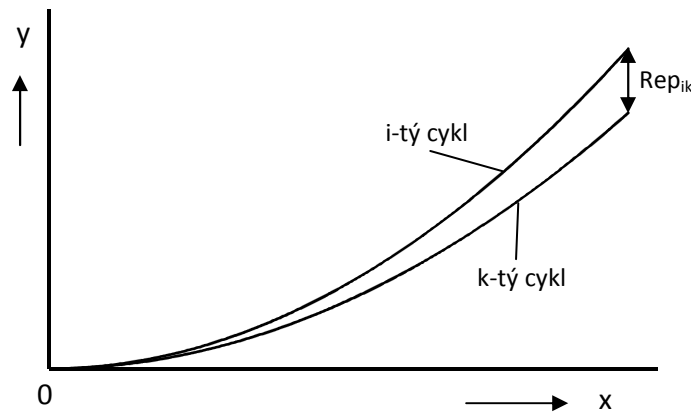
Reprodukovatelnost aktuátoru charakterizuje jeho schopnost generovat stejné hodnoty akční veličiny při více cyklech činnosti při stejné vstupní veličině. Můžeme ji definovat vztahem

$$Rep_{ik} = y_i(x) - y_k(x), \quad (2)$$

kde  $Rep_{ik}$  je reprodukovatelnost výstupní veličiny mezi  $i$ -tým a  $k$ -tým cyklem,  $y_i(x)$  je hodnota výstupní veličiny  $i$ -tého cyklu a  $y_k(x)$  je hodnota výstupní veličiny  $k$ -tého cyklu. Určuje se zpravidla při té hodnotě vstupní veličiny, při které je rozdíl (2) největší. Reprodukovatelnost lze vztáhnout k maximálnímu rozsahu výstupní veličiny aktuátoru tak, aby bylo možné porovnávat různé vzorky s jiným výstupním rozsahem:

$$Rep_{ik\%} = \frac{Rep_{ik}}{y_{FSO}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

kde  $y_{FSO} = y_{MAX} - y_{MIN}$  je maximální rozsah výstupní veličiny aktuátoru. Reprodukovatelnost je graficky znázorněna na Obr. 4. a je to jeden z důležitých parametrů DEA.



Obr. 4.: Grafické určení reprodukovatelnosti

### 2.3. *Hystereze*

Hystereze aktuátoru je parametr, který charakterizuje rozdílnost dvou získaných hodnot výstupní veličiny při stejné hodnotě vstupní veličiny, a to tehdy, kdy první hodnota výstupní veličiny byla získána při zvyšování vstupní veličiny a druhá hodnota při následném snižování vstupní veličiny. Dobře tento parametr ilustruje Obr. 5. Hysterezi lze definovat jako

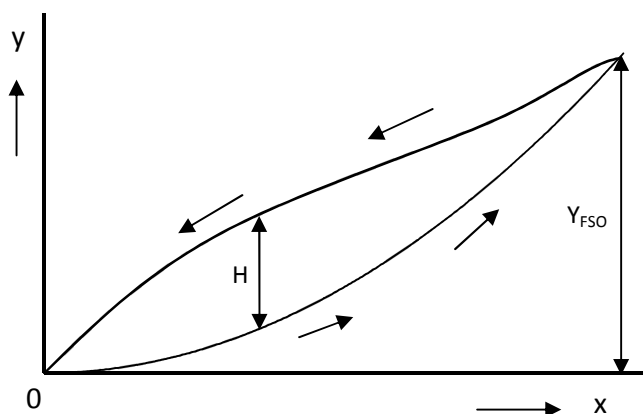
$$H = y_{\uparrow}(x) - y_{\downarrow}(x), \quad (4)$$

kde  $H$  je absolutní hodnota hystereze pro danou hodnotu vstupní veličiny,  $y_{\uparrow}(x)$  je výstupní hodnota při stoupající vstupní veličině a  $y_{\downarrow}(x)$  je výstupní hodnota při klesající vstupní veličině. Pro lepší možnosti porovnávání různých aktuátorů s různými maximálními výchylkami lze parametr hystereze, stejně jako u výše uvedené reprodukovatelnosti, vztáhnout k maximálnímu rozsahu výchylky

$$H_{\%} = \frac{H}{y_{FSO}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$



kde  $H_{\%}$  je relativní hystereze vztažená k maximální výchylce,  $H$  je absolutní hodnota hystereze a  $y_{FSO} = y_{MAX} - y_{MIN}$  je celkový rozsah výstupní veličiny aktuátoru. Vzhledem k silné viskoelasticitě často používaného elastomeru VHB<sup>TM</sup> 4910 je hystereze DEA, používajících jako dielektrikum tento materiál, velká a je třeba s ní počítat v návrhu konstrukce aktuátoru a jeho řízení.



Obr. 5.: Hystereze při stoupání (spodní křivka) a klesání (horní křivka) vstupní veličiny

### 2.4. Tuhost

Tuhost aktuátoru podle [9] charakterizuje jeho odolnost proti změně polohy vyvolané vnější silou při konstantním vstupním signálu. Lze ji definovat podobně jako tuhost pružiny vztahem

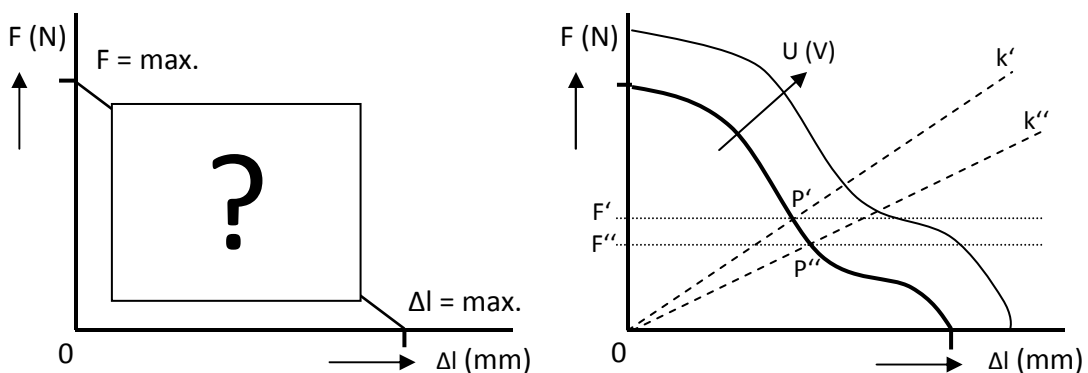
$$k = \frac{\Delta F}{\Delta l}, \quad (6)$$

kde  $k$  je tuhost aktuátoru a  $\Delta F$  je síla vyvolaná natažením aktuátoru o délku  $\Delta l$ . Je však třeba mít na paměti že tuhost DEA je pro větší natažení  $\Delta l$  silně nelineární.

### 2.5. Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristika aktuátoru určuje chování výstupní veličiny aktuátoru při jeho působení na různé okolní prostředí při konstantní vstupní veličině. Z hlediska zatěžování se DEA chovají podobně jako např. piezoelektrické lineární aktuátory. Při přiložení napětí bez jakéhokoli zatížení dosahuje aktuátor maximální možné výchylky

( $\Delta l = \max.$ ) při nulové síle ( $F = 0$ ), kterou působí na okolí (viz Obr. 6.). Při zamezení možnosti jakékoli výchylky (zablokování aktuátoru) a přiložení napětí aktuátor působí na okolí maximální silou ( $F = \max.$ ), ale nevykazuje žádnou výchylku ( $\Delta l = 0$ ). Zatěžovací charakteristiku lineárního aktuátoru můžeme zobrazit grafem s výchylkou  $\Delta l$  na vodorovné a silou  $F$  na svislé ose. Maximální hodnota výchylky, popřípadě síly z výše uvedeného myšlenkového postupu potom tvoří průsečíky s vodorovnou, popřípadě svislou osou. Tyto průsečíky tvoří počátek a konec zatěžovací charakteristiky (tzv.  $F - x$  křivky) jako je na Obr. 6. vlevo. Obr. 6. vpravo potom ilustruje konstrukci průběhu  $F - x$  křivky pomocí zatěžování aktuátoru ideálními pružinami s tuhostmi  $k'$  a  $k''$  kde  $k' > k''$  nebo pomocí zátěží, působících na vzorek silou  $F'$  a  $F''$  kde  $F' > F''$ . Při nulovém přiloženém napětí je pružina v uvolněném stavu a pracovní bod P v počátku souřadnic. Při nenulovém napětí se síla generovaná aktuátorem a síla napínané pružiny vyrovná v rovnovážném bodě  $P'$ , příp.  $P''$ . Změnami tuhosti pružiny lze konstruovat průběh zatěžovací křivky. Podobně lze zatěžovací křivku konstruovat i zatěžováním různou silou  $F$  nebo pomocí postupných změn prodloužení  $\Delta l$  (není vyznačeno).



Obr. 6.: vlevo - konstrukce počátků zatěžovací charakteristiky při měření aktuátoru bez zatížení a s maximálním zatížením; vpravo - konstrukce průběhu zatěžovací charakteristiky pomocí zatěžování ideálními pružinami s tuhostmi  $k'$  a  $k''$  nebo konstantními zátěžemi  $F'$  a  $F''$

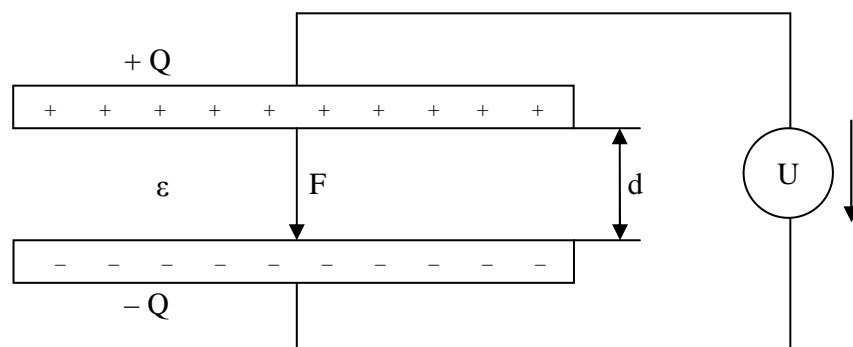
Pro vytvoření představy o chování DEA lze určit pouze maximální sílu a výchylku a předpokládat lineární průběh zatěžovací charakteristiky. V experimentální části práce je pro ilustraci změřen celý její průběh.

### 3. Princip aktuátorů s elastomerovým dielektrikem

DEA, jak bylo zmíněno v úvodu textu, jsou speciální případ elektrostatických aktuátorů s podélným posunem desek. Zásadní rozdíl DEA proti standardnímu uspořádání elektrostatického aktuátoru s podélným posunem desek je v nestlačitelnosti a elasticitě použitého dielektrika. Tyto vlastnosti dielektrika vyžadují specifická konstrukční řešení, ale otevírají další možnosti využití konverze elektrostatické přitažlivé síly na mechanický pohyb.

#### 3.1. Elektrostatický aktuátor s podélným pohybem

Pro první přiblížení k elektrostatickým aktuátorům uvažujme nejprve jednoduchý aktuátor s podélným pohybem s pevnými deskami a vzduchovým dielektrikem. Principiálně lze popsat takový elektrostatický aktuátor jako deskový kondenzátor (v každém kondenzátoru při jeho nabití vzniká síla přitahující desky k sobě) s jednou nebo dvěma uvolněnými deskami. Napětí přiložené na desky způsobí hromadění kladného a záporného náboje na deskách, a to způsobí přitahování desek elektrostatickou silou, viz Obr. 7. Toto i další uspořádání elektrostatických aktuátorů uvádí [2].



Obr. 7.: Ilustrace elektrostatického aktuátoru jako deskového kondenzátoru

Energii elektrostatického pole uloženou v kondenzátoru lze vyjádřit vztahem

$$W_c = \frac{1}{2} CU^2, \quad (7)$$

kde  $W_C$  je energie uložená v kondenzátoru,  $C$  je kapacita kondenzátoru a  $U$  je napětí na deskách kondenzátoru. Kapacitu deskového kondenzátoru určuje známý vztah

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}, \quad (8)$$

kde  $\varepsilon$  je permitivita dielektrika mezi elektrodami,  $S$  je plocha elektrod a  $d$  vzdálenost elektrod. Pokud bychom chtěli vyjádřit sílu, kterou se desky přitahují, můžeme využít vztah o rovnosti síly působící v konzervativním poli a záporného gradientu energie

$$F = -\nabla W_C. \quad (9)$$

Uvažujeme-li silové působení pouze ve směru kolmém na plochu desek kondenzátoru (zanedbáváme okrajové nehomogenity), potom gradient v rovnici (9) přejde v derivaci ve směru vzdálenosti elektrod  $d$ . Vztah pro výpočet síly mezi deskami kondenzátoru potom lze psát jako

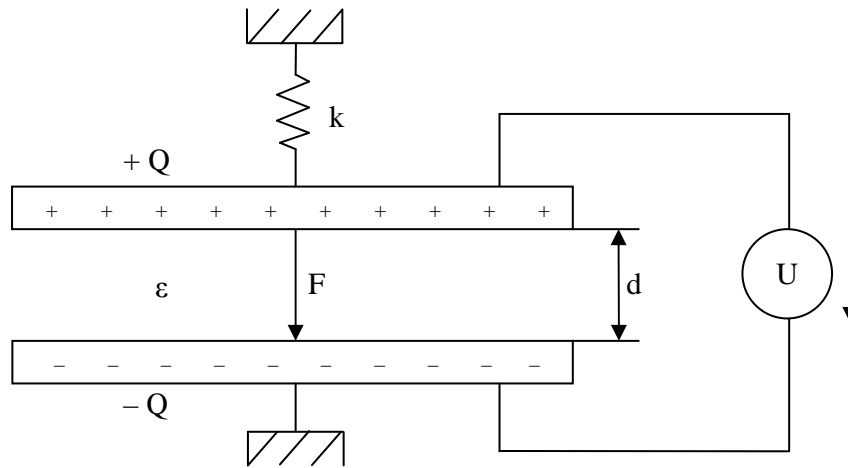
$$F_{akt} = -\frac{1}{2} \varepsilon S \frac{U^2}{d^2}. \quad (10)$$

V uspořádání popsaném zde by po přiblížení desek způsobeném elektrostatickou silou byl aktuátor nepoužitelný. V praxi je užitečné využívat aktuátor pro více cyklů, tedy zajistit jeho navrácení do počáteční polohy po odstranění napětí, pokud tuto funkci nezajišťuje samotná konkrétní konstrukce. Tuto činnost lze modelovat pružinou o tuhosti  $k$  působící proti síle generované aktuátorem. Obr. 8. schematicky znázorňuje takové uspořádání.

Síla, kterou působí pružina na desku jednoduchého elektrostatického aktuátoru, je dána vztahem

$$F_{pruž} = k(d - \Delta l), \quad (11)$$

kde  $\Delta l$  je posun aktuátoru při přiloženém napětí proti klidové poloze  $d$ . V ustálené poloze musí vždy platit  $F_{akt} + F_{pruž} = 0$ .



Obr. 8.: Ilustrace elektrostatického aktuátoru s vratnou pružinou

Z této podmínky lze vyjádřit vzájemnou závislost výchylky aktuátoru  $\Delta l$ , napětí  $U$  a materiálových a geometrických vlastností jako

$$U = \sqrt{\frac{2k(d - \Delta l)\Delta l^2}{\epsilon S}}. \quad (12)$$

Tento popis dobře ilustruje způsob generace síly a pohybu elektrostatických aktuátorů, i když pro praktický návrh jsou tyto elementární vztahy vzhledem k složitosti přesného matematického modelování nedostatečné. Pro praktický návrh elektrostatických aktuátorů se používá numerické simulace a softwarových nástrojů [2].

### 3.2. Charakteristické vlastnosti DEA

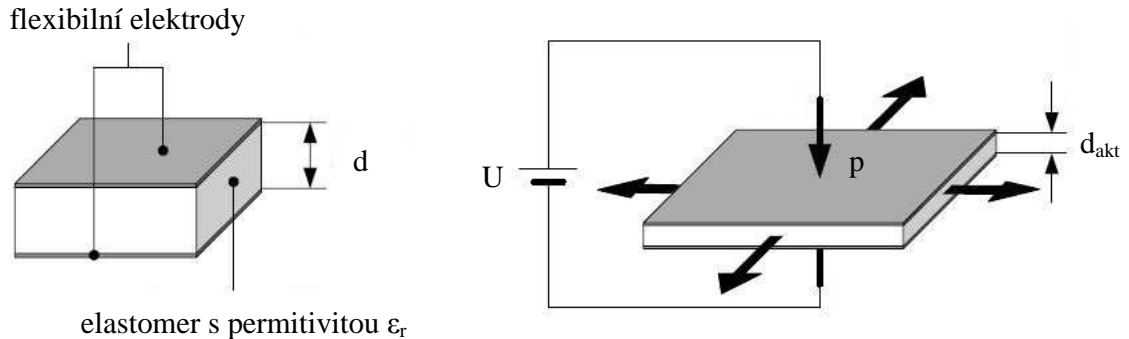
Na rozdíl od (v předchozí kapitole uvedených) elektrostatických aktuátorů, v DEA jsou používána nestlačitelná elastická dielektrika. Použití takového materiálu si žádá použití elastických elektrod, protože i při stlačení dielektrika musí být dodržen konstantní objem dielektrické vrstvy – plocha pokrytá elektrodami musí mít možnost expandovat. Funkce takového elementu aktuátoru je naznačená na Obr. 9. Přiložením napětí na takový element dochází k zmenšení tloušťky elastomeru a zároveň k zvětšení plochy elektrod vlivem elektrostatického tlaku podle rovnice (13) odvozené v [3]

$$p = \epsilon_0 \epsilon_r E^2, \quad (13)$$

### 3. Princip aktuátorů s elastomerovým dielektrikem

---

kde  $p$  je elektrostatický tlak vybuzený náboji na elektrodách,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrického materiálu a  $E$  je elektrické pole působící na tento materiál.



Obr. 9. Princip funkce DEA (převzato z [11])

Vzhledem k tomu, že změna tloušťky vrstvy je mnohem menší, než změna plochy, je právě využití této velmi vysoké změny plochy elektrod zajímavé z hlediska konstrukce aktuátorů. Čím bude materiál použitý jako dielektrická vrstva měkčí, tím větších výchylek bude element dosahovat. Dosažitelné výchylky elementů stoupají také se stoupající permitivitou materiálu a zmenšováním jeho elastomerového dielektrika.

V odborných článcích a publikacích zabývajících se rozбором vlastností DEA se nejvíce používají jako dielektrikum akrylátové elastomery firmy 3M VHB<sup>TM</sup> 4910, případně VHB<sup>TM</sup> 4905 nebo silikonové elastomery firem Nusil či Dow Corning. U akrylátových elastomerů VHB<sup>TM</sup> 4910 byla v laboratorních podmínkách naměřena akční výchylka až 380 % [11]. I když v praktické konstrukci budou výchylky mnohem menší, tento druh elastomeru poskytuje výchylky největší. Jejich nevýhoda je jejich velká viskozita, která způsobuje nízkou možnou rychlost pohybu a silné relaxační jevy. Silikonové elastomery mají výrazně nižší viskózní ztráty, a tak slibují vyšší možné opakovací frekvence a nižší relaxační jevy. Maximální akční výchylka silikonových elastomerů ale byla v [11] udána jen 63 %.

#### 3.2.1. Předepínání elastomerů

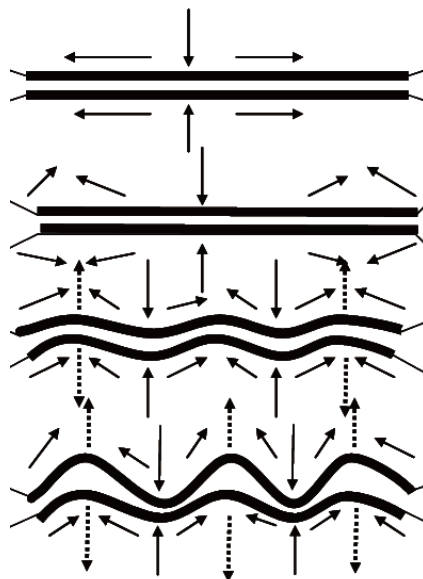
Neopomenutelným procesem při návrhu a konstrukci DEA je předepínání elastomeru použitého jako dielektrikum. Proces předepnutí elastomeru znamená jeho napnutí a zafixování v tomto napnutém stavu při přípravě vzorků aktuátorů. V mnoha konstrukcích toto předepnutí radikálně zlepšuje dosahované parametry. Lze popsat tři hlavní důvody, proč je u DEA předepínání elastomerového dielektrika výhodné.

##### 1. Snížení napájecího napětí

Podle vztahu (13) je elektrostatický tlak elektrod DEA závislý na velikosti elektrického pole. Je známo, že  $E = U/d$ , kde  $U$  je napájecí napětí a  $d$  tloušťka dielektrika. Při napínání nestlačitelného elastického dielektrika dochází nutně k snižování jeho tloušťky. Tím dochází ke snižování napětí potřebného k vybuzení dostatečně silného elektrického pole.

##### 2. Usměrnění akční výchylky do požadovaného směru

Při přiložení napětí na nepředepnutou elastomerovou membránu dochází k působení elektrostatického tlaku na elastomer, zvýšení jeho vnitřního mechanického napětí a změně tvaru do stavu s nejnižší energií. Tento stav ale nemusí být vždy ten požadovaný. Na elektrodové vrstvě se může vytvořit zvlnění nebo jiná deformace, viz Obr. 10.



Obr. 10.: Zvlnění na nepředepnutém elastomeru (převzato z [12])

Předepnutí materiálu vytvoří mechanické napětí v elastomerové vrstvě a při přiložení napětí dochází nikoli ke zvyšování mechanického napětí ve vrstvě pokryté elektrodami, ale naopak k jeho uvolňování ve prospěch mechanického tahu napnutého elastomeru v okolí elektrod. Předepnutí tak nutí elastomer pod elektrodami expandovat do požadovaného směru [13].

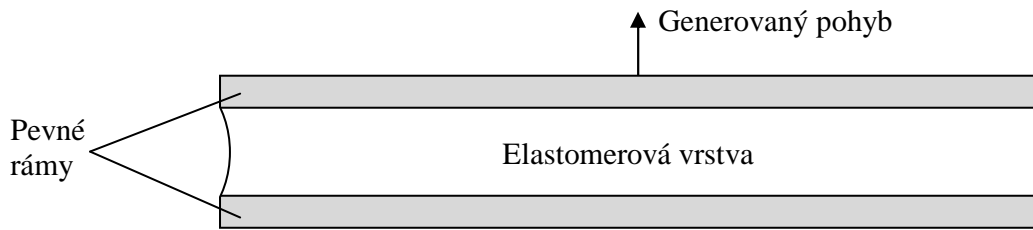
#### 3. Zvýšení dielektrické pevnosti

Předepnutí elastomeru má v neposlední řadě vliv také na jeho dielektrickou pevnost. Při konstrukci DEA je řídicí napětí poměrně vysoké a odolnost proti elektrickému průrazu je velmi důležitá. Dielektrická pevnost pro VHB<sup>TM</sup> 4910 se mění od  $17 \cdot 10^6$  V/m u nepředepnutého elastomeru až po  $270 \cdot 10^6$  V/m u maximálně předepnutého [3]. Předpokládá se, že tento nárůst dielektrické pevnosti je způsoben změnou uspořádání řetězců polymeru při napínání. Při napínání elastomeru původně neuspořádané polymerové řetězce vytváří síť převážně kolmou na směr elektrického pole. To může pozitivně ovlivnit dielektrickou pevnost těchto polymerů.

#### **3.2.2. Vybrané konstrukce lineárních DEA**

Pro efektivní návrh konstrukce DEA je třeba připravit takovou konstrukci z hlediska pohybu membrány, aby se minimalizovaly pohyby elastomeru směřující mimo požadovaný směr nebo aby tyto nepotřebné pohyby nepříznivě neovlivňovaly hodnoty výchylky a síly v požadovaném směru. Převod pohybu elastomeru do požadovaného směru lze ilustrovat na závaží položeném na stole, které je posouváno pomocí gumového balónku postupně naplňovaného vodou. Pokud zamezíme expanzi balónku do volných stran, začne balónek tlačit na závaží a posouvat ho. V případě, že balónek bude moct snadno expandovat okolo závaží, převod síly z balónku na závaží nebude optimální a závaží se posouvat nebude. Pohyb elastické membrány u DEA se chová podobně. Expanzi plochy je třeba pomocí vhodného návrhu konstrukce vhodně usměrnit do požadovaného směru. Toho lze docílit mnoha různými způsoby.



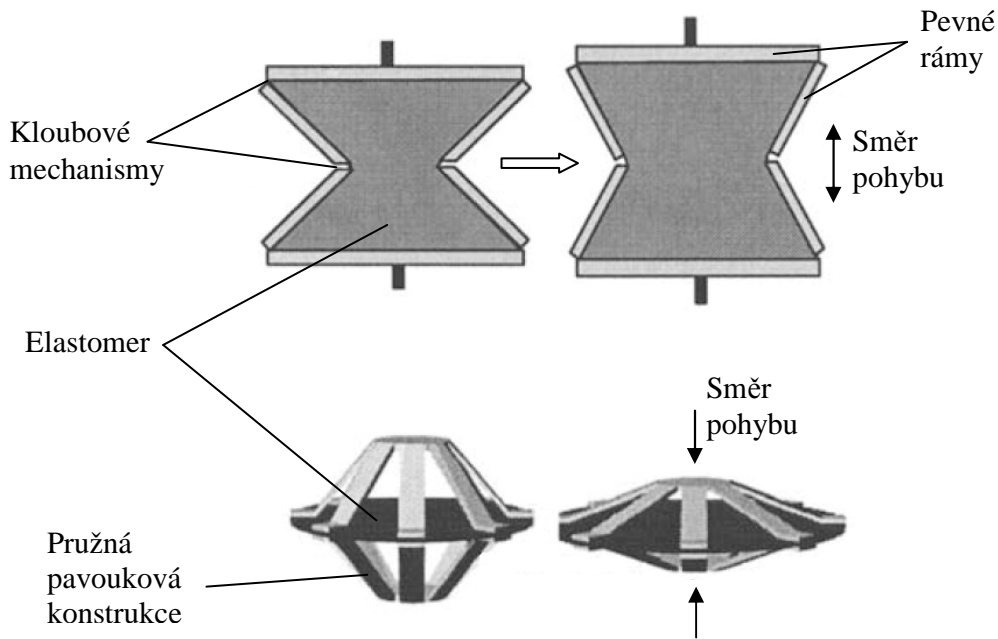


**Obr. 11.:** Jedna z možností usměrnění pohybu elastomerové membrány do jednoho směru

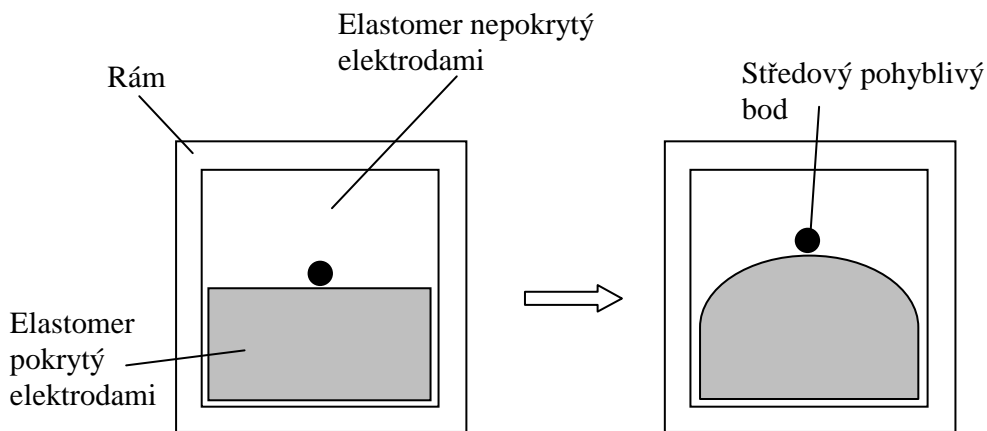
Jeden z nich je například vytvoření širokých aktivních ploch, jak je ilustrováno na Obr. 11. Takové uspořádání bylo použito v [1]. V tomto systému je pohyb aktivní plochy do nevhodných směrů eliminován pevným ukotvením membrány shora a zdola. Na okrajích takové konstrukce sice dochází k částečné expanzi ve vodorovném směru, ale ve střední části aktivní plochy je pohyb usměrňován do požadovaného svislého směru.

Lineární pohyb lze s elementem DEA docílit i při využití expanze do obou kolmých směrů v ploše dielektrika. Tento princip ilustrují nákresy na Obr. 12. U nákresu nahoře je základní konstrukce podobná jako na Obr. 11. s tím rozdílem, že šířka elementu je srovnatelná s jeho výškou. Konstrukce s klouby na stranách vzorku se při stlačení membrány narovná a tím přispívá pohybu v požadovaném svislém směru. Na dolním nákresu je zcela jiný přístup k řešení tohoto problému. Pavouková konstrukce je z obou stran připevněná na elastomerovou membránu a při plošné expanzi dochází k rozevírání nohou pavouka a smrštění elementu v požadovaném směru. U předepnutých dielektrických vrstev může být pavouk z pružného materiálu a toto předepnutí v klidovém stavu udržovat.

Další možnost jak konvertovat plošnou expanzi elastomeru v lineární pohyb je použití rámové konstrukce znázorněné na Obr. 13. Tato konstrukce umožňuje ploše elastomeru pokryté elektrodou expandovat do prostoru nepokryté elektrodou, a tím pohybovat bodem uprostřed. Elastomer je napnutý na rám, který zároveň udržuje jeho potřebné předepnutí. Tato konstrukce je ověřena v experimentální části této práce.



Obr. 12.: Řešení usměrnění plošné expanze dielektrické vrstvy v obou planárních osách do jednoho směru (převzato z [9])



Obr. 13.: Rámová konstrukce aktuátoru – elastomer je uzavřen do rámové konstrukce s jedinou volnou stranou pro expanzi

### 3.2.3. Charakter zátěže DEA

Aktuátor poskytuje největší výstupní energii tehdy, když je dobře přizpůsoben charakteru zátěže, na kterou působí. Vzhledem k tomu, že DEA jsou zpravidla velice flexibilní, je jejich použití vhodné především tam, kde působí na poddajné prostředí a kde lze využít jejich velké výchylky. [9] uvádí zjednodušenou analýzu problému přizpůsobení

aktuátoru a prostředí, na které působí, zavedením tuhosti aktuátoru  $k_{akt}$  a tuhosti prostředí  $k_{pr}$ . Za podmínek linearizace závislosti síly a výchylky aktuátoru v okolí pracovního bodu a zanedbání ztrát lze psát pro výchylku aktuátoru

$$x_{akt} = x_{max} - \frac{F}{k_{akt}}, \quad (14)$$

kde  $x_{akt}$  je výchylka aktuátoru při interakci s prostředím o tuhosti  $k_{akt}$  silou  $F$  a  $x_{max}$  je maximální výchylka aktuátoru naprázdno (bez interakce s prostředím). Sílu, kterou působí aktuátor na prostředí o tuhosti  $k_{pr}$ , lze zapsat jako  $F = k_{pr}x_{akt}$ . Potom lze rovnici (14) přepsat na

$$x_{akt} = \frac{1}{1 + \frac{k_{pr}}{k_{akt}}} \cdot x_{max}. \quad (15)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že výchylka aktuátoru  $x_{akt}$  je větší v případě působení na prostředí s nízkou tuhostí, což lze předpokládat. Výstupní energii  $E_{akt}$  pro polovinu jednoho cyklu aktuátoru lze zapsat jako

$$E_{akt} = \frac{1}{2} k_{pr} x_{akt}^2. \quad (16)$$

Dosazením rovnice (15) do vztahu (16) a jeho úpravou lze získat rovnici

$$E_{akt} = \frac{k_{pr}}{k_{akt} \left(1 + \frac{k_{pr}}{k_{akt}}\right)^2} \cdot \left(\frac{1}{2} k_{akt} x_{max}^2\right). \quad (17)$$

Analýzou rovnice (17) lze zjistit, že výstupní energie je maximální v případě, že platí  $k_{pr} = k_{akt}$ . Maximální výstupní energie aktuátoru z této analýzy vychází

$$E_{aktmax} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} k_{akt} x_{max}^2\right). \quad (18)$$

Z toho vyplývá, že maximálně čtvrtinu celkové energie akumulované ve výchylce aktuátoru bez zátěže lze využít pro působení na zátěž. Tato jednoduchá úvaha nereflektuje

mechanické ztráty a reálné vlastnosti vzorků. Lze jí ale dobře ilustrovat význam správného přizpůsobení vlastností aktuátoru a prostředí – impedančního přizpůsobení.

#### 3.2.4. Omezení rychlosti DEA

Přirozenou vlastností mnoha DEA, zvláště z materiálů, které mají vyšší viskózní ztráty, je jejich nízká frekvence cyklů. Při každém elektrickém vybuzení aktuátoru zde dochází k mechanickému vyrovnávání sil působících uvnitř materiálu. Další parametr, který ovlivňuje rychlost aktuátorů, je rychlost, s jakou lze dodat potřebný náboj na elektrody aktuátoru, což závisí na odporu kontaktů a elektrodové vrstvy. Elektrický odpor kontaktů a elektrod vytváří spolu s kapacitou aktuátoru  $RC$  článek, jež charakterizuje časová konstanta  $\tau$ . Při návrhu aktuátorového systému je tedy třeba uvážit, jak rychlým změnám vstupního signálu bude aktuátor vystaven, a použít vhodný dielektrický materiál, kontakty a elektrody.

Omezená rychlost aktuátorů ale v mnoha aplikacích není kritická. Mnoho konstrukcí těchto aktuátorů poskytuje zajímavý vztah výchylky a síly, podobný charakteristice biologických svalů. Proto jsou často DEA označovány jako „umělé svaly“. Srovnáním DEA s biologickými svaly se zabývá např. [14]. Spíše než k umělým náhradám svalů v medicíně ale lze těchto vlastností v počátku vývoje využít v robotice ke konstrukci pohonů končetin nebo prstů s podobnými vlastnostmi, jako mají biologické svaly, a tím pohyb robotů přiblížit přirozenému pohybu živých bytostí.

#### 3.2.5. Požadavky na napájení

DEA tvoří pro napájecí obvody silně kapacitní zátěž vyžadující vysoké ovládací napětí s malým proudem. Jednoduché ovládací obvody lze tam, kde nejsou velké nároky na účinnost či velikost zařízení, konstruovat s konvenčními násobiči. Konstrukce sofistikovanějších a efektivních zařízení ale skýtá mnohé výzvy. Jako inspirace pro napájecí obvody DEA mohou sloužit obvody pro řízení piezoelektrických aktuátorů, které tvoří stejně jako DEA pro napájecí obvody vysokonapěťovou kapacitní zátěž [9].

## 4. Experiment – porovnání VHB™ 4910 a VHB™ 4905

První experimentální kapitola je zaměřena především na vlastnosti samotné dielektrické elastomerové vrstvy z materiálů VHB™ 4910 (často používaný materiál pro experimenty s DEA [3][11][15][16]) a VHB™ 4905 společnosti 3M. Technické parametry těchto materiálů jsou uvedeny v jejich technickém listu na přiloženém CD v souboru „Vlach\_Jan\_DP\_VHB\_TDS.pdf“. Materiálové parametry dielektrika v pracovních podmínkách aktuátoru (po jeho předepnutí a elektrickém namáhání) jsou velmi podstatné pro správný návrh a ovládání daného aktuátoru. Byla navržena elementární konstrukce taková, u které se na naměřených výsledcích budou podílet pokud možno pouze materiálové vlastnosti dielektrické elastomerové vrstvy. Ve své bakalářské práci [1] jsem registroval závislost chování DEA s VHB™ 4910 na čase a na množství předchozích cyklů. Proto se tato experimentální část věnuje především časové degradaci vlastností a vlivu opakovaného elektrického namáhání vrstvy na akční výchylku.

### 4.1. *Materiály a konstrukce vzorků*

Oba použité materiály jsou transparentní akrylový elastomer, liší se pouze v tloušťce. Páska VHB™ 4910 je dodávána v tloušťce 1 mm, VHB™ 4905 je dodávána v tloušťce 0,5 mm. Tyto VHB™ pásy jsou v ostatních odborných pracích zabývajících se tématem DEA často používané vzhledem k jejich vysoké elasticitě a lepivosti povrchu, která usnadňuje nanášení elektrod na elastomerovou membránu a předepínání elastomeru. Pásy pro použití jako dielektrikum budou symetricky (v obou směrech v ploše dielektrika o stejnou procentuální hodnotu) předepínané na tloušťku cca 60  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k rozdílné počáteční tloušťce obou materiálů bude i poměrné předepnutí  $s$  u obou materiálů různé.

Pro proměření základních vlastností materiálů bylo připraveno několik konstrukčně identických vzorků. Základ každého vzorku je čtvercový rám o vnitřních rozměrech 30 mm x 30 mm a vnějších rozměrech 35 mm x 35 mm ze dřevěné lišty průřezu 5 mm x 3 mm. Na tento rám byla z jedné strany přilepena plastová podložka kvůli zajištění dobré adheze pásy (její adheze ke dřevu je podstatně nižší). Na tuto podložku je pak v požadovaném

předepnutí  $s$  nalepna dielektrická vrstva. Požadovaného předepnutí  $s$  je dosahováno následujícím postupem. Na speciální nůžkovou konstrukci (viz Obr. 14.) je nalepna nepředepnutá páska a podle vztahu

$$l = \frac{L}{1 + s} \quad (19)$$

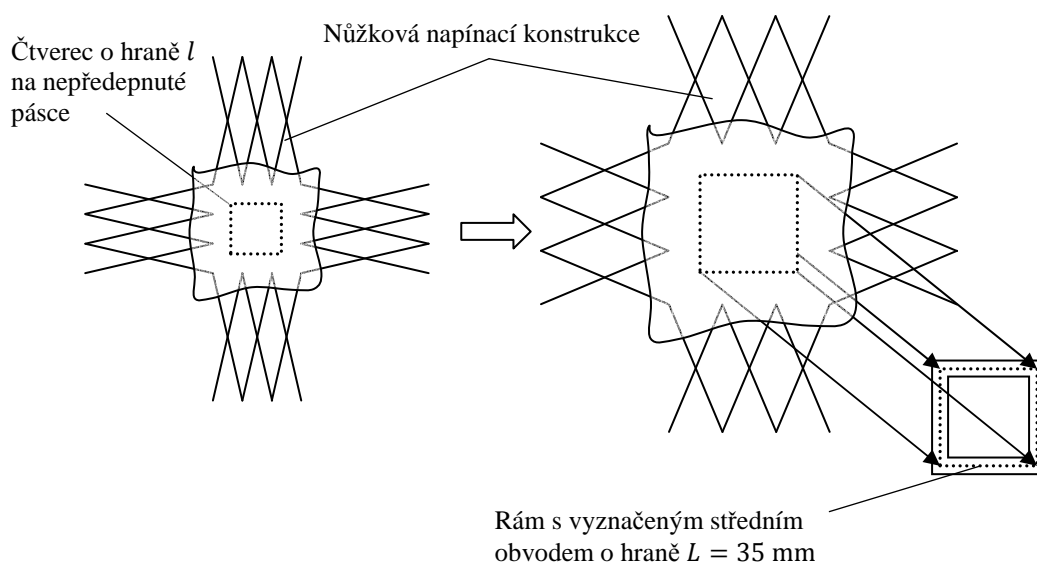
je na ní vyznačen čtverec o délce hrany  $l$ , který po rozevření napínací konstrukce kopíruje čtverec, který vytváří středy stran rámu o délce hrany  $L = 35$  mm, viz Obr. 14. Při napnutí (rozevření) nůžkové konstrukce tak, aby po napnutí vyznačený čtverec na pásce kopíroval střední obvod rámu, lze dosáhnout požadovaného symetrického předepnutí  $s$  a odpovídající tloušťky dielektrika  $d$  podle

$$d = \frac{D}{(1 + s)^2} \quad (20)$$

kde  $D$  je výchozí tloušťka elastomeru, protože pro nestlačitelný elastický materiál lze psát

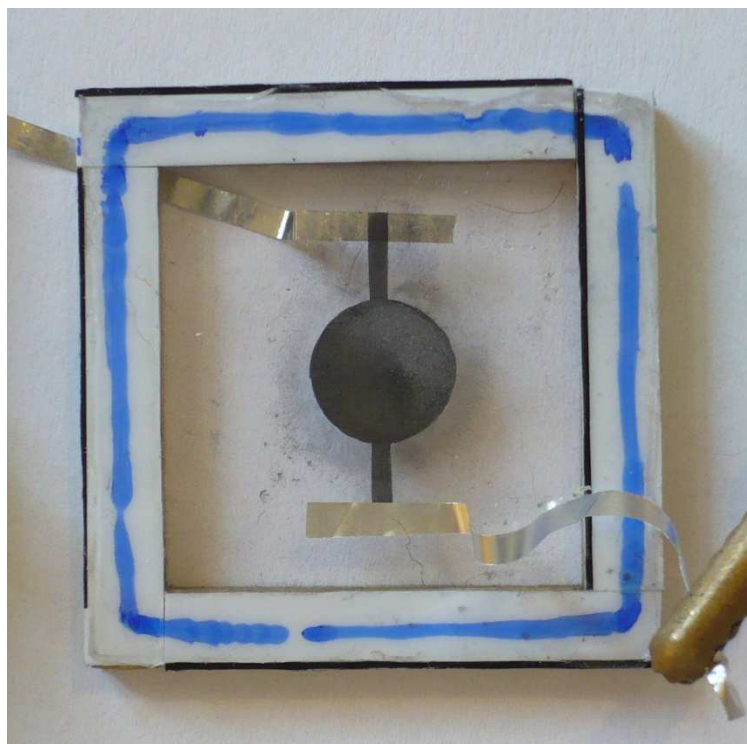
$$1 = (1 + s_x) \cdot (1 + s_y) \cdot (1 + s_z) \quad (21)$$

kde  $s_x$ ,  $s_y$  a  $s_z$  jsou relativní prodloužení (zkrácení) v jednotlivých ortogonálních směrech v prostoru.



Obr. 14.: Náčrt postupu při přípravě vzorků v první experimentální části.

Takto natažená páska je přilepena ke čtvercovému rámu a z nůžkové konstrukce vyříznuta. Následně se přes masku z originální krycí PE fólie nanese z obou stran elektrody z uhlíkového prášku. Tvar elektrody je kruh o průměru cca 10 mm s pahýlem o tloušťce 1 mm určeným pro kontaktování pomocí proužku z hliníkové fólie, který se přes tento pahýl nalepí. Pahýly pro kontaktování je výhodné vyvést nikoli proti sobě, ale na opačných stranách, neboť v místech, kde jsou nalepeny hliníkové proužky, často dochází k jemnému narušení dielektrické vrstvy a k nebezpečí elektrického průrazu. Takto připravený vzorek je na Obr. 15.



**Obr. 15.: Připravený vzorek pro první experimentální část.**

V experimentech s výše uvedeným konstrukčním uspořádáním bylo použito množství různých vzorků s různými předepnutími (a tedy výslednou tloušťkou dielektrika). Konkrétní počty a předepnutí vzorků jsou uvedeny v následujících kapitolách věnujících se konkrétním měřením. Všechny vzorky byly skladovány při teplotě od 19 °C do 23 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 % až 70 % na temném místě.

## 4.2. Metodika měření a vyhodnocení výsledků

U takto připravených vzorků dochází vlivem napětí na elektrodách ke stlačení elastomeru na místech oboustranně pokrytých uhlíkovým prachem. Při tomto stlačení vlivem nestlačitelnosti pásky dochází ke zvětšení plochy elektrod. Tato expanze plochy bude v měření vyhodnocována. Pro co nejpřesnější vyhodnocení plošné expanze vzorků byla zvolena metoda počítačové analýzy fotografií. Při každém odečítání velikosti expanze v průběhu měření byla pořízena fotografie vzorku digitálním fotoaparátem Panasonic DMC-LS60 a následně v grafickém programu odečten počet pixelů, který na fotografii zabírá aktivní plocha elektrod. Poměrným vyjádřením proti počtu pixelů, které zaujímají elektrody na tomto vzorku bez přiloženého napětí, byl podle vztahu

$$\Delta S_{\%} = \left( \frac{px}{px_0} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (22)$$

určen procentuální nárůst aktivní plochy  $\Delta S_{\%}$ , kde  $px$  je počet pixelů plochy elektrod po přiložení napětí a  $px_0$  je počet pixelů plochy elektrod bez napětí. Touto metodou lze dosáhnout dobrého rozlišení nárůstu plochy.

## 4.3. Měření vlivu časového stárnutí

V následujícím experimentu jsem vytvořil několik vzorků podle postupu zmíněného výše s různým předepnutím z materiálů VHB™ 4910 a VHB™ 4905 (kompletní soupis vzorků s jejich předepnutím a výslednými tloušťkami dielektrika shrnuje Tab. 2.). Proměřoval jsem jejich plošnou expanzi v závislosti na napětí po dobu 28 dnů.

	$s$ (%)	$d$ (mm)	$U_{MAX}$ (kV)
<b>VHB™ 4910</b>	200 %	0,111	4,5
	300 %	0,063	4,5
	400 %	0,040	4,5
<b>VHB™ 4905</b>	100 %	0,125	4,5
	200 %	0,056	3,5
	300 %	0,031	3,0

Tab. 2.: Hodnoty předepnutí  $s$ , tloušťka vzorků  $d$  a maximální aplikované napětí  $U_{MAX}$

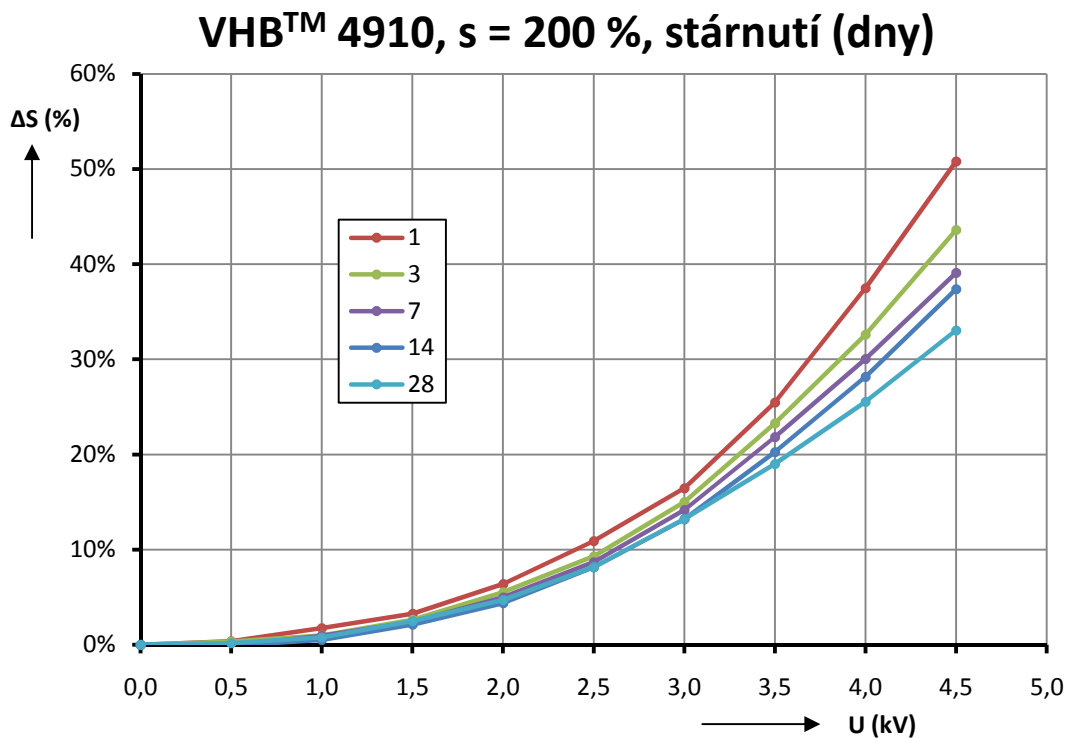


Každý vzorek v Tab. 2. byl připraven ve 3 exemplářích pro možnost průměrování naměřených výsledků. Pro experiment měření vlivu časového stárnutí bylo připraveno a proměřeno celkem 18 jednotlivých vzorků.

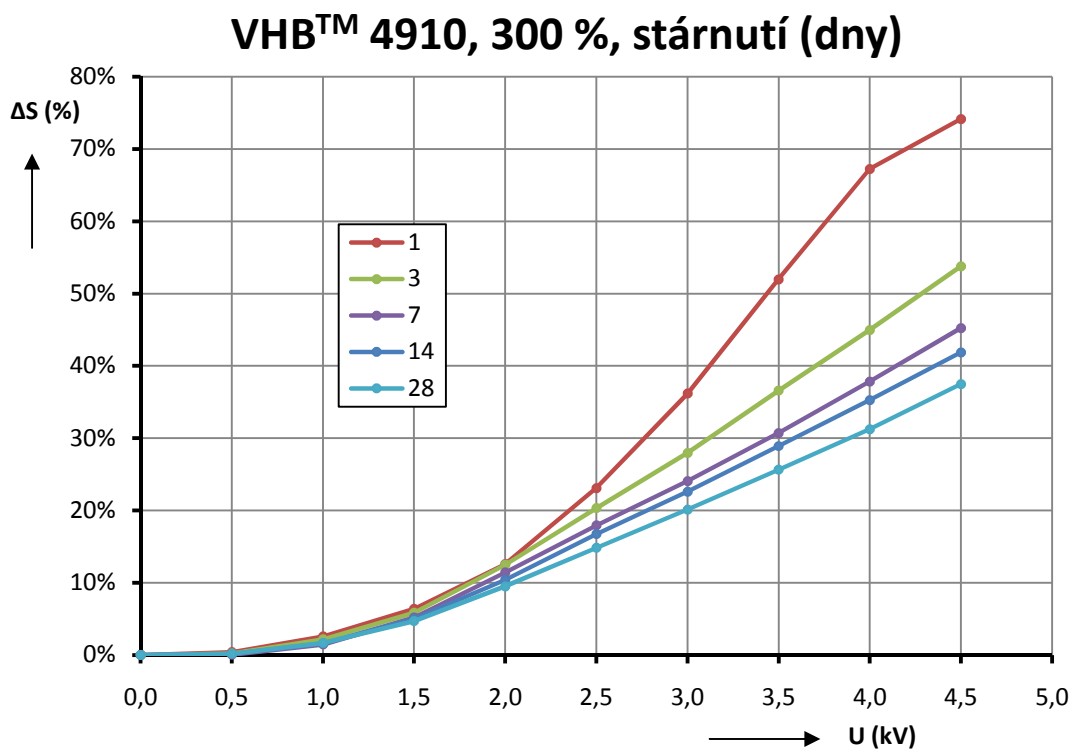
V kapitole 3.2.1. se lze dočíst o vlivu předepnutí použitých pásek VHB<sup>TM</sup> na jeho dielektrickou pevnost. Vzhledem k tomu lze předpokládat, že materiál VHB<sup>TM</sup> 4905 (dodávaná tloušťka 0,5 mm) bude při podobné výsledné tloušťce méně elektricky odolný, protože jeho předepnutí pro dosažení této tloušťky je menší než u VHB<sup>TM</sup> 4910 (dodávaná tloušťka 1 mm). Pro ověření tohoto jevu byla zkonstruována jedna série vzorků (po 3 vzorcích od každého předepnutí  $s$ ) z VHB<sup>TM</sup> 4905. Vzorky z VHB<sup>TM</sup> 4910 odolaly maximálnímu napětí zdroje 4,5 kV při všech měřených předepnutích. Vzorky z VHB<sup>TM</sup> 4905 vydržely maximální napětí pouze pro nejnižší předepnutí (největší tloušťku). Pro vyšší předepnutí ( $s = 200\%$  a  $s = 300\%$ ) docházelo k průrazům dielektrické elastomerové vrstvy dříve. Maximální bezpečné hodnoty napětí na jednotlivých vzorcích jsou uvedené v pravém sloupci v Tab. 2. Potvrdil se předpoklad menší dielektrické pevnosti méně předepnutého vzorku.

### 4.3.1. Výsledky

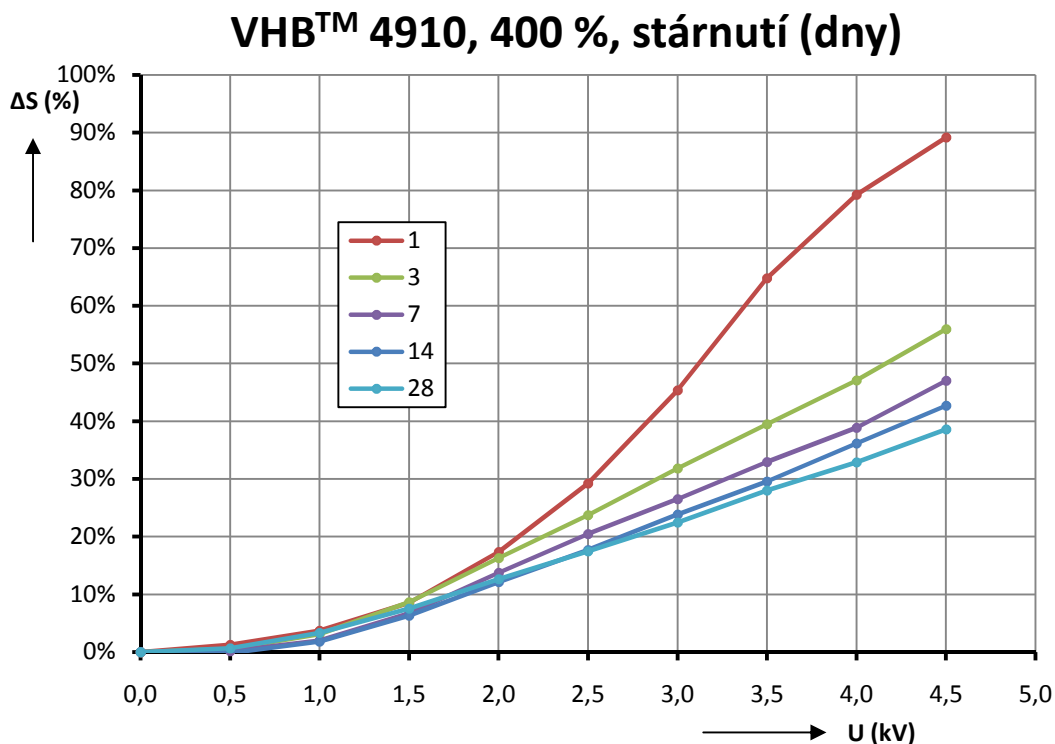
Z naměřeného souboru dat bylo zkonstruováno velké množství grafů, které jsou všechny dostupné v souboru „Vlach\_Jan\_DP\_priloha1.xlsx“ na přiloženém CD. Následujících šest grafů ilustruje závislost expanze plochy elektrod vzorků na napětí s parametrem stáří daného vzorku ve dnech. Každý průběh je průměr ze tří měřených vzorků o stejných konstrukčních parametrech, stejném předepnutí  $s$ .



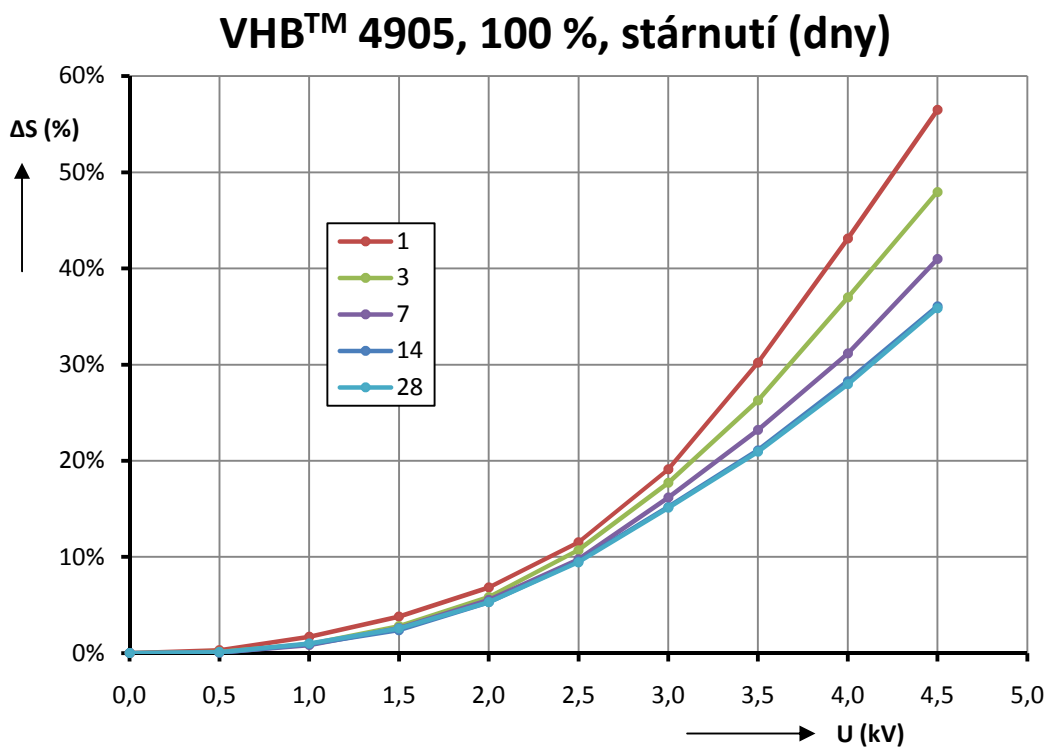
Graf 1.: Závislost plošné expanze na napětí s parametrem stáří vzorku, VHB™ 4910, s = 200 %



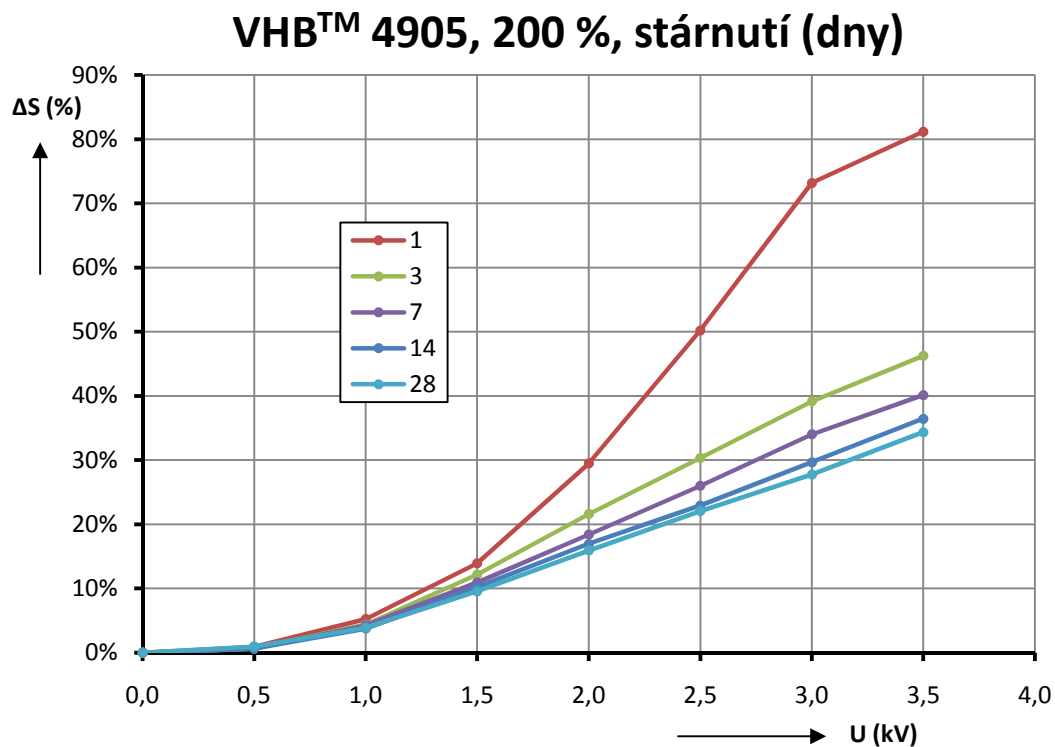
Graf 2.: Závislost plošné expanze na napětí s parametrem stáří vzorku, VHB™ 4910, s = 300 %



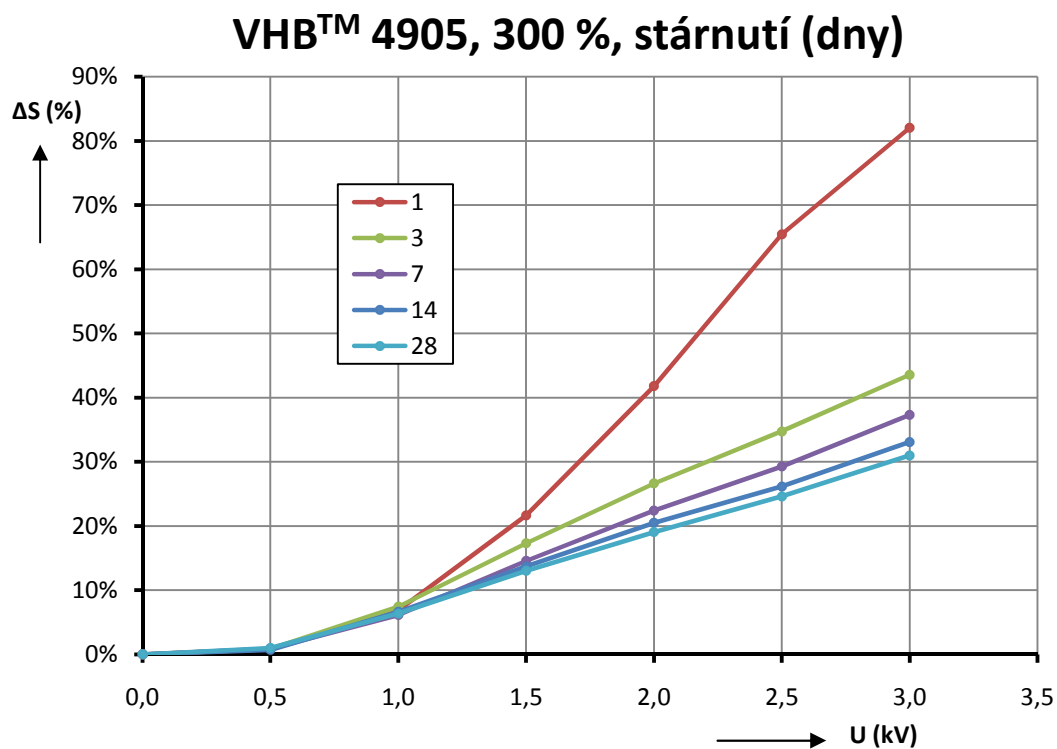
Graf 3.: Závislost plošné expanze na napětí s parametrem stáří vzorku, VHB™ 4910,  $s = 400 \%$



Graf 4.: Závislost plošné expanze na napětí s parametrem stáří vzorku, VHB™ 4905,  $s = 100 \%$



Graf 5.: Závislost plošné expanze na napětí s parametrem stáří vzorku, VHB™ 4905,  $s = 200 \%$



Graf 6.: Závislost plošné expanze na napětí s parametrem stáří vzorku, VHB™ 4905,  $s = 300 \%$

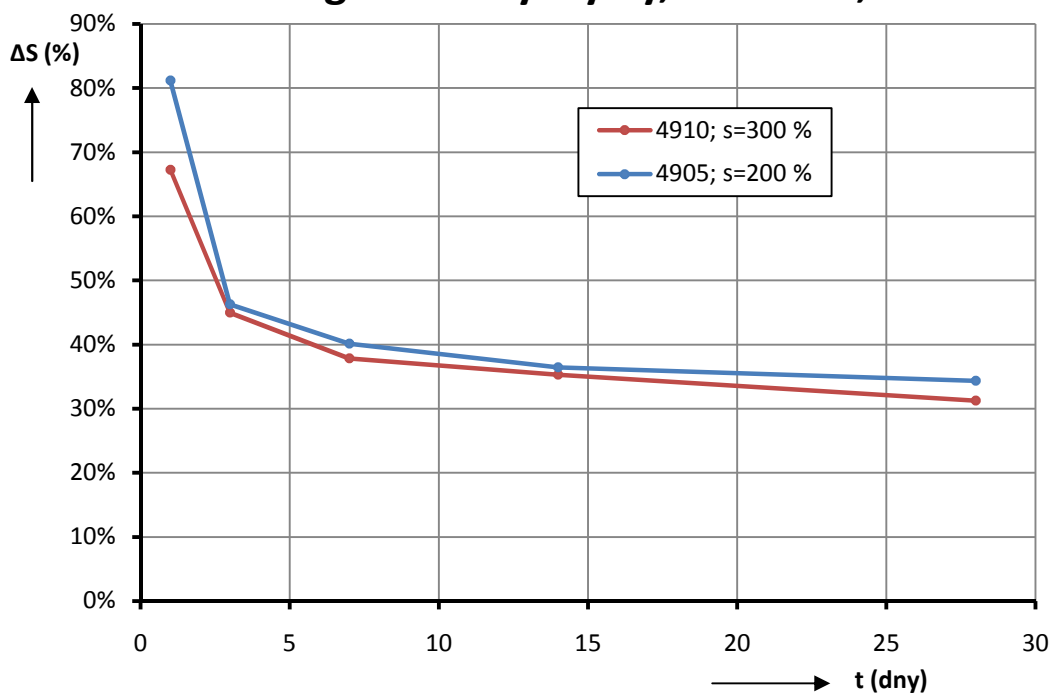
Z této série grafů lze vizuálně odvodit, že parametry dosahované DEA z VHB<sup>TM</sup> nejsou časově stálé. Čím větší je předepnutí vzorků  $s$ , tím větší je míra časové degradace plošné expanze. To naznačuje, že díky předepnutí pásky dochází k relaxaci mechanického napětí v této viskoelastické hmotě. Z porovnání grafů je také zřejmé, že materiál VHB<sup>TM</sup> 4905 při této metodice experimentu vykazuje větší časovou degradaci. Konkrétní hodnoty poklesu plošné expanze vzorků při jejich maximálním přípustným napětím podle Tab. 2. shrnuje Tab. 3.

	$s$	$\Delta S_{1. \text{den}} (\%)$	$\Delta S_{28. \text{den}} (\%)$	$\Delta S_{28. \text{den}} - \Delta S_{1. \text{den}} (\%)$
VHB <sup>TM</sup> 4910	200%	50,82	33,04	-17,78
	300%	74,15	37,48	-36,67
	400%	89,18	38,58	-50,60
VHB <sup>TM</sup> 4905	100%	56,47	35,85	-20,62
	200%	81,16	34,33	-46,83
	300%	82,03	31,00	-51,03

**Tab. 3.: Tabulka dosažených plošných expanzí pro jednotlivé vzorky pro první a poslední den měření časového stárnutí a jejich pokles.**

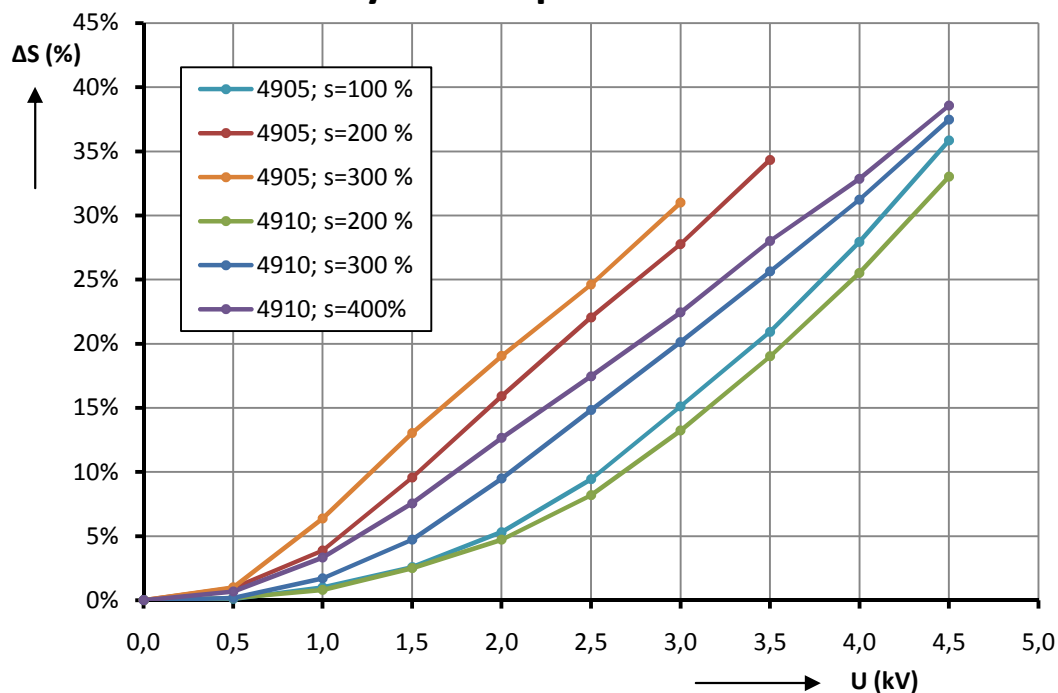
Z Tab. 3. je zřejmé, že největší plošnou expanzi generují oba materiály při maximálním předepnutí. Po analýze parametrů po stárnutí vzorků lze ale usoudit, že výhodnější pro dlouhodobou stabilitu vlastností je konstruovat vzorky s menším předepnutím, kdy je časová degradace nižší. Z výše uvedených průběhů lze vyhodnotit, že při nižších předepnutích dielektrické vrstvy je po stárnutí vzorků více zachovávan přibližně kvadratický tvar převodní charakteristiky. Pro vyšším předepnutí dochází při opakovaném elektrickém namáhání k narovnávání přechodové charakteristiky. Z těchto grafů lze také odečíst, že časové stárnutí parametrů vzorků má tendenci se postupně ustalovat.

### Časová degradace výchylky, $U = \text{MAX}$ , VHB™



Graf 7.: Porovnání průběhů časové degradace plošné expanze pro napětí 3,5 kV na vzorku VHB™ 4905 a 4,5 kV na vzorku VHB™ 4910

### Materiály VHB™ po 28 dnech stárnutí



Graf 8.: Srovnání průběhů všech měřených předepnutí obou materiálů po 28 dnech stárnutí

Graf 8. znázorňuje expanzi plochy elektrod všech měřených vzorků při jejich posledním měření (po 28 dnech stárnutí). Dosahovaná plošná expanze se významně neliší. Při potřebě vyšší citlivosti již při nízkém napájecím napětí se jako nejvýhodnější jeví vzorky z materiálu VHB<sup>TM</sup> 4905 při vyšším předepnutí. Pro nejvyšší odolnost vzorku je třeba volit tlustší vrstvy dielektrika, vzorky s nižším předepnutím. Tyto vzorky sice neposkytují největší expanzi, jejich změny v průběhu času jsou ale nejmenší a jejich chování nejpředvídatelnější. Pro druhou část experimentu, tedy ověření vlivu elektrického namáhání na degradaci plošné expanze, jsem zvolil předepnutí  $s = 300 \%$  pro VHB<sup>TM</sup> 4910 a  $s = 200 \%$  pro VHB<sup>TM</sup> 4905.

Protože při každém provedeném měření byla dielektrická vrstva elektricky namáhána, může mít na degradaci plošné expanze vzorků vliv i toto namáhání. To bylo ověřeno v následující kapitole.

#### **4.4. Měření vlivu elektrického namáhání**

V této části experimentu byl ověřen vliv elektrického namáhání vzorků na degradaci jejich plošné expanze. Motivace k tomuto měření byla zmíněna na konci předcházející kapitoly. Každým aktem měření, kdy byla zjišťována plošná expanze elektrod, byly vzorky elektricky namáhány. Nelze tedy výsledky z předchozí experimentální části považovat za zcela přesně vypovídající o degradaci parametrů pouze v závislosti na jejich stárnutí. Je třeba posoudit, jaký vliv na vlastnosti vzorků má jejich předchozí pracovní režim.

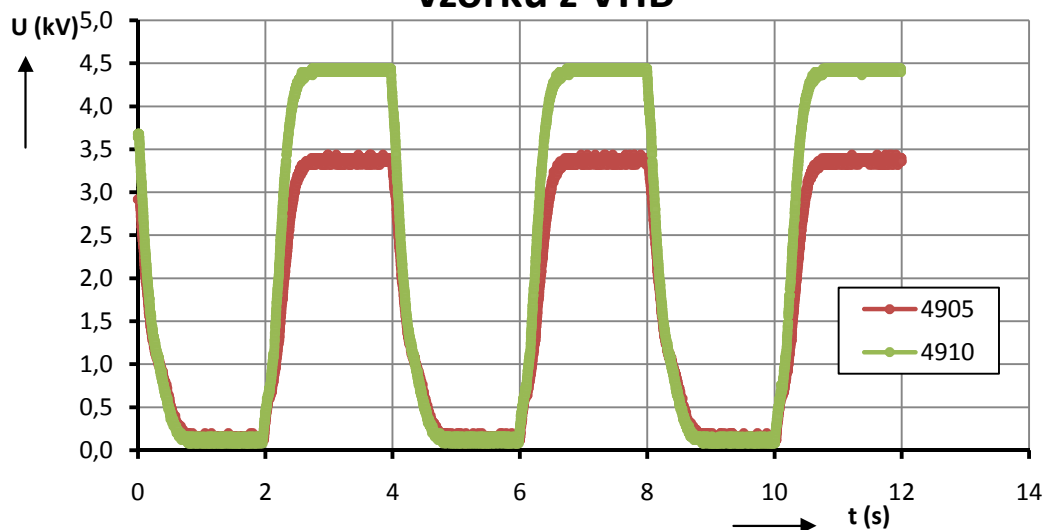
Graf 7. znázorňuje, že výkonnost vzorků rychle klesá v prvních několika dnech, později je pokles expanze menší. Ověření, zda je tento pokles způsoben stárnutím vzorků, nebo tím, že vzorky prošly několika měřeními, bylo navrženo následujícím způsobem. Pro měření byly připraveny 4 vzorky, 2 z materiálu VHB<sup>TM</sup> 4910,  $s = 300 \%$  a 2 z materiálu VHB<sup>TM</sup> 4905,  $s = 200 \%$ . Jeden vzorek z každé dvojice je při začátku měření vlivu elektrického namáhání 1 den starý a druhý je 6 dní starý. Podle průběhu degradace výchylky (viz Graf 7.) by vzorek starý 6 dní měl dosahovat výrazně menší výchylky než nový vzorek.

Metodika měření:

1. Změření závislosti plochy elektrod na napětí (jako je popsáno v kapitole 4.2.).
2. Intenzivní elektrické namáhání vzorků.
3. Změření závislosti plochy elektrod na napětí ihned po elektrickém namáhání.
4. Změření závislosti plochy elektrod na napětí 24 hodin po elektrickém namáhání.

Tento postup byl aplikován dvakrát s týdenním odstupem za dodržení pravidla, že všechny vzorky byly po celou dobu experimentu stejně elektricky namáhány. K elektrickému namáhání byl využit počítačem řízený vysokonapěťový zdroj sestavený v rámci bakalářské práce váženého kolegy Bc. Vladimíra Skořepy [17]. Tento zdroj umožňuje nastavit průběh o požadované periodě a napětí. Pro namáhání vzorků byl použit průběh se spodní napěťovou úrovní  $U_{dol} = 100 \text{ V}$  a horní  $U_{hor} = 4400 \text{ V}$  pro vzorky z VHB<sup>TM</sup> 4910 a  $U_{dol} = 100 \text{ V}$  a  $U_{hor} = 3400 \text{ V}$  pro vzorky z VHB<sup>TM</sup> 4905 (viz Graf 9.). Tento průběh byl na vzorky aplikován při každém měření po dobu 20 minut.

### Napěťové průběhy pro elektrické namáhání vzorků z VHB<sup>TM</sup>



Graf 9.: Průběh napětí pro elektrické namáhání vzorků, exportováno z digitálního osciloskopu s vn sondou

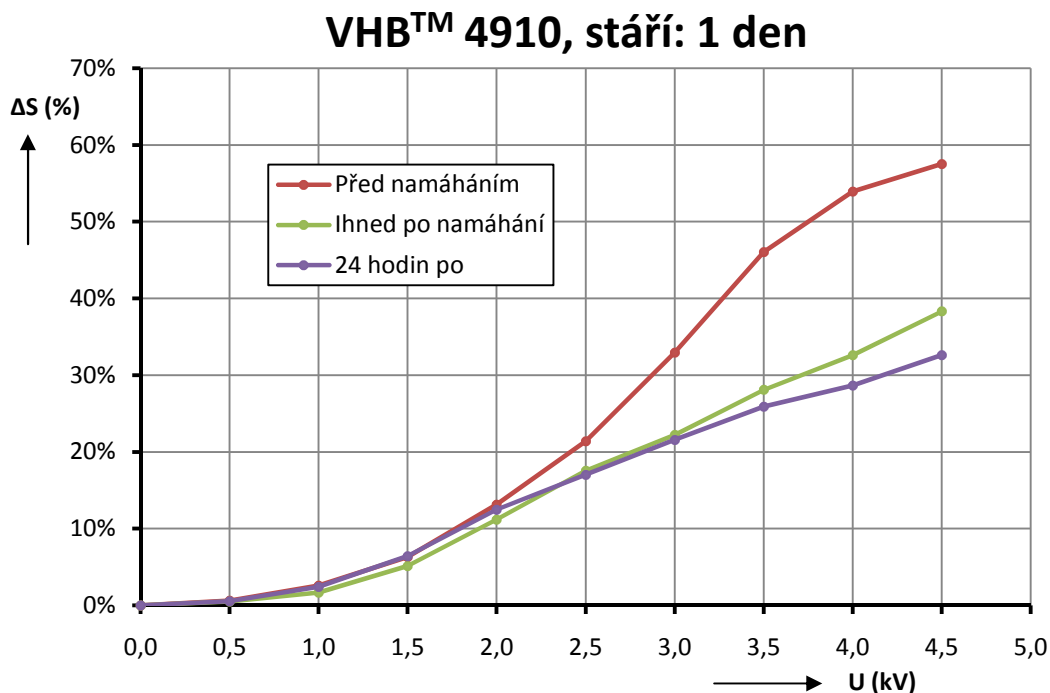


Digitálním osciloskopem s vysokonapětovou sondou byl ověřen skutečný tvar generovaného napětí. Oba průběhy zobrazuje Graf 9. Vzhledem k účelu elektrického namáhání vzorků není podstatná dlouhá doba náběhu a sestupu napětí způsobená nabíjením a vybíjením výstupního násobiče, průběh vyhovuje.

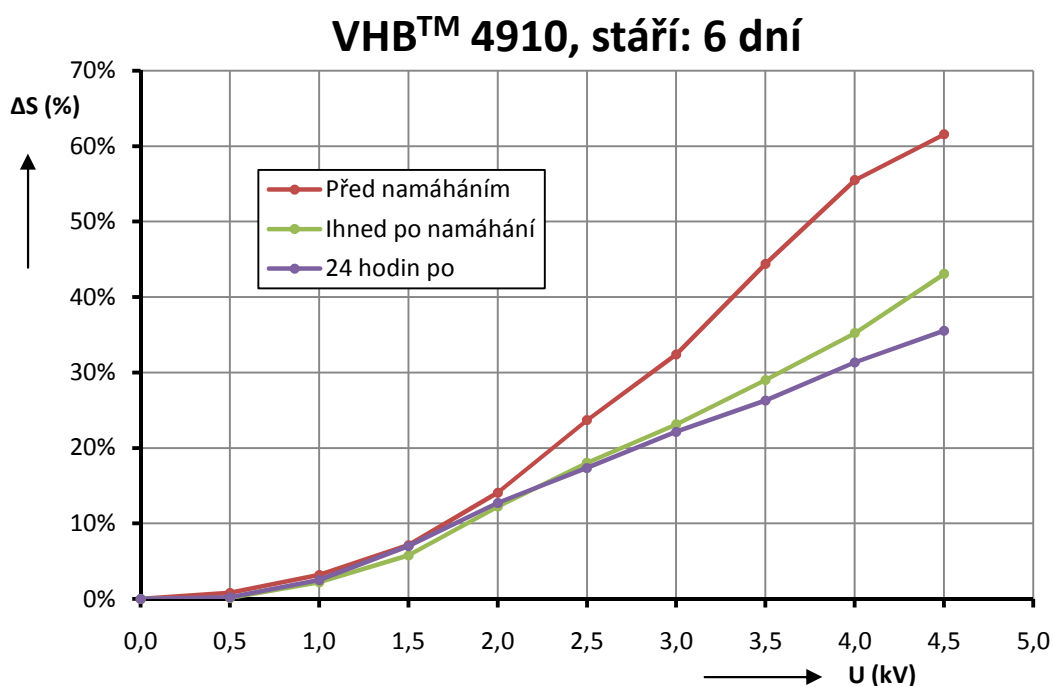
#### 4.4.1. Výsledky

Experiment se skládá z proměření závislosti expanze plochy, následném elektrickém namáhání, opětovném proměření, 24 hodinové relaxaci vzorků a posledního proměření expanze plochy. Tato série je provedena dvakrát s intervalem 1 týden.

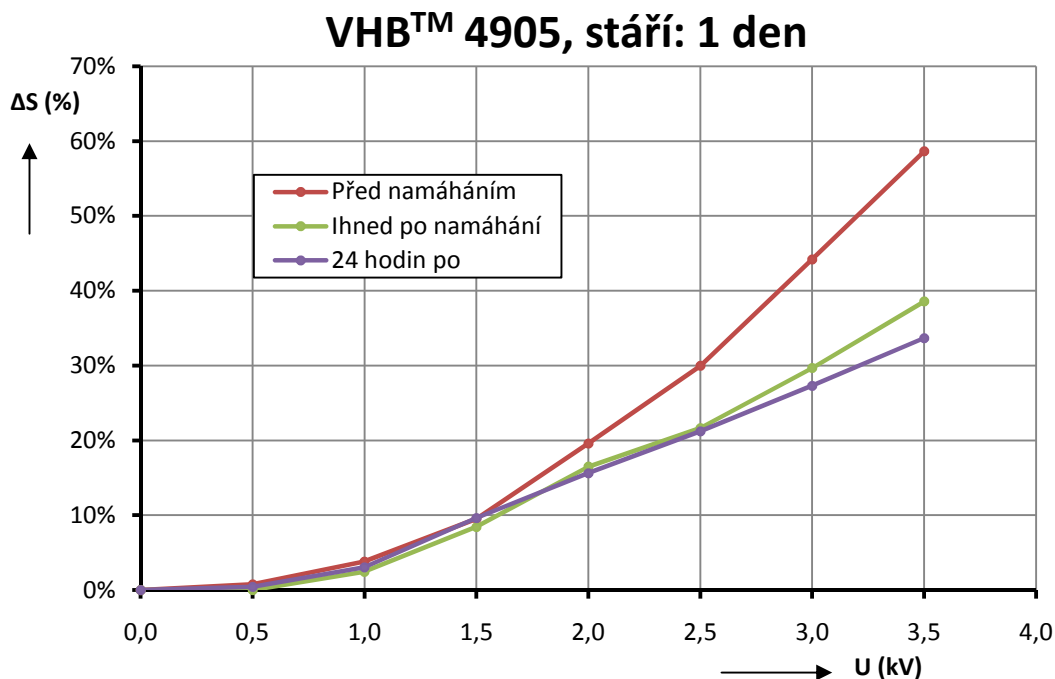
Výsledky předchozího měření degradace výchylky v závislosti na časovém stárnutí experimentu naznačují, že 6 dní starý vzorek by měl mít při prvním měření výrazně menší výchylku než vzorek starý 1 den (pokud tento pokles výchylky byl způsoben pouze stárnutím materiálu). Následující čtveřice grafů shrnuje naměřené výsledky pro všechny použité vzorky. Proti očekávání, že výchylka 6 dní starého vzorku před elektrickým namáháním bude výrazně menší, velikost expanze je téměř totožná. K degradaci parametrů došlo až poté, co byly vzorky elektricky namáhány. Z výsledků vyplývá, že k degradaci parametrů vzorků DEA dochází majoritně nikoli kvůli materiálovým změnám způsobeným dlouhodobým napnutím membrány (jak by se zdálo z výsledků v kapitole 4.3. Měření vlivu časového stárnutí), ale především kvůli reakci na elektrické namáhání. Přesný fyzikální důvod této reakce není objasněn.



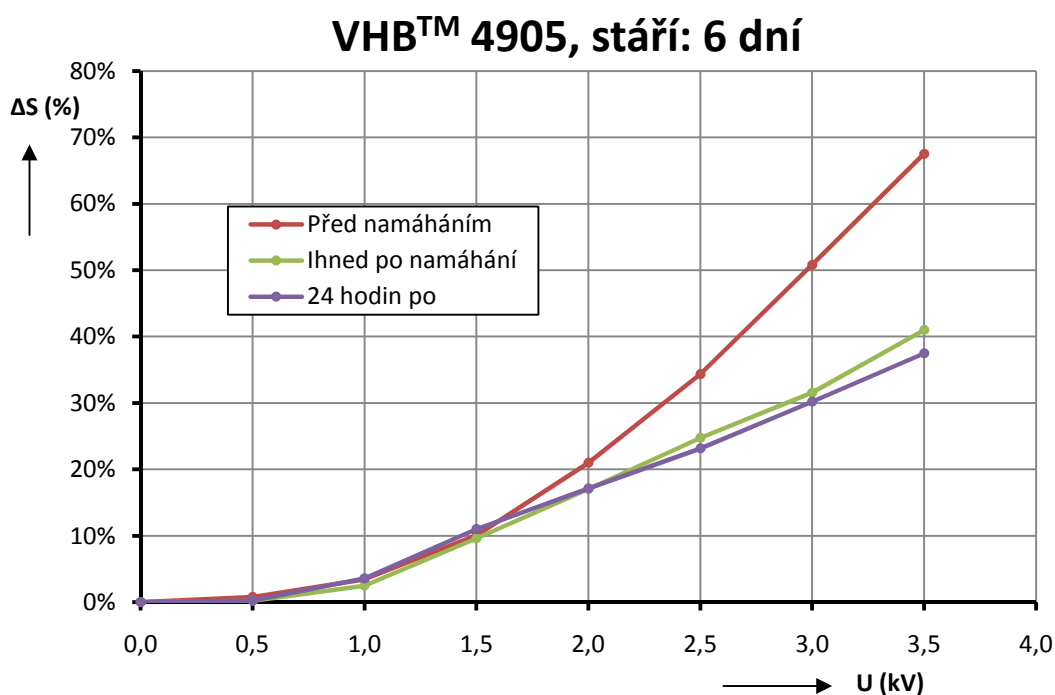
Graf 10.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, VHB™ 4910, vzorek 1 den starý



Graf 11.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, VHB™ 4910, vzorek 6 dní starý

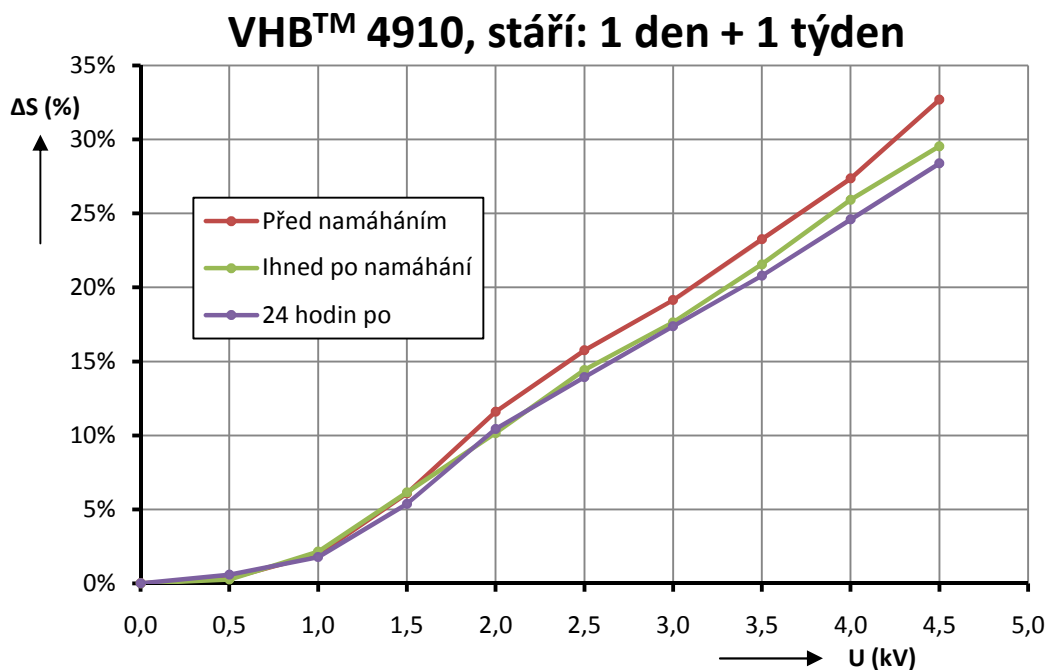


Graf 12.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, VHB™ 4905, vzorek 1 den starý

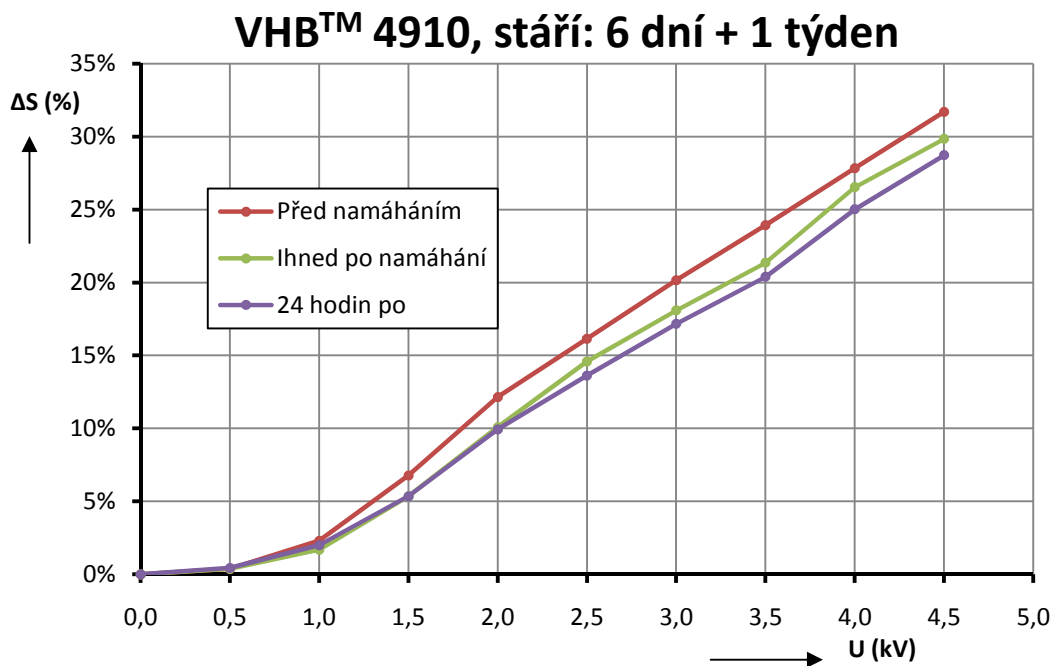


Graf 13.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, VHB™ 4905, vzorek 6 dní starý

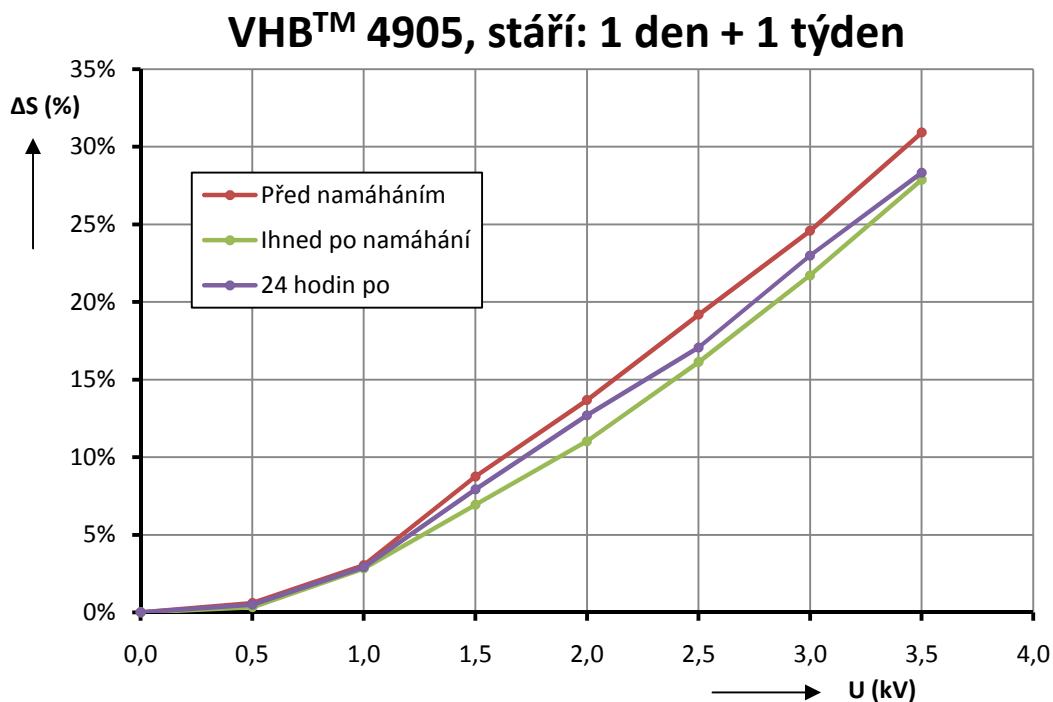
Stejný experiment se stejnými vzorky byl proveden o 1 týden později. Série čtyř grafů níže zobrazuje jejich plošné výchylky při tomto měření.



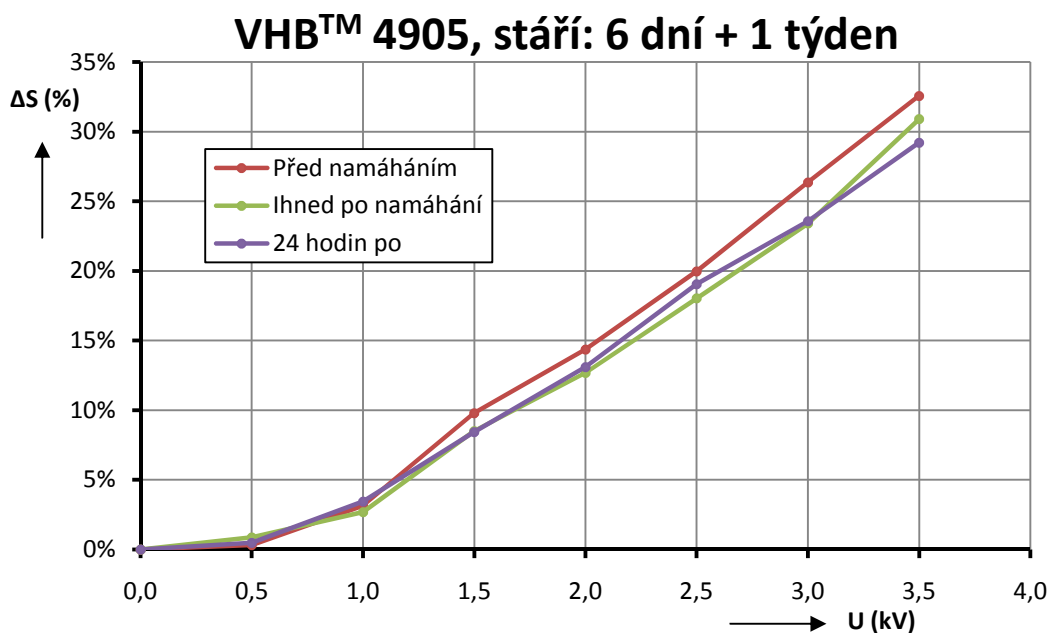
Graf 14.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, druhé měření, VHB™ 4910, vzorek 8 dní starý



Graf 15.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, druhý týden, VHB™ 4910, vzorek 13 dní starý



Graf 16.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, druhý týden, VHB™ 4905, vzorek 8 dní starý



Graf 17.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání, druhý týden, VHB™ 4905, vzorek 13 dní starý

V tomto experimentu bylo potvrzeno, že po prvním intenzivním elektrickém namáhání vzorků již závislost expanze plochy na napětí nevykazuje výrazné rozptyly. Opakované elektrické namáhání již nemá tak významný vliv na následující dosahované výchylky, jako tomu bylo u prvního elektrického namáhání. Naměřené parametry po prvním výrazném elektrickém namáhání lze tedy považovat za poměrně časově stabilní. Z tohoto měření také vyplývá, že výsledky uvedené v kapitole 4.3. o časovém stárnutí závisely více na elektrickém namáhání při samotných měřeních než na stárnutí materiálu vlivem dlouhodobého předeptnutí. Proto je vhodné porovnávat vlastnosti jednotlivých DEA až po jejich prvním intenzivním elektrickém namáhání, kdy se jejich parametry sníží na stabilní úroveň.

Tab. 4. shrnuje největší pokles expanze plochy v důsledku elektrického namáhání změřený na každém vzorku. Hodnoty jsou uvedeny pro maximální napětí aplikované na daný vzorek a srovnávají nejvyšší dosaženou hodnotu (při prvním měření) s nejnižší naměřenou hodnotou (druhý týden, poslední měření).

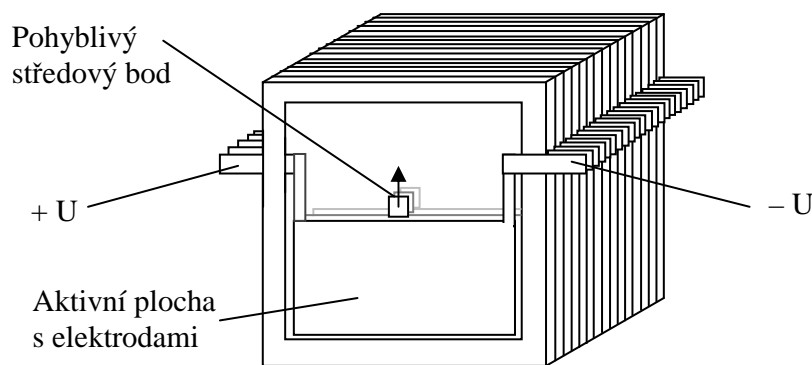
Materiál	Počáteční stáří	Pokles expanze	Materiál	Počáteční stáří	Pokles expanze
VHB™ 4910	1 den	29 %	VHB™ 4905	1 den	31 %
	6 dnů	33 %		6 dnů	38 %

**Tab. 4.: Největší naměřené poklesy expanze plochy v důsledku elektrického namáhání**

6 dnů staré vzorky mají podle Tab. 4. větší pokles napětí. Tento větší procentuální pokles je způsoben větší maximální výchylkou při prvním měření. Po elektrickém namáhání jsou výchylky všech vzorků téměř stejné, viz Tab. 5. v závěru práce.

## 5. Experiment – konstrukce a měření lineárního DEA

Další cíl práce je vytvořit lineární DEA a proměřit některé jeho vlastnosti uvedené v kapitole 2. Jak bylo detailněji uvedeno v kapitole 3.2.2., možností konverze pohybu DEA na lineární pohyb je několik. V rámci této práce byla navržena konstrukce založená na mnohovrstvé technologii využívající plošné expanze dielektrika v pevném rámu. Princip generace pohybu tohoto uspořádání ilustruje Obr. 16.

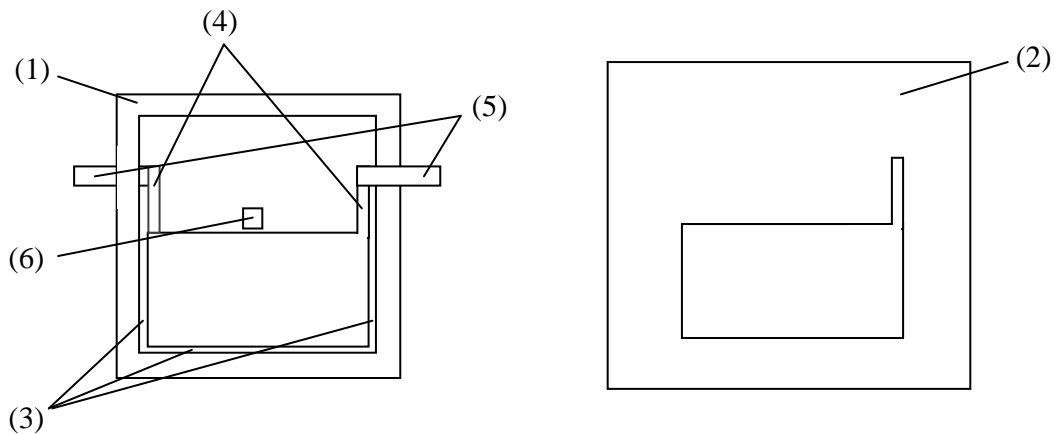


Obr. 16.: Náskres návrhu lineárního DEA

Vrstvy jsou uspořádané paralelně na sebe a jsou spojeny rámy a pohyblivými středovými body. Při expanzi plochy pokryté elektrodami tak všechny vrstvy expandují do jediného volného směru (na Obr. 16. směrem vzhůru) a tlačí na společnou pohyblivou středovou konzoli. Pro konstrukci jsem použil elastickou pásku 3M VHB<sup>TM</sup> 4910 s předepnutím  $s = 300\%$ . Detailní popis konstrukce vzorku je uveden v následující kapitole.

### 5.1. Konstrukce lineárního aktuátoru

Konstrukce jedné vrstvy a její funkce je znázorněna na Obr. 17. a v následujícím popisu. Základ je plastový rám (1) o vnitřních rozměrech 30 mm x 30 mm, šířce strany 3 mm a tloušťce 0,5 mm. Tento rám udržuje potřebné předepnutí pásky VHB<sup>TM</sup> 4910.

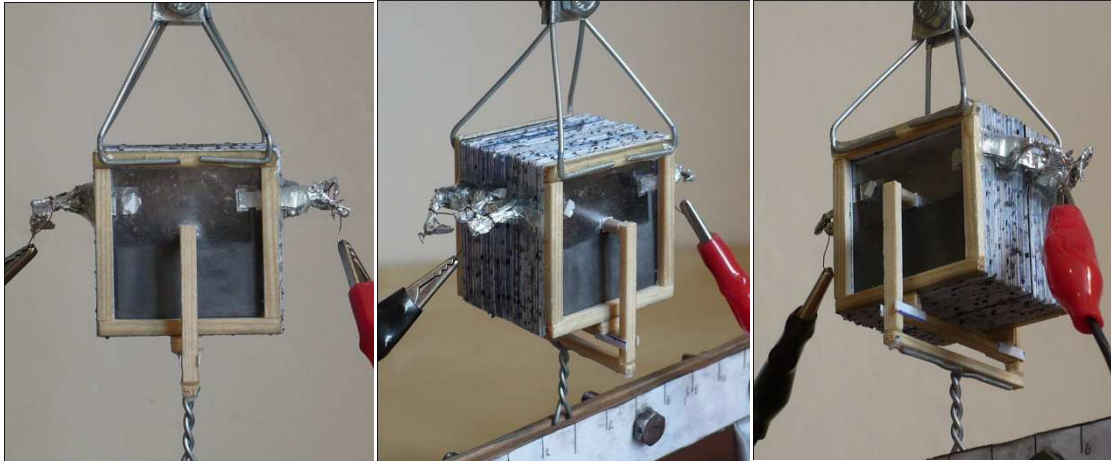


**Obr. 17.: Popis součástí jedné vrstvy navrženého lineárního DEA**

Na nůžkovém napínacím mechanismu popsaném v kapitole 4.1. byla páska předeprnutá na požadovanou hodnotu  $s = 300\%$  a následně na ní byl nanesen přes masku z originální krycí PE fólie (2) z obou stran grafitový prach. Na takto připravenou pásku byl nalepen rám (1) tak, aby oblast pokrytá uhlíkovým prachem byla od stran rámu oddělena dilatační mezerou (3) o šířce cca 1 mm. Tuto mezeru je nutné dodržovat, protože při expanzi plochy elektrod dochází v místech styku pohyblivé elastomerové membrány a pevného rámu k většímu mechanickému namáhání a při přítomnosti silného elektrického pole může podél rámu docházet k elektrickým průrazům. Pro kontaktování elektrodové vrstvy slouží vyvedené pahýly (4) z grafitového prášku umístěné na opačných stranách vzorku, na které se po vyříznutí vzorku z napínacího mechanismu nalepí hliníkové pásky (5) pro připojení napětí. Dokončení jedné vrstvy aktuátoru se provede nalepením středového pohyblivého čtvercového prvku (6) o rozměrech 2 mm x 2 mm ze stejného materiálu jako rám do středu vzorku nad plochu elektrod. Ten tvoří základ pro pohyblivou konzoli aktuátoru. Další vrstvy jsou vytvářeny stejným způsobem. Spodní elektroda jedné vrstvy a horní elektroda následující vrstvy musí vždy být na stejném potenciálu. Vrstvy jsou totiž velice blízko u sebe a mohou se někdy i dotýkat. Aby bylo udrženo umístění kontaktních hliníkových proužků jednoho potenciálu na jedné straně vzorku a druhého na druhé jako je to na Obr. 16., umístění pahýlů na jednotlivých vrstvách se musí střídat. Všechny středové pohyblivé body (6) tvořící pohyblivou konzoli jsou u vnitřních vrstev vždy společné pro dvě sousedící vrstvy a přilepené k sobě pouze elastomerovou vrstvou. Protože elastomer neslepí středové body zcela pevně, může docházet k deformacím středové pohyblivé konzole a nerovnoměrnému rozdělení zátěže mezi jednotlivé vrstvy. Pro sofistikovanější



návrh by bylo vhodné všechny středové pohyblivé body slepit pevně. Krajiní pohyblivé body jsou pak nalepeny na mechanismus vyvádějící generovaný pohyb na upevňovací část aktuátoru. Vzorek lineárního DEA s 64 vrstvami je vyfotografován na Obr. 18.

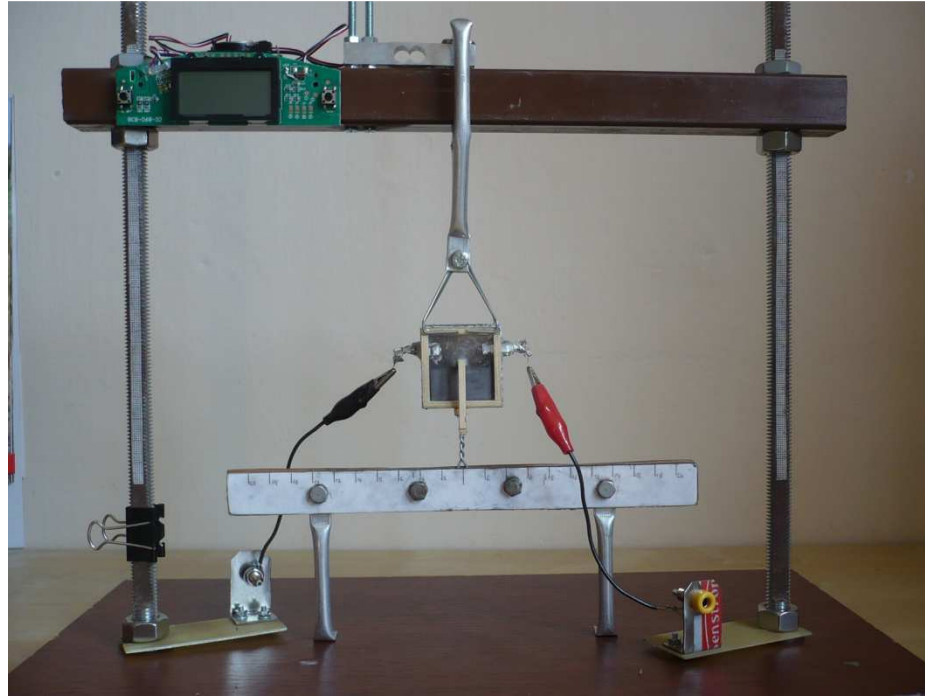


Obr. 18.: Fotografie vzorku lineárního DEA připraveného k měření

### 5.2. Metodika měření

Z první části experimentu vyplývá, že maximální expanze plochy velmi závisí na předchozím elektrickém namáhání, takto připravený vzorek byl před měřením několikrát elektricky namáhán stejně jako vzorky v kapitole 4.4. s tím rozdílem, že horní úroveň napětí byla nastavena pouze na 4 kV. V předchozích experimentech byla sice dielektrická vrstva ze stejného materiálu namáhána napětím až 4,5 kV, ale vzhledem k větší složitosti uspořádání lineárního DEA bylo maximální napětí sníženo, aby nedošlo ke zbytečné destrukci připraveného vzorku.

Měření probíhalo na měřicím zařízení použitým i v rámci mé bakalářské práce [1] (viz Obr. 19.: Uspořádání měřicí konstrukce). Generovaná síla byla měřena jako nárůst údaje na tenzometrickém váhovém čidle z kuchyňské váhy SENCOR SKS-4000, u které výrobce deklaruje rozlišení 1 g. Údaj z čidla byl následně přepočten přibližnou hodnotou tíhového zrychlení  $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  na hodnotu generované síly v Newtonech. Měření prodloužení probíhalo fotografováním vzorků a analýzou fotografií v grafickém programu na PC. Zde byl zjišťován procentuální nárůst lineární výchylky vzorku s přiloženým napětím proti situaci bez napětí.



Obr. 19.: Uspořádání měřicí konstrukce

Skutečná výchylka aktuátoru v milimetrech je pak dána vztahem

$$\Delta l = l_0 \cdot x_{PC\%} , \quad (23)$$

kde  $\Delta l$  je skutečné prodloužení aktuátoru v milimetrech,  $l_0$  je skutečná délka měřené části aktuátoru v milimetrech a  $x_{PC\%}$  je procentuální nárůst délky měřené části, pro který platí

$$x_{PC\%} = \left( \frac{x_{PC}}{x_{0PC}} - 1 \right) \cdot 100 \% , \quad (24)$$

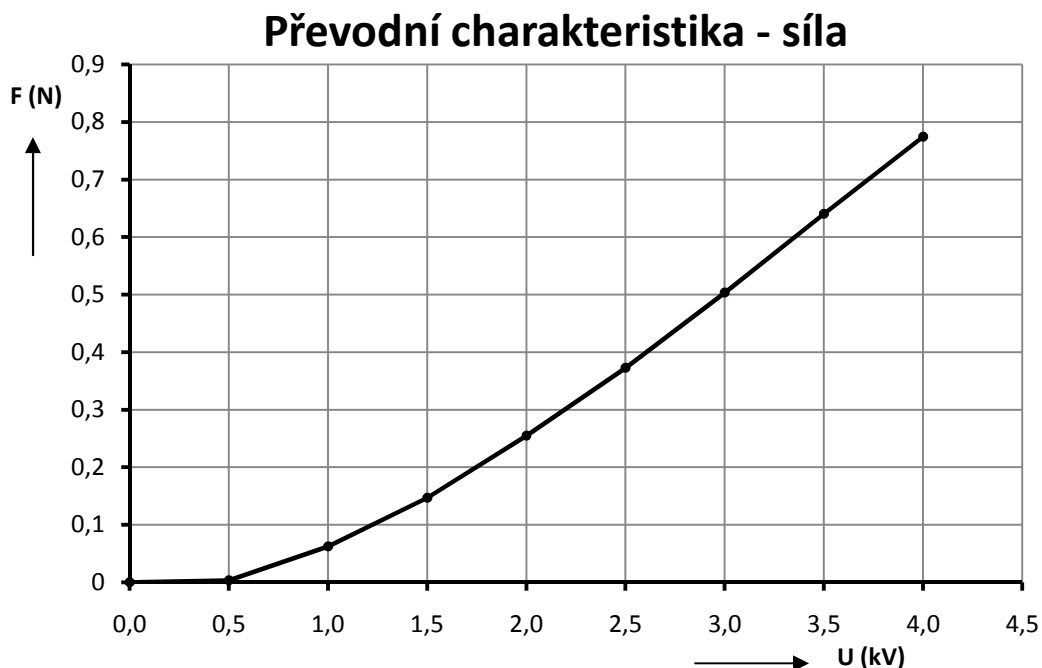
kde  $x_{PC}$  je délka měřené části aktuátoru při přiloženém napětí v jednotkách rastru grafického programu a  $x_{0PC}$  je délka měřené části aktuátoru bez napětí ve stejných jednotkách.

### 5.3. Výsledky měření

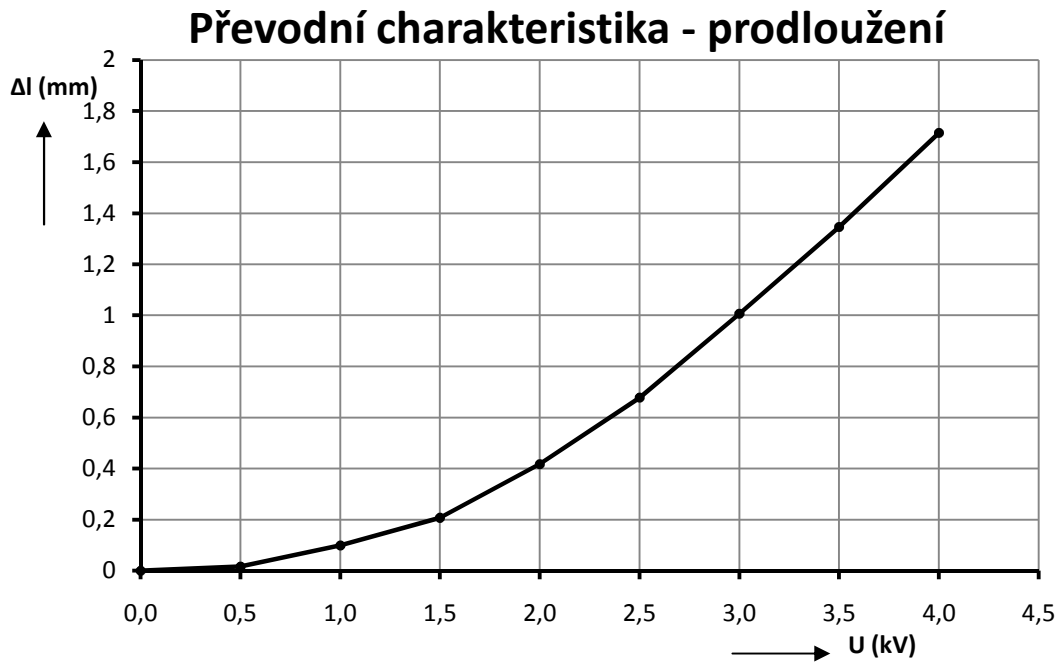
U vzorku na Obr. 18. byly změřeny vybrané obecné parametry aktuátorů z kapitoly 2. Změřené parametry jsou graficky zpracovány a vyhodnoceny dosažené výsledky. V závěru práce jsou shrnuty v přehledné tabulce.

### 5.3.1. Převodní charakteristika

Převodní charakteristika byla vyhodnocena jak z hlediska produkované síly při zablokovaném pohybu aktuátoru, tak bez zatížení pro maximální možné prodloužení. Měření síly i výchylky proběhlo třikrát pro možnost průměrování naměřených výsledků (s 5 minutovými pauzami mezi měřeními). Na každé hodnotě napětí byl vzorek ustálen 15 sekund. Průběh síly, generované touto konstrukcí aktuátoru (viz Graf 18.) dosahuje dobré linearity. To může být zjednodušující faktor pro návrh řídicích obvodů. Na počátku průběhu převodní charakteristiky je oblast (prahové napětí), pod kterým elektrostatická síla nábojů na elektrodách není dostatečná k vybuzení měřitelného silového působení. Maximální dosažená síla produkovaná aktuátorem byla  $F_{MAX} = 0,77 \text{ N}$ . Na velikost maximální síly má nepochybně vliv i technologie a kvalita zpracování aktuátoru, která by při technologicky vyspělejší výrobě byla vyšší. Při přesnější strojové výrobě tak bude pravděpodobně možné použít i vyšší napětí a dosahovat větších maximálních sil.



Graf 18.: Převodní charakteristika síly vzorku lineárního DEA



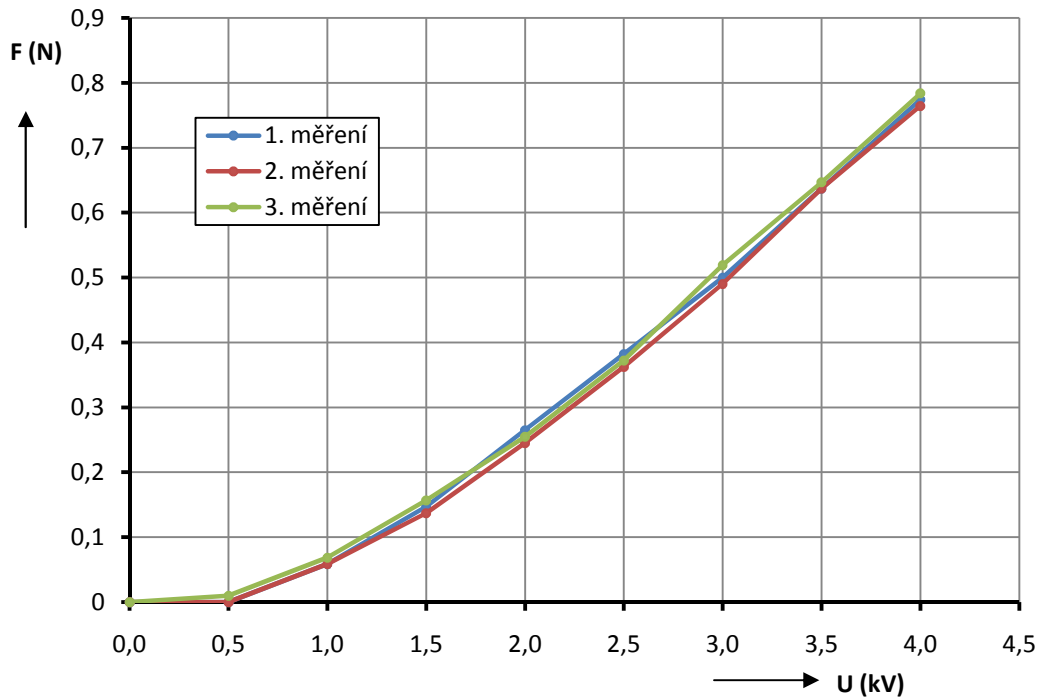
**Graf 19.: Převodní charakteristika prodloužení vzorku lineárního DEA**

Při měření maximálního prodloužení bylo dosaženo výchylky  $\Delta l_{MAX} = 1,71$  mm. Maximální výchylka je ve srovnání s jinými elektrostatickými aktuátory poměrně velká a má dobrý potenciál pro pohon paží/prstů v robotických aplikacích pomocí DEA.

### 5.3.2. Reprodukovatelnost

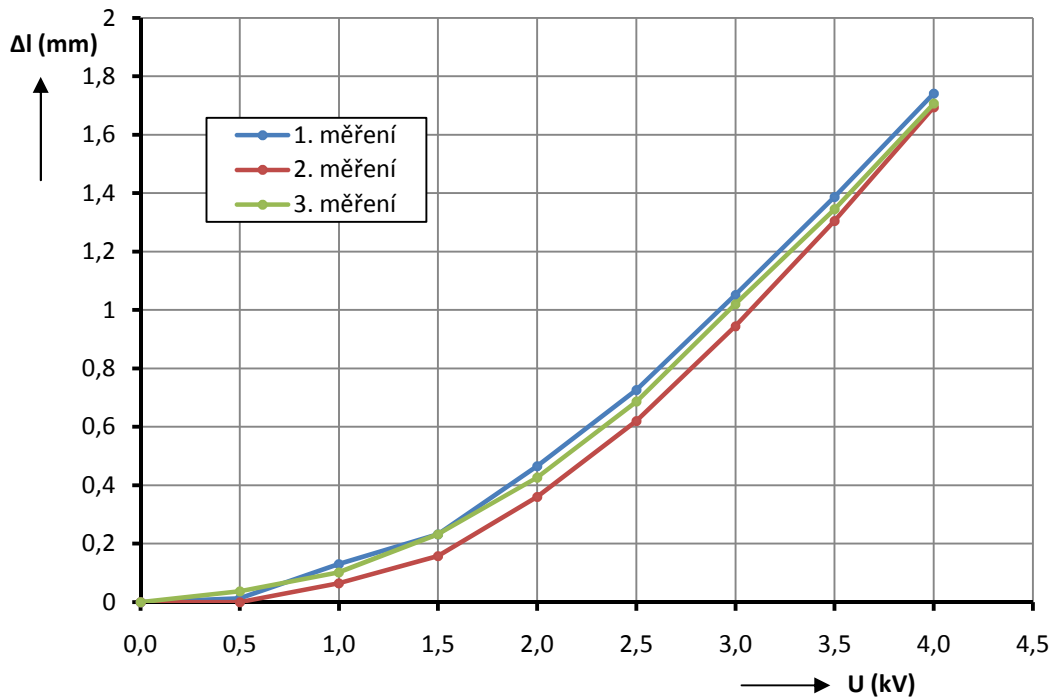
Z dat naměřených při předchozím měření lze dobře určit i reprodukovatelnost dosažení síly nebo prodloužení aktuátoru. Pro možnost průměrování naměřených výsledků jsem každé měření v předchozím bodu prováděl třikrát. Z těchto tří měření lze stanovit reprodukovatelnost síly a výchylky, a to výběrem největšího rozdílu hodnot jednotlivých převodních charakteristik. Graf 20. uvádí všechny tři naměřené průběhy síly, Graf 21. průběhy prodloužení.

### Reprodukovatelnost síly



Graf 20.: Reprodukovatelnost síly vzorku lineárního DEA

### Reprodukovatelnost prodloužení



Graf 21.: Reprodukovatelnost prodloužení vzorku lineárního DEA

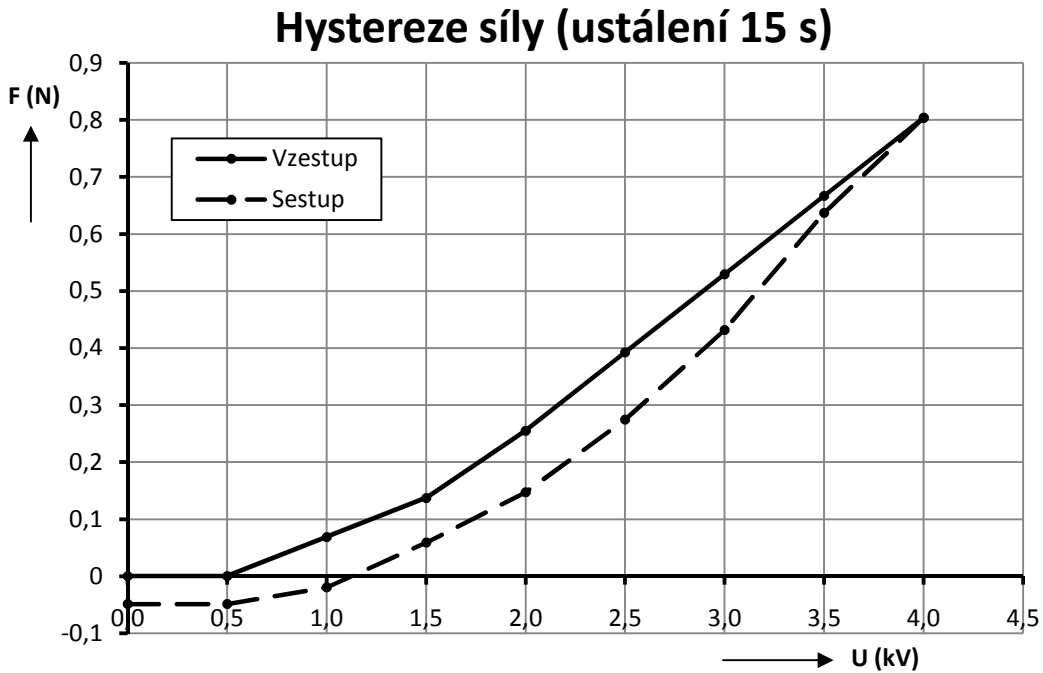
Největší hodnota (nejhorší případ) reprodukovatelnosti síly byla naměřena při napětí 2 kV a 2,5 kV. Podle vztahu (3) pak lze určit reprodukovatelnost vztaženou k maximálnímu rozsahu aktuátoru na  $Rep_{\%F} = 2,6 \%$ . Stejným způsobem byla určena nejvyšší hodnota reprodukovatelnosti prodloužení při napětí 2,5 kV a 3 kV na  $Rep_{\%\Delta l} = 6,4 \%$ .

### 5.3.3. Hystereze

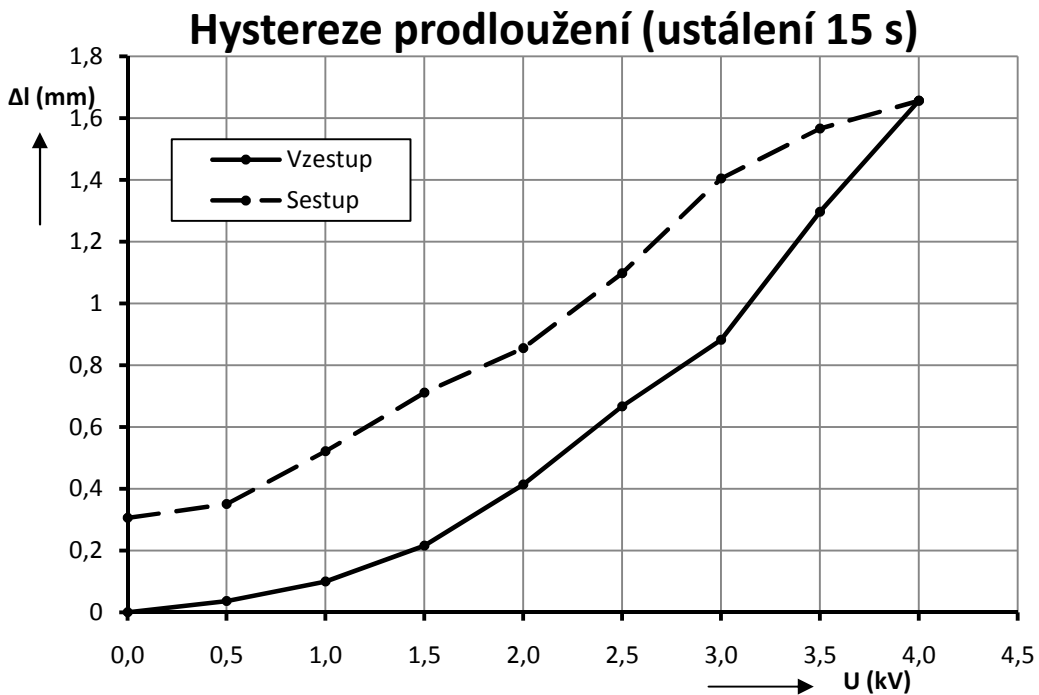
Hystereze je jeden z významných parametrů charakterizující chování DEA. Protože membrána má silné viskoelastické vlastnosti, bude velmi záležet na rychlosti měření. Proto byla hystereze síly i prodloužení měřena dvakrát, jednou s ustálením na každé hodnotě napětí po dobu 15 sekund a podruhé s ustálením na každé hodnotě napětí po dobu 60 sekund. Z porovnání těchto dvou měření si lze vytvořit představu o relaxačních jevech v materiálu.

Průběh hystereze síly (viz Graf 22.) ukazuje zajímavý efekt, kdy síla měřená při poklesu napětí je menší než síla při postupu nahoru. Tento výsledek může být způsoben jevem popsaným dále. Při měření maximální síly je aktuátor zablokovaný, tzn. že mu není umožněn žádný pohyb. Plošná expanze elektrod je ze značné části blokována (k částečné expanzi dochází jen po stranách rámu a okolo střední pohyblivé konzole, viz příklad s balónkem v kapitole 3.2.2.). Ve stavu bez napětí je v elastomeru v místě pokrytém elektrodami stejné mechanické napětí jako v nepokryté části. V případě aplikace elektrického napětí se mechanické napětí indukované předepnutím elastomeru v části pokryté elektrodami částečně uvolní, protože ho supluje elektrostatický tlak elektrod. V této fázi může mezi elektrodami docházet k mírné relaxaci elastomeru. Protože po odstranění napětí je elastomer pod elektrodami „odpočínutý“, je po určitou dobu schopen většího tahu než vrstva elastomeru bez tohoto ovlivnění elektrostatickým tlakem a mírně působí proti směru akční výchylky. Pro ustálení na každé hodnotě napětí po dobu 60 s by tento efekt měl být výraznější, protože aktuátor stráví více času při vyšších napětích a elastomer mezi elektrodami více relaxuje. Tento jev by měl být znatelný i na dosažené maximální síle, kdy by při konstantním maximálním napětí měla síla mírně klesat. To potvrzuje Graf 24. Největší hystereze síly při patnáctisekundovém ustálení na každé hodnotě napětí je při

napětí 2,5 kV podle vztahu (5)  $H_{\%F15s} = 15,0 \%$ . Hystereze síly při jednominutovém ustálení při 1,5 kV a 2 kV, a to  $H_{\%F60s} = 19,7 \%$ .

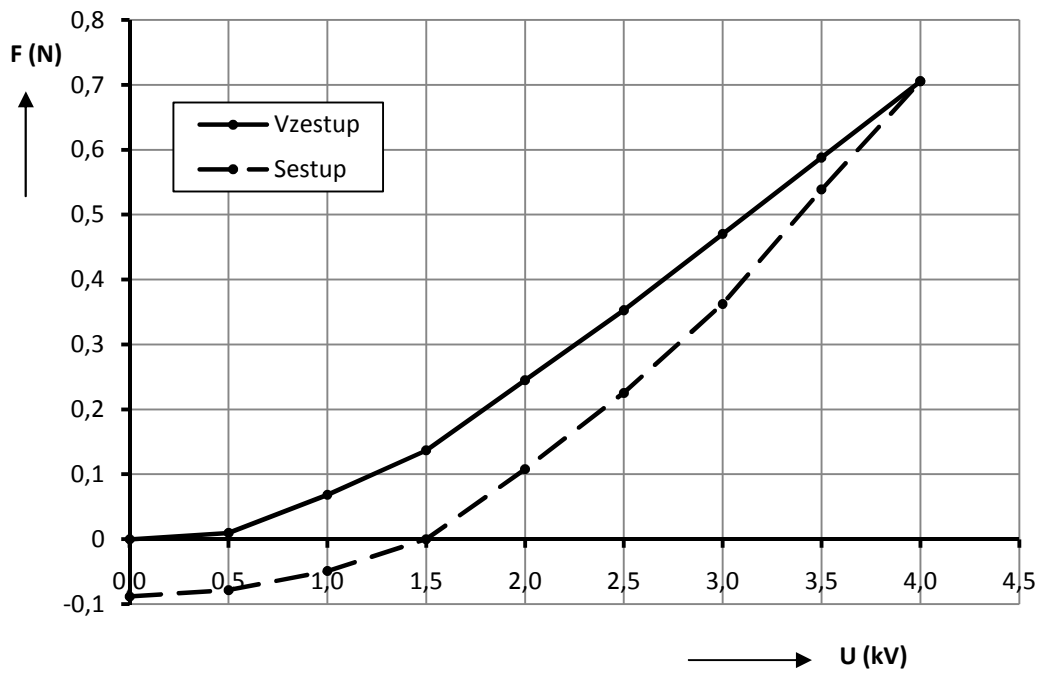


Graf 22.: Hystereze síly vzorku lineárního DEA při 15 s ustálení na každé měřené hodnotě



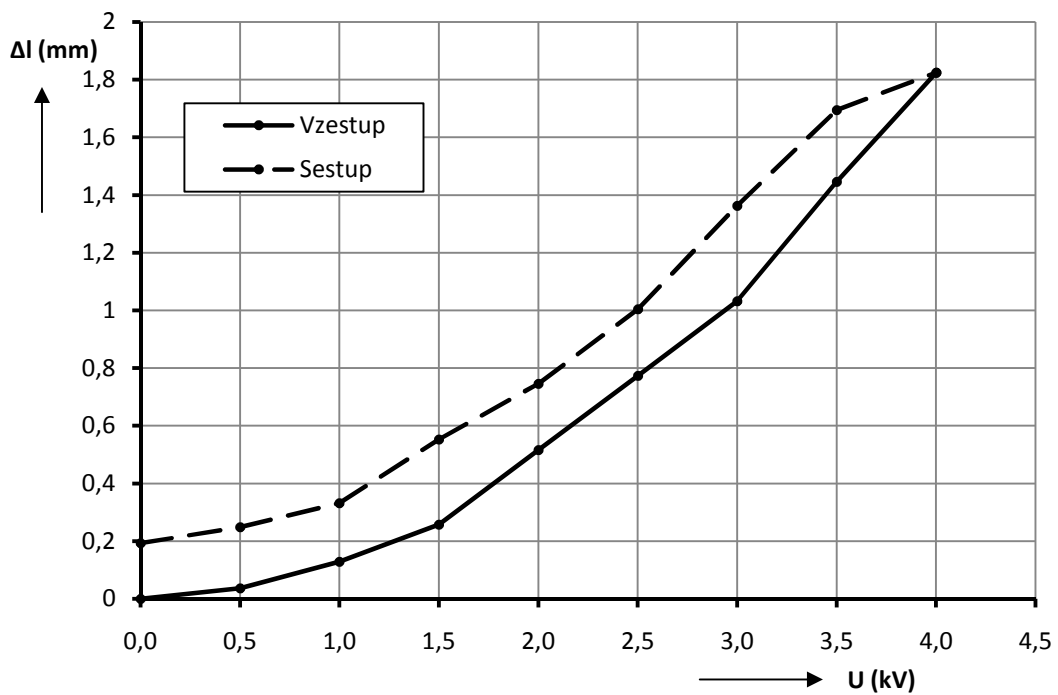
Graf 23.: Hystereze prodloužení vzorku lineárního DEA při 15 s ustálení na každé měřené hodnotě

### Hystereze síly (ustálení 60 s)



Graf 24.: Hystereze síly vzorku lineárního DEA při 60 s ustálení na každé měřené hodnotě

### Hystereze prodloužení (ustálení 60 s)



Graf 25.: Hystereze prodloužení vzorku lineárního DEA při 60 s ustálení na každé měřené hodnotě

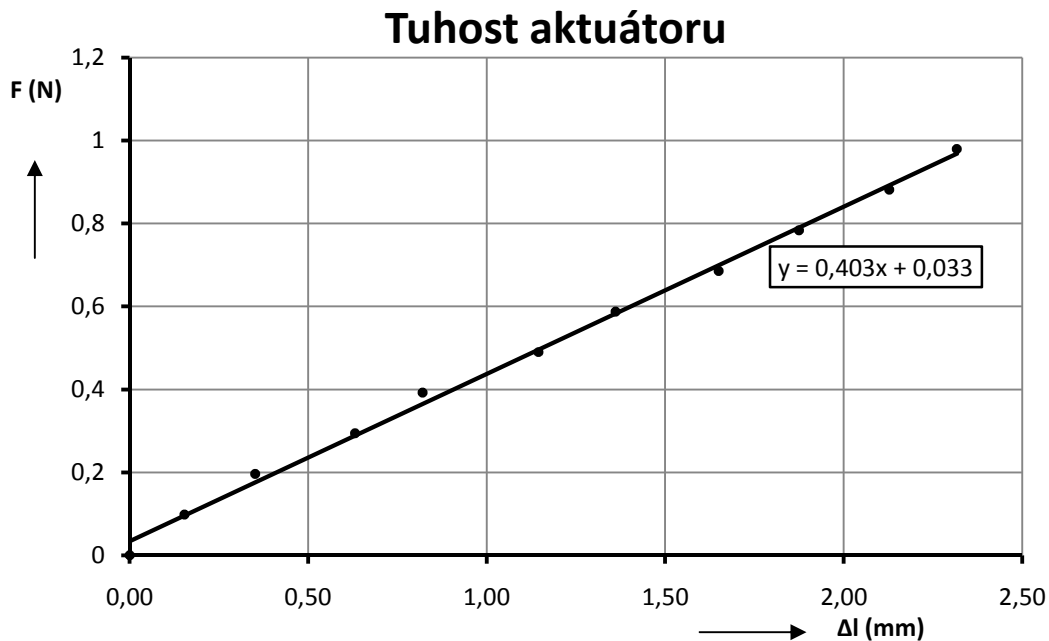


Hystereze prodloužení se chová tak, jak lze předpokládat u viskoelastického dielektrika. Při poklesu napětí si aktuátor „pamatuje“, že v jeho předchozím stavu byl více natažený a z tohoto stavu se pomalu přesouvá do stavu nového. V tomto případě by se při delším ustalování na každé napěťové úrovni měla hystereze snižovat. To potvrzuje Graf 25. Maximální hodnota hystereze prodloužení pro ustálení hodnot 15 sekund byla změřena při napětí 3 kV, a to  $H_{\% \Delta l 15s} = 31,3 \%$ . Pro jednodominutové ustálení byla největší hystereze na napětí 3 kV, a to  $H_{\% \Delta l 60s} = 18,1 \%$ .

### 5.3.4. Tuhost aktuátoru

Tuhost aktuátoru není vlastnost chování aktuátoru při jeho elektrickém buzení, ale je to důležitý parametr pro správný návrh jeho aplikace. DEA jsou velmi měkké a poddajné. Je výhodné, aby prostředí, na které aktuátor působí, dokázalo využít tuto poddajnost.

Tuhost aktuátoru byla měřena postupným stlačováním aktuátoru bez napětí a měřením síly, potřebné ke stlačení aktuátoru o určitou délku. V rozsahu malých výchylek lze tuhost aktuátoru považovat za lineární. Z rovnice přímky, kterou jsou naměřené body proloženy, lze určit tuhost aktuátoru  $k = 403 \text{ N.m}^{-1}$ .

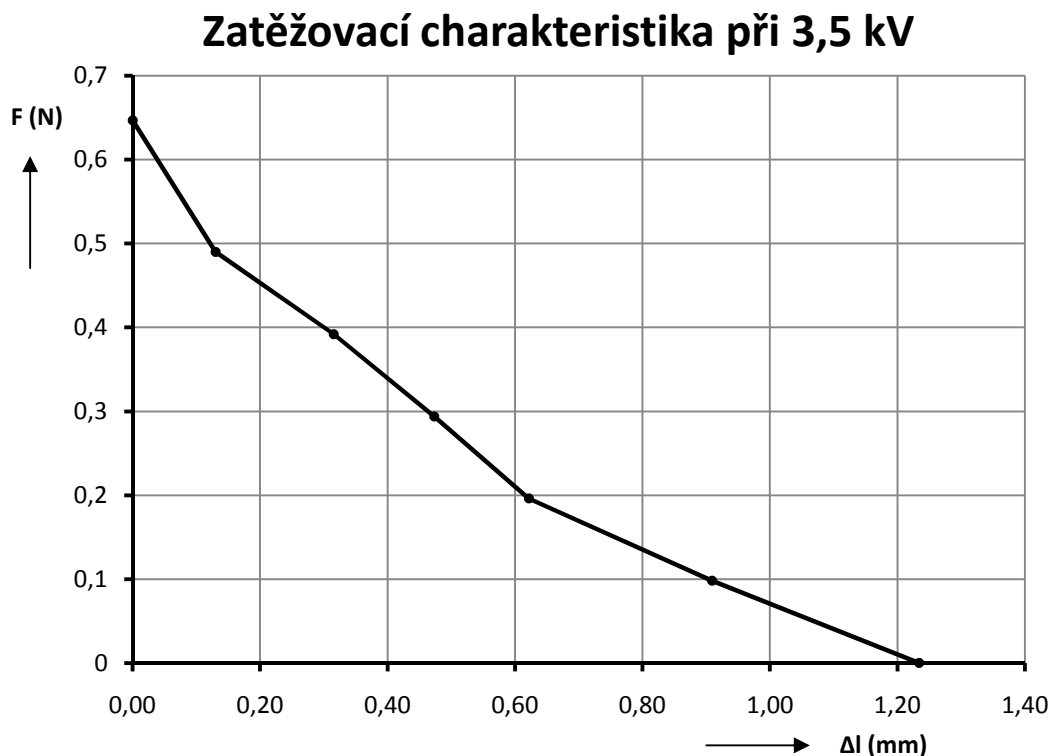


Graf 26.: Tuhost aktuátoru bez napětí

### 5.3.5. Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristika je další důležitý parametr aktuátorů. Udává jejich chování při různém mechanickém zatěžování. Maximální síla a maximální prodloužení aktuátoru jsou významné charakteristiky, které ale v praktických aplikacích nejsou zpravidla dosahovány. Při působení aktuátoru na obecné prostředí, kdy aktuátor působí na zátěž silou a zároveň ji posouvá, se pracovní bod aktuátoru pohybuje po zatěžovací charakteristice. Bližší popis této charakteristiky poskytuje kapitola 2.5.

Zatěžovací charakteristika byla měřena při konstantním napětí  $U = 3,5$  kV. Nejprve bylo připojeno toto napětí, po ustálení 60 sekund odečtena maximální síla a následně ručně zvětšena výchylka  $\Delta l$  ve směru tahu aktuátoru. Po ustálení 60 sekund byla odečtena pro danou velikost výchylky nová hodnota generované síly. Takto bylo proměřeno několik bodů, viz Graf 27.



Graf 27.: Zatěžovací charakteristika vzorku lineárního DEA

## 6. Závěr

První ze dvou hlavních cílů této práce byl experimentálně ověřit vlastnosti pásek VHB™ 4910 a VHB™ 4905 používaných jako dielektrikum v DEA. Experiment byl zaměřen především na vyhodnocení časové stability dosahovaných parametrů (konkrétně plošné expanze elastomerové vrstvy). Pro vyhodnocení vlivu stárnutí vlivem dlouhodobého předepnutí elastomeru, které je pro konstrukci nezbytné, byl sestaven experiment, ve kterém byla měřena závislost plošné expanze vzorků v průběhu 28 dní. Po tuto dobu byla tato závislost několikrát proměřena a ze získaných dat byly sestaveny charakteristiky stárnutí vrstev. Pro ověření, zda tato degradace byla způsobena časovým stárnutím nebo elektrickým namáháním vzorků při jejich měření, byla navržena druhá část experimentu, kdy byly sestaveny dvě skupiny vzorků, z nichž jedna byla sestavena s časovým odstupem šesti dní od druhé. Šest dní, podle první části experimentu, mělo výrazně snížit dosažitelnou plošnou expanzi (viz Graf 7.). Tyto vzorky byly pak paralelně vystavovány měření a elektrickému namáhání tak, aby byly vždy namáhány stejně. Z výsledků vyplynulo, že časová degradace parametrů je způsobena především reakcí na opakované elektrické namáhání, nikoli samotným stárnutím vrstvy. Při prvním elektrickém namáhání daného vzorku (při prvním měření) je dosahováno nejvyšší plošné expanze. Po prvním intenzivnějším elektrickém namáhání (namáhání pulzním napětím od nuly do maximálního napájecího napětí po dobu 20 minut) dojde k výraznému poklesu dosahované výchylky a dále je rozptyl hodnot již malý. Tento jev může být způsoben změnami v elastomeru vyvolanými silným elektrickým polem, změnami v elektrodové vrstvě nebo jinými dosud blíže neobjasněnými jevy.

	$\Delta S_{1.den}$	$\Delta S_{MAX}$	$\Delta S_{MIN}$
VHB™ 4910 @ s=300 %, 1 den	58 %	38 %	28 %
VHB™ 4910 @ s=300 %, 6 dní	62 %	43 %	29 %
VHB™ 4905 @ s=200 %, 1 den	59 %	39 %	28 %
VHB™ 4905 @ s=200 %, 6 dní	68 %	41 %	29 %

Tab. 5.: Degradace expanze plochy vlivem elektrického namáhání,  
kde  $\Delta S_{1.den}$  je plošná expanze při prvním měření,  
 $\Delta S_{MAX}$  je největší expanze po prvním elektrickém namáhání  
 $\Delta S_{MIN}$  je nejmenší expanze po druhém elektrickém namáhání.

Tab. 5. shrnuje v levém sloupci maximální dosažené hodnoty plošné expanze před elektrickým namáháním, uprostřed hodnoty ihned po prvním elektrickém namáhání a v pravém sloupci hodnoty naměřené po druhém elektrickém namáhání s týdenním odstupem. Je vidět, že hodnoty mají sestupnou tendenci, ale ustalují se všechny na hodnotě přibližně 28 %. Tyto výsledky napovídají, že pro potřeby dlouhodobé funkce DEA je třeba při návrhu aplikace počítat s parametry, které tyto aktuátory dosahují až po určitém procesu elektrického formování, nikoli s maximálními hodnotami změřenými při prvním proměření vzorků.

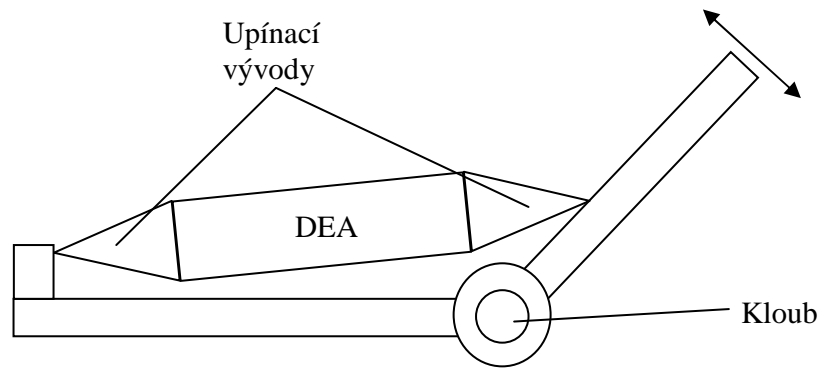
Druhým cílem práce bylo sestavit funkční vzorek lineárního DEA a experimentálně určit jeho vybrané parametry. Pro tento účel byla navržena konstrukce využívající plošné expanze elastomerové vrstvy vypnuté v pevném rámu. Samotnou konstrukci popisuje kapitola 5.1. Podle [2] a [9] bylo vybráno několik parametrů zajímavých z hlediska DEA a jejich aplikace jako umělých svalů v robotických aplikacích. Naměřené výsledky shrnuje Tab. 6.

$F_{MAX}$	$\Delta L_{MAX}$	$H_{\%F15s}$	$H_{\%\Delta I15s}$	$H_{\%F60s}$	$H_{\%\Delta I60s}$	$Rep_{\%F}$	$Rep_{\%\Delta I}$	$k$
0,77 N	1,82 mm	15,00%	31,30%	19,70%	18,10%	2,60%	6,40%	403 N.m <sup>-1</sup>

$F_{MAX}$  - maximální dosažená síla;  $\Delta L_{MAX}$  - maximální dosažené prodloužení;  $H_{\%F15s}$  - největší hystereze síly při 15 s ustálení na každém vstupním napětí;  $H_{\%\Delta I15s}$  - největší hystereze prodloužení při 15 s ustálení na každém vstupním napětí;  $H_{\%F60s}$  - největší hystereze síly při 60 s ustálení na každém vstupním napětí;  $H_{\%\Delta I60s}$  - největší hystereze prodloužení při 60 s ustálení na každém vstupním napětí;  $Rep_{\%F}$  - reprodukovatelnost síly;  $Rep_{\%\Delta I}$  - reprodukovatelnost prodloužení;  $k$  - tuhost aktuátoru

**Tab. 6.: Souhrn naměřených parametrů lineárního DEA**

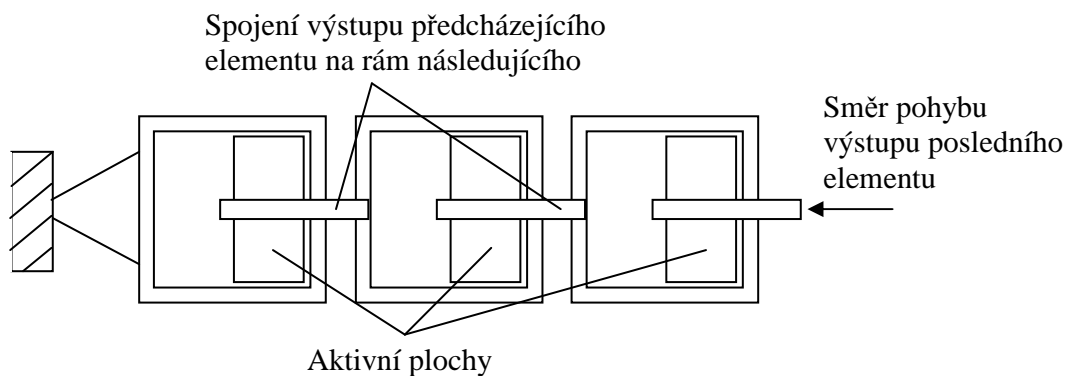
Tyto hodnoty dobře reflektují základní předpokládané vlastnosti DEA, jimiž jsou velká hystereze způsobená viskoelasticitou elastomerové membrány a poměrně velká výchylka. Tyto vlastnosti lze s výhodou využít při použití DEA jako pohonu robotických končetin. Charakter pohybu je podobný charakteru pohybu biologických svalů. Lze tedy aktuátor přímo, bez jakéhokoli převodování či složité přizpůsobovací konstrukce, použít v kloubovém mechanismu, jako je na Obr. 20.



**Obr. 20.: Aplikace DEA jako "umělého svalu"**

Díky elasticitě není v aplikacích, kdy DEA ovládá kloubový mechanismus, nezbytná ani zpětná vazba ze senzorů polohy kloubu. DEA jsou schopny bez nebezpečí poškození absorbovat zablokování polohy i při plném napětí, stejně jako biologický sval při pokusu jednou rukou vši silou zvednout velmi těžké břemeno. Jejich chování lze připodobnit k chování biologických svalů i přirovnáním reakce biologického svalu na různou intenzitu impulsu z mozku ke stahu k reakci DEA na různou velikost napětí.

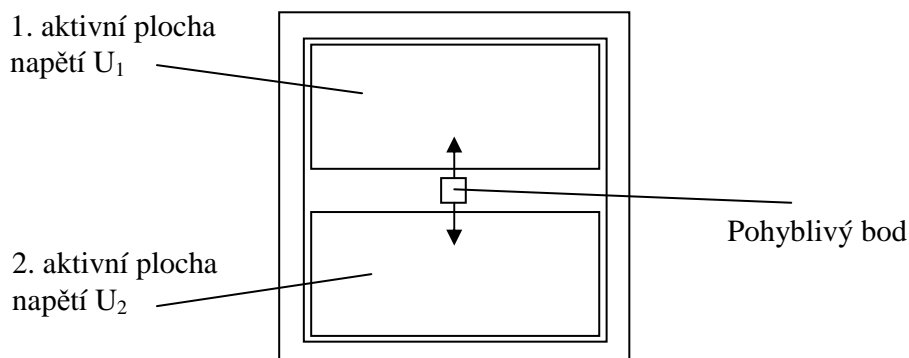
Lineární aktuátor měřený v této práci je vybaven upínacími vývody a je možné ho připojit do vhodného kloubového mechanismu. Lze ale popsat několik úprav, které by zlepšily dosahované parametry pro toto použití. Síla, kterou dosahuje tato konstrukce, závisí především na počtu aktivních vrstev elastomeru. Při větším počtu paralelních vrstev pohybujících stejným výstupem vzrůstá síla, kterou tento výstup dokáže působit. Pro zvýšení akční výchylky lze kaskádně poskládat několik stejných elementů za sebe, jak je uvedeno na Obr. 21.



**Obr. 21.: Kaskádní uspořádání rámové konstrukce DEA pro zvýšení výchylky**

Při této kaskádní konstrukci se výchylky jednotlivých elementů sčítají a celek získává podlouhlý tvar, připomínající sval. Tyto konstrukce lze technologicky připravit v různých velikostech pro různé konkrétní aplikace.

Další vylepšení konstrukce z kapitoly 5.1. může být použití dvou separátních aktivních ploch elastomeru v jedné vrstvě. Takové uspořádání ilustruje Obr. 22.



**Obr. 22.: Vylepšená rámová konstrukce DEA s dvěma aktivními plochami**

Tato konstrukce zvyšuje maximální výchylku tím, že využívá části vrstvy původně nepokryté elektrodami. Ta na měřeném vzorku sloužila pouze jako protitah pro část pokrytou elektrodami. Pro efektivnější návrh ji lze použít jako druhou, elektricky oddělenou (možno se společnou zemí) aktivní vrstvu. To vyžaduje napájecí obvody se dvěma výstupy, které se podle požadované výchylky střídají, přičemž vždy je napětí pouze na jedné ze dvou aktivních ploch. Výhoda tohoto řešení je zvýšení aktivní výchylky bez zvětšení rozměrů aktuátoru, nevýhoda je potom nutnost složitějších budicích obvodů a složitější samotná konstrukce, kdy je třeba u všech vrstev pečlivě dodržet elektrické oddělení vrstev.

DEA neprokazují sice řádově lepší výkony než jiné aktuátorové technologie, poskytují ale mnoho zajímavých parametrů, které nejsou dosahovány ostatními technologiemi, z nichž některé byly popsány v této práci. Oblast možných praktických aplikací DEA po dostatečném prozkoumání materiálových a konstrukčních vlastností je velmi široká.

### **6.1.     *Stručný souhrn práce***

Byly prostudovány možnosti měření vlastností pro porovnávání lineárních aktuátorů a různé přístupy ke konstrukci aktuátorů s elastomerovým dielektrikem.

Podle zadání byla proměřena časová závislost expanze plochy elastomeru VHB<sup>TM</sup> 4910 a VHB<sup>TM</sup> 4905 pokryté elektrodami na přiloženém napětí. Z tohoto měření vyplynula silná závislost této expanze na předchozím elektrickém namáhání daných vzorků. Po elektrickém namáhání dochází k výraznému poklesu expanze plochy elektrod pod napětím. To je důležitý efekt pro návrh aktuátorů s elastomerovým dielektrikem z tohoto materiálu.

Dále byla navržena konstrukce lineárního aktuátoru využívající expanze plochy elastomerového dielektrika ke generování lineárního pohybu. U tohoto vzorku byla proměřena převodní charakteristika, reprodukovatelnost a hystereze maximální síly a výchylky. Dále pak jeho zatěžovací charakteristika a tuhost. V závěru jsou navrženy možné vylepšení použité konstrukce pro zlepšení dosahovaných parametrů pro aplikaci jako pohon robotických končetin.

## 7. Literatura

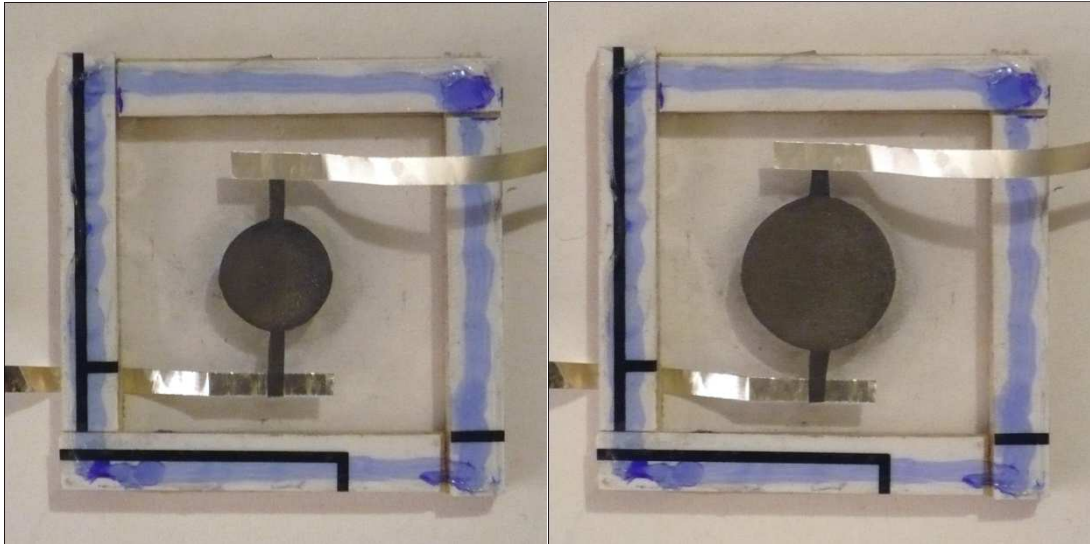
- [1] Vlach, J.: *Elektrický umělý sval*. Česká republika, ČVUT 2012, Bakalářská práce.
- [2] Husák, M.: *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha, Academia, 2008. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [3] Kofod, G.: *Dielectric elastomer actuators*. Denmark, Pitney Bowes Management Services A/S 2001, ISBN 87-550-2924-8, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark.
- [4] Brochu, P. – Pei, Q.: *Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles*. Macromolecular Rapid Communications. 2010, 31: pp. 10–36.
- [5] Pang, X. a kol.: *Application of Dielectric Elastomer Planar Actuators in a Micropump Chip*. Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009. ISBN 978-1-4244-2800-7, pp. 1199 – 1202.
- [6] Shian, S. a kol.: *Tunable lenses using transparent dielectric elastomer actuators*. OPTICS EXPRESS 8669 Vol. 21, No. 7, 2013. School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, USA.
- [7] Lai, W. a kol.: *Fabrication and Analysis of Planar Dielectric Elastomer Actuators Capable of Complex 3-D Deformation*. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2012. ISBN 978-1-4673-1405-3, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA
- [8] Perline R. – Kornbluh R. a kol.: *Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion*. Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuator and Devices (EAPAD), pp. 126 – 137.
- [9] Bar-Cohen, Y.: *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles : reality, potential and challenges*. Bellingham, SPIE PRESS, 2004, ISBN: 0-8194-5297-1.
- [10] Michel S. a kol.: *A comparison between silicone and acrylic elastomers as dielectric materials in electroactive polymer actuators*. Polym Int 2010, 59: pp. 391 – 399.
- [11] Zhang, R.: *Development of Dielectric Elastomer Actuators and their Implementation in a Novel Force Feedback Interface*. Mnichov, Verlag Dr. Hut, 2008, ISBN: 978-3-89963-784-7, Doctor of Technical Sciences thesis, Swiss federal institute of technology, Zurich.
- [12] Tanaka, T. – Fukaura, T.: *Effect of Mechanical Pre-strain on Characteristics of Electro-active Polymer Actuators*. The International Conference on Electrical Engineering 2008.
- [13] Lochmatter, P. – Kovacs, G. – Silvain, M.: *Characterization of dielectric elastomer actuators based on a hyperelastic film model*. Sensors and Actuators A 135, pp. 748 – 757, 2007.



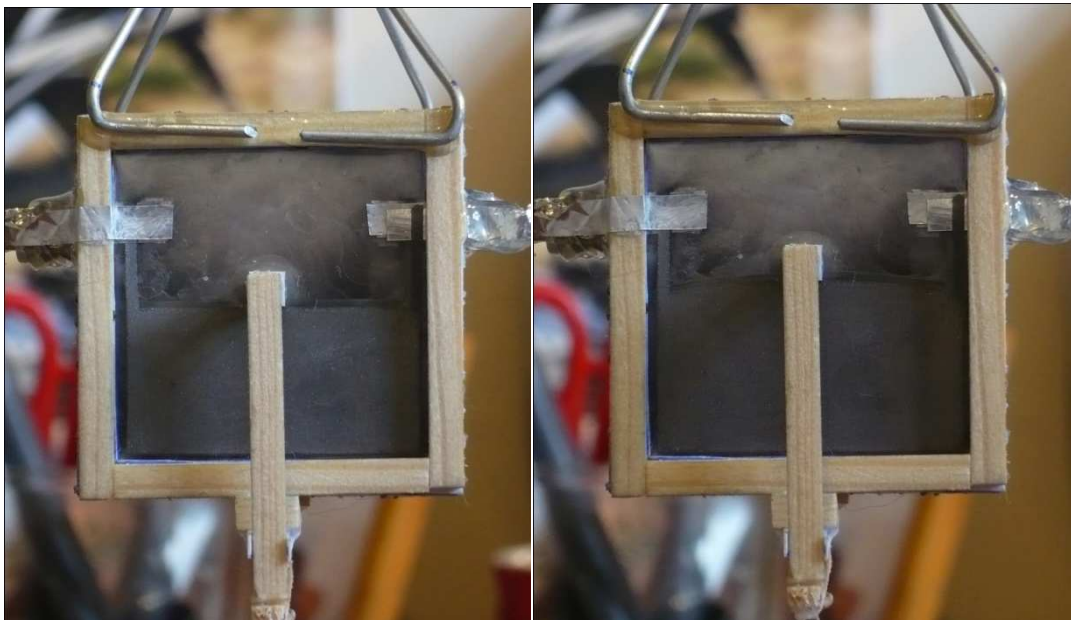
- [14] Perline R. – Kornbluh R. a kol.: *Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion*. Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuator and Devices (EAPAD), pp. 126 – 137.
- [15] Qiang, J. – Chen, H. – Li, B.: *Experimental study on the dielectric properties of polyacrylate dielectric elastomer*. Smart Materials and Structures 21, 2012.
- [16] Wissler, M. – Mazzaa, E.: *Mechanical behavior of an acrylic elastomer used in dielectric elastomer actuators*. Sensors and Actuators A 134, pp. 494 – 504, 2007.
- [17] Skořepa, V.: *Zdroj vysokého napětí*. Česká republika, ČVUT 2012, Bakalářská práce.

## 8. Přílohy

### 8.1. Vybrané fotografie z průběhu experimentu



Obr. 23.: Expanze plochy vzorku s elastomerem VHB™ 4905,  $s = 300\%$



Obr. 24.: Posun ramena na středové pohyblivé konzoli lineárního DEA

## **8.2. Přílohy na CD**

Diplomová práce:	Vlach_Jan_DP.pdf
Data naměřená při experimentech:	Vlach_Jan_DP_priloha1.xlsx
Technický list pásek VHB <sup>TM</sup> :	Vlach_Jan_DP_VHB_TDS.pdf