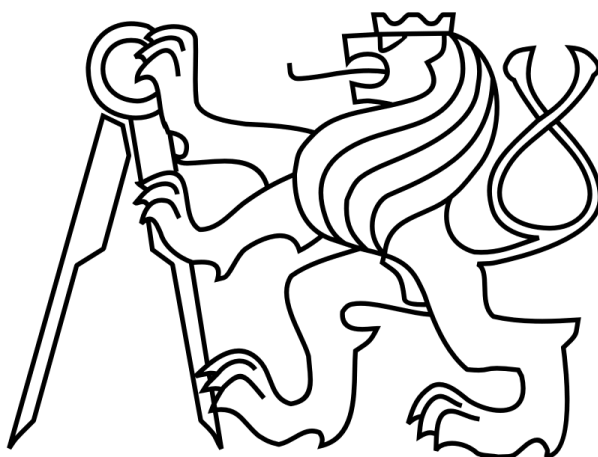


České vysoké učení technické v Praze
fakulta elektrotechnická
katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

Aktuátor s PVC gelem

Autor: Dominik Šídlo

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šídlo** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **434818**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Aktuátor s PVC gelem

Název bakalářské práce anglicky:

PVC Gel Soft Actuator

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte odbornou literaturu týkající se umělých elektricky ovládaných svalů na bázi PVC gelu.
- 2) Na základě 1) navrhnete a realizujete jednoduchou strukturu umělého svalu na bázi PVC gelu.
- 3) Sestavte měřicí pracoviště pro proměňování vlastností (zejména síla a délka jako funkce napětí) umělého svalu.
- 3) Proveďte měření na několika pokusných vzorcích.
- 4) Vyhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ali, M. - Hirai, T.: Characteristics of the Creep-induced Bending Deformation of a PVC Gel Actuator by an Electric Field, Springer Science+Business Media, LLC 2011.
- [2] Li, Y. - Hashimoto, M.: PVC gel based artificial muscles: Characterizations and actuation modular constructions, Elsevier B.V. 2015.
- [3] Li, Y. - Hashimoto, M.: Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators, Elsevier B.V. 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Aktuátor s PVC gelem“ 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 23.5.2017

Dominik Šídlo

Anotace:

Gel z měkčeného polyvinylchloridu (PVC) se díky své deformaci v elektrostatickém poli stal nadějným materiálem pro výrobu aktuátorů. Z vlastností takovýchto aktuátorů lze třeba jmenovat velkou deformaci, nízkou spotřebu energie, nízkou hmotnost a rychlou odezvu, a to na vzduchu při pokojové teplotě, čímž připomínají organický sval. To umožňuje jejich využití k napodobování lidského pohybového aparátu. Tato práce vychází z výsledků dosažených univerzitou Shinshu v Japonsku [1], [2] a [4] a jejím hlavním záměrem je zkonstruovat funkční aktuátor s PVC gelem se srovnatelnými vlastnostmi jako ve zmíněných pracích. Při přípravě PVC gelu jsme pro změkčení použili v České republice dostupný diisobutyladipát (DIBA) a dioctyladipát (DOA). V této práci jsou dále zmíněny jiné konstrukce aktuátorů a jejich srovnání s aktuátorem s PVC gelem.

Klíčová slova: aktuátor s PVC gelem, elektroaktivní polymer, měkké aktuátory

Abstract:

Plasticized polyvinylchloride (PVC) gel has recently become a promising material for actuator construction thanks to its deformation in electrostatic field. Some characteristics of this type of actuator are large deformation, low power consumption, light weight and fast response, all in air at room temperature. These characteristics are quite like an organic muscle and are making the actuator a promising assist for the human musculoskeletal system. This work is based on achievements made by Shinshu University in Japan [1], [2] and [4] and its main purpose is to construct a working PVC gel type actuator with similar characteristics as in the mentioned works. To achieve this, we are using plasticizers that are obtainable in Czech Republic, these are diisobutyl adipate (DIBA) and dioctyl adipate (DOA). We are also mentioning different actuator construction types and their comparison with the PVC gel actuator.

Key words: PVC gel actuator, electroactive polymer, soft actuators

Obsah

Zadání bakalářské práce.....	Chyba! Záložka není definována.
Čestné prohlášení.....	3
Anotace/ Abstract:	4
Seznam použitých zkratk a symbolů:	6
1. Úvod	7
2. Organický sval.....	8
2.1. Makro a mikrostruktura kosterní svaloviny	8
2.2. Základní princip kontrakce kosterní svaloviny	9
2.3. Vlastnosti kosterní svaloviny	9
3. Aktuátory	10
3.1. Pneumatické aktuátory	10
3.2. Slitiny s tvarovou pamětí:.....	10
3.3. Piezoelektrické aktuátory	10
3.4. Aktuátory s cívkou v magnetickém poli.....	11
3.5. Aktuátory s elastickým dielektrikem	11
3.6. Srovnání aktuátorů	12
4. Aktuátor s PVC gelem	14
4.1. Princip deformace PVC gelu	14
4.2. Model aktuátoru s PVC gelem	17
4.3. Vlastnosti	18
5. Experiment	20
5.1. Příprava PVC gelu	20
5.2. Konstrukce aktuátoru	21
5.3. Měřicí pracoviště	23
5.3.1. Měření kontrakce a délky svalu.....	24
5.3.2. Měření síly svalu	25
5.3.3. Měření doby kontrakce a relaxace	26
5.4. Vyhodnocení naměřených dat	27
5.4.1. Kontrakce:	27
5.4.2 Síla a proud	30
5.4.2 Odezva svalu	31
6. Závěr	32
Použité zdroje a literatura:	33
Seznam příloh:.....	35

Seznam použitých zkratk a symbolů:

DBA		dibutyladipát
DIBA		diisobutyladipát
DOA		dioktyladipát
PVC		polyvinylchlorid
THF		tetrahydrofuran
B	(T)	magnetická indukce
C	(F)	kapacita
d	(m)	vzdálenost elektrod
E	(Vm ⁻¹)	intenzita elektrického pole
E_H	(Nm ⁻²)	Youngův modul pružnosti
F	(N)	síla
I	(A)	proud
q	(C)	náboj
R	(Ω)	odpor
S	(m ²)	plocha
s	(s ⁻¹)	$s = j\omega$ komplexní proměnná odezvy
U	(V)	elektrické napětí
v	(ms ⁻¹)	rychlost náboje
X	(%)	kontrakce
ε	(Fm ⁻¹)	permitivita dielektrika
ε_H	(-)	poměrná deformace
σ	(Nm ⁻²)	normálové napětí svalu

1. Úvod

Využívání elektrické energie a její přeměna na tepelnou energii, energii záření a v neposlední řadě i mechanickou energii je dnes považováno za běžnou součást každodenního života. Právě pro přeměnu nejen elektrických veličin na mechanické se používají tzv. akční členy, též známe jako aktuátory. Jako zpětnou vazbu k aktuátorům a přeměnu neelektrických veličin na elektrické jsou naopak používány senzory. Mezi nejznámější aktuátory patří spalovací a elektrické motory, dále také pneumatické a hydraulické stroje, které nám usnadňují práci již mnoho let. V poslední době se však při vývoji robotiky a biomedicínského zařízení mění požadavky na vlastnosti aktuátorů tak, aby co nejdokonaleji napodobily pohyb organických svalů. Aby aktuátory mohly být použity pro zmíněné aplikace, musí splňovat několik podmínek. Především musejí být bezpečné, což je obecně u elektroaktivních polymerů obtížné, neboť je pro jejich správnou funkci nutné vysoké napětí. Dalšími takovými požadavky pro aktuátory jsou: rychlá odezva, lehká a snadná konstrukce, nastavitelná kontrakční deformace a dostatečná působící síla jak při kontrakci, tak při relaxaci svalu. Protože se aktuátory s PVC gelem k těmto vlastnostem blíží, má smysl studovat a vylepšovat jejich princip a konstrukční možnosti pro dosažení co nejlepších výsledků.

Na úvod této práce se zaměříme na stavbu, princip a vlastnosti organického svalu, neboť právě jemu se má náš výsledný aktuátor co nejvíce podobat. Dále se také zabýváme vlastnostmi a principy běžných typů aktuátorů, abychom je mohli porovnat s aktuátory s PVC gelem, a tak vyzdvihnout některé jejich užitečné vlastnosti.

Důležitá část této práce je zaměřena na dosavadní úspěchy ve vývoji aktuátoru s PVC gelem. Pokusíme se tedy vysvětlit z dostupných zdrojů princip funkce takového svalu a vlastnosti PVC gelu, které umožňují jeho deformaci. Zaměříme se také na používané konstrukce aktuátorů s PVC gelem a na jejich vlastnosti a ze získaných informací navrhne vlastní aktuátor.

Další část je zaměřena na konstrukci samotného svalu. A to od přípravy PVC gelu, konstrukce aktuátoru, jeho mechanického krytu a možnosti přivedení napájení na elektrody. V následující části jsou popsána měřicí pracoviště, na kterých budeme měřit především závislost kontrakce a síly (normálového napětí) na přiloženém napětí. Naměřené hodnoty porovnáme s aktuátorem s PVC gelu ze Shinshu University.

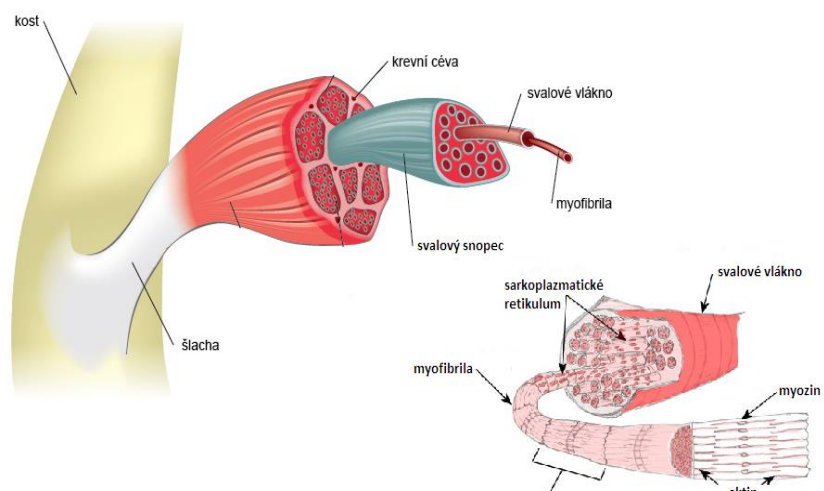
V Závěru zhodnotíme získané výsledky. Navrhne další možnosti pro zlepšení a použití aktuátoru s PVC gelem a vyjmenujeme několik možností dalšího studia tohoto typu aktuátoru.

2. Organický sval

Před konstrukcí umělého svalu se nejprve zaměříme na strukturu, princip kontrakce a vlastnosti organické, nejlépe lidské svalové tkáně. Lidskou svalovou tkáň lze rozdělit do dvou skupin. Hladkou svalovinu, kterou lze především nalézt kolem cév a orgánů. Při její kontrakci dochází ke zúžení průměru trubic, cév a orgánů. Příčně pruhovaná svalovina se dále dělí na srdeční a kosterní svalovinu, přičemž srdeční svalovina zajišťuje funkci srdce jakožto pumpy rozvádějící krev po celém těle. Kosterní svalovina zajišťuje pohyb končetin a stabilitu těla, dále zajišťuje pumpování vzduchu do plic či pohyb jazyka nebo očí. Všechny tyto typy svalové tkáně mají stejnou základní stavbu svalových vláken, a tudíž i princip jejich kontrakce je stejný, liší se však tvarem, délkou a uspořádáním těchto svalových vláken. U aktuátoru, který budeme konstruovat, očekáváme podobné vlastnosti jako u kosterní svaloviny. Proto se na kosterní svalovinu v této kapitole zaměříme.

2.1. Makro a mikrostruktura kosterní svaloviny

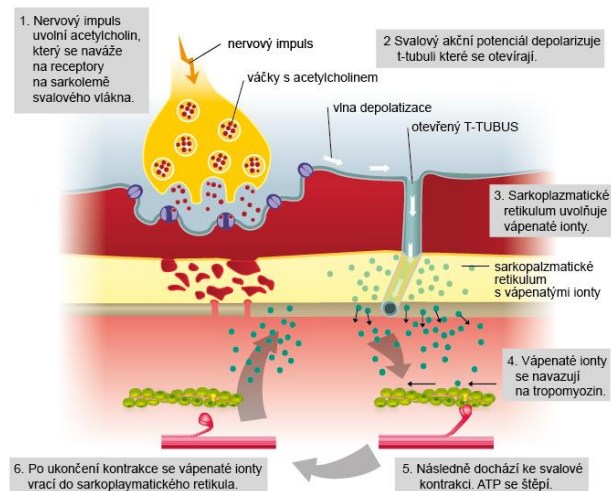
Každý sval je tvořen svazky svalových vláken (tzv. svalových snopečků). Ve svalu se nachází na tisíce svalových vláken, přičemž každé vlákno je komplexní mnohoaderná buňka o délce jednotek milimetrů až desítek centimetrů, běžně po celé délce svalu, a o průměru desítek až stovek mikrometrů (u průměrného dospělého člověka 50 μm [5]), v závislosti na umístění a funkci svalu. Svalová vlákna jsou prorostlá cévami a nervovými vlákny a spojena propojující tkání. Na konci svalu je kolagenová propojující tkáň zhuštěna do šlach, které jsou spojeny s kostmi. Počet svalových vláken ve svalu je neměnný, avšak šířku svalového vlákna lze zvětšit například posilováním [5]. Zajímavostí je, že svalové vlákno lze oddělit od svalu a vlákno může samostatně fungovat, při kontrakci se stahuje o 50 % své délky, kdežto celý sval se běžně stahuje o 10 % své délky [5]. Buňka svalového vlákna je dále tvořena ještě menšími vlákny nazývanými myofibrily, které mají běžně průměr 2 μm a jsou dlouhá jako celá délka svalového vlákna. Myofibrily jsou prorostlé sítě trubic a vaků proteinů a obklopeny sarkoplazmatickým retikulem s transversálními tubuly. Trubice a vaky sarkoplazmatického retikula v sobě uchovávají vnitrobuněčnou tekutinu obsahující velké množství Ca^{2+} iontů. Myofibrily jsou poskládány z myofilamentů, rozlišujeme tenké a tlusté myofilamenty. Tenké myofilamenty jsou složeny zejména z proteinu nazývaného aktin a tlusté myofilamenty především z myozinového proteinu. Základní kontrakční jednotka se nazývá sarkolema. Sarkolema je tvořena z páru tenkých a tlustých filament a její klidová délka je přibližně 2,2 μm . Ta se může stahovat a roztahovat v rozmezí 1,5 až 3,6 μm [5]. Celá stavba svalu je znázorněna na obrázku 1 a hlouběji vysvětlena ve zdrojích [5], [6] a [7].



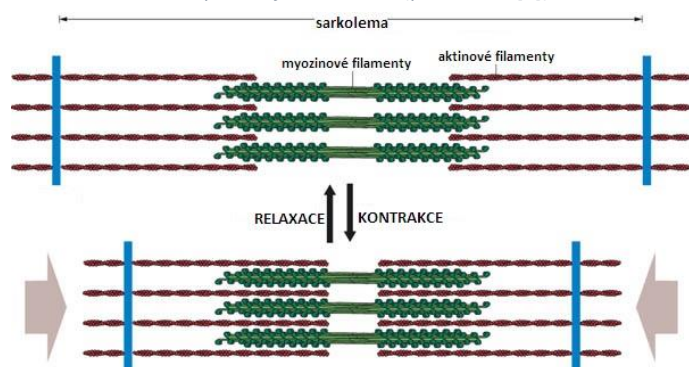
Obrázek 1: vlevo-Struktura a uchycení kosterního svalu; vpravo-struktura svalového vlákna (převzato z [7])

2.2. Základní princip kontrakce kosterní svaloviny

Základní princip kontrakce spočívá v přeměně chemické energie na mechanickou. Ta probíhá v sarkolemě a způsobuje kontrakci celého svalu. Napěťový pulz (tzv. svalový akční potenciál), který se do svalu dostane nervovými vlákny, aktivuje chemickou reakci, která způsobí uvolnění iontů Ca^{2+} ze sarkoplazmatického retikula do myofibril, kde aktivují kontrakční proteiny aktin a myozin. Molekuly myozinového filamentu se pohybují jako vesla veslice, která vplouvá do aktinových filament [6]. Po odeznění akčního potenciálu svalu jsou pak ionty aktivně vpumpovány nazpět do sarkoplazmatického retikula. Při tomto procesu se navázáním iontu Ca^{2+} ve filamentech přeměňuje ATP (adenosintrifosfát) na ADP (adenosindifosfát), P (fosfor) a mechanický pohyb filamentu. Následnou hydrolýzou se opět ADP přemění na ATP (obrázek 2). Celý tento proces odpovídá jednomu záprahu vesel, tudíž se cyklicky opakuje buď do zaplutí celého filamentu nebo do přerušení akčního potenciálu (obrázek 3). Proces lépe popsán ve zdrojích [5], [6] a [7].



Obrázek 2: Proces způsobující kontrakci (převzato z [7])



Obrázek 3: Relaxace a kontrakce sarkolemy (převzato z [7])

2.3. Vlastnosti kosterní svaloviny

Obecně popsat vlastnosti kosterního svalstva není snadným úkolem, neboť kontrakce celého svalu je ovlivněna množstvím vazivové tkáně a přítomností různých typů svalové tkáně. Maximální normálové napětí, které je kosterní sval schopen dosáhnout je $(300 \div 400) \text{ kNm}^{-2}$ svého průřezu [6], pouze však na krátkou dobu, proto se uvádí jako stálější normálové napětí 100 kNm^{-2} [5]. Zdroj [5] také uvádí, že jedna sarkolema vyvine odhadem sílu 1 pN. Výkon svalu je odhadován až na 200 Wkg^{-1} po krátkou dobu a 50 Wkg^{-1} při stálém zatížení. Nestimulovaný sval může být protažen až o 45 % své klidové délky, při kontrakci se stahuje o 10 % své klidové délky a samostatné svalové vlákno se může stáhnout až o 50 % své délky. Při minimální zátěži trvá jedna kontrakce do 100 ms, se zátěží se tato doba prodlužuje až do zátěže, kdy sval není schopen kontrakce. Důležitou vlastností organického svalu je také jeho zpevňování při kontrakci.

3. Aktuátory

V této kapitole se zaměříme na některé běžné typy aktuátorů, abychom je později mohli porovnat s aktuátorem s PVC gelem. Zaměříme se zde hlavně na základní principy fungování těchto aktuátorů a jejich vlastnosti.

3.1. Pneumatické aktuátory

Princip tohoto aktuátoru spočívá v přeměně energie stlačeného plynu uvnitř aktuátoru na mechanickou energii celého aktuátoru [8]. Konstrukčně se nejčastěji jedná o gumovou duši uzavřenou v tkanině, která při nafouknutí plynem radiálně expanduje a axiálně se stahuje, čímž lze v axiálním směru využívat její tažné síly [5]. Pro funkci tohoto svalu je však zapotřebí zdrojů stlačeného plynu, a to buďto tlakových lahví ovládaných ventily, nebo kompresorů. Ty jsou velmi hlučné, zabírají hodně prostoru a jsou těžké. Tento nedostatek tohoto typu aktuátorů je však vyvážen velmi dobrými vlastnostmi. Samotný sval je velmi lehký a konstrukčně snadno výrobitelný. Kontrakce takového svalu je až 25 % a síla dosahuje až 6000 N [9]. Protože je třeba těžkého zdroje stlačeného plynu, používají se tyto aktuátory především na výrobních linkách.

3.2. Slitiny s tvarovou pamětí:

Již v roce 1951 bylo zjištěno, že slitina mědi a zlata se po deformaci při ohřátí navrátí do původního tvaru. Postupem času bylo nalezeno i více takovýchto slitin např.: slitina indiumu a titanu nebo niklu a titanu. Právě slitina niklu a titanu (50 % niklu a 50 % titanu) se díky svým materiálovým vlastnostem, zdravotní nezávadnosti a přijatelné ceně stala nejrozšířenějším materiálem pro aktuátory se slitinou s tvarovou pamětí. Běžně se tato slitina nazývá Nitinol. Princip, na kterém spočívá deformace (pohyb), je přechod mezi uspořádáním atomů slitiny do martenzitu a do austenitu. Při nízkých teplotách je tedy slitina uspořádána do martenzitu (má nízkou krystalovou symetrii) a může být snadno deformována. Při vysokých teplotách dochází k transformaci do struktury s vyšší krystalovou symetrií (tzv. austenite), ta má však stejné rozložení atomů jako slitina před deformací. U slitiny lze „naprogramovat“ její nezdeformovaný tvar postupným zahříváním a ochlazením [5]. Vlastnosti aktuátoru se slitinou s tvarovou pamětí závisí na způsobu ohřívání slitiny. Jednou z možností je ohřev pouštěním pulzů vysokých proudů skrze slitinu. Tento způsob umožňuje rychlou dobu kontrakce, avšak všeobecným problémem je dlouhá doba chlazení slitiny. Dalšími způsoby ohřívání je indukční ohřev nebo ohřev prostředím (např. vodou v koupelnových bateriích, kde aktuátor umožňuje samostatnou regulaci teploty vody). Rychlým ochlazením ve vodě a následným výbojem pulzu elektrického proudu bylo dosaženo doby kontrakce <100 ms. Maximální deformační míra je 8 % a normálové napětí může dosahovat až hodnot 900 MNm^{-2} při návratu do nezdeformovaného tvaru. Běžně však dosahuje 150 MNm^{-2} [10]. Pro správnou funkci svalu je třeba brát v úvahu i zdroj ohřevu a aktivní chlazení, neboť účinnost převodu tepelné energie na mechanickou je zde totiž menší než 10 % [5].

3.3. Piezoelektrické aktuátory

V roce 1880 objevil Pierre Curie se svým bratrem, že působením síly na piezoelektrické krystaly se začal na jejich koncích generovat náboj. Brzy na to bylo zjištěno že obrácením procesu, tedy přiložením napětí na tyto krystaly byla vyvinuta síla a malá deformace krystalu. Mezi tyto materiály se řadí keramiky (například NEPEC-10) nebo polymery PVDF (polyvinylidendifluorid), ty mají však mnohem menší sílu. Princip této deformace lze zjednodušeně popsat tak, že v krystalu keramiky jsou do mřížky uspořádány anionty a kationty. Při přiložení napětí se začnou kationty pohybovat ve směru elektrického pole a anionty ve směru opačném, tím deformují krystalovou mřížku keramiky [5]. Piezoelektrické aktuátory se velmi často používají v audiotechnice (audio měniče i snímače), díky své

rychlé odezvě. Mohou dosahovat normálového napětí 35 MNm^{-2} , mají však velmi malou míru kontrakce ($< 0,1 \%$) [5]. Velkou výhodou je, že pracují při nízkém napětí, řádově desítky voltů zpravidla méně než 100 V.

3.4. Aktuátory s cívkou v magnetickém poli

V dnešní době patří mezi nejčastější realizace aktuátorů právě aktuátory s cívkou v magnetickém poli. Mezi ně lze zařadit elektromotory, mechanismy otáčející hlavici pevného disku, nebo například audio měniče. Jako lineární aktuátor se nejčastěji používá trubice s namotanou cívkou s permanentním magnetem uvnitř a uzavřená v pólovém nastavci (konstrukce podobná audio měniči). Popřípadě je místo permanentního magnetu použita další cívka. Magnetické pole generované proudem protékající cívkou udává Biotův-Savartův zákon. Síla působící mezi vodiči, popřípadě permanentním magnetem a vodičem je popsána Lorentzovou silou a Ampérovým zákonem. Z tohoto důvodu lze přesně určit rozsah síly a kontrakce takovéhoto aktuátoru, neboť silně závisí na proudu protékajícím cívkou. Tedy volbou vhodného proudu a konstrukce aktuátoru lze nastavit jeho sílu a délku protahování. Velkou nevýhodou tohoto svalu je jeho velká váha způsobená konstrukcí především z kovů a feromagnetik. Mezi výhody patří velká přesnost pohybu a velmi rychlá odezva. Jako příklad aktuátoru s cívkou v magnetickém poli jsme vybrali aktuátor HVCM-051-051-013-01 společnosti MOTICON, se silovou konstantou 8 NA^{-1} , nepřerušovanou silou 28 N, maximálním výkonem 33 W, odporem $2,7 \Omega$, výchylkou téměř 2 cm a klidovou délkou přibližně 7 cm [11]. Další možností konstrukce aktuátoru je namotávání lanka na elektromotor, kde využíváme kroutící moment motoru a délku svalu můžeme zvolit dle délky lanka.

3.5. Aktuátory s elastickým dielektrikem

Tímto typem aktuátoru jsme se již na naší škole zabývali [12], [13]. Konstrukčně se sval podobá kondenzátoru, kde je mezi elektrody umístěn elastický materiál. V pokusech, které jsme prováděli se používala páska VHB 4910. Princip je následující: Lorentzova síla, která je způsobena stacionárním elektrickým polem daným Gaussovým zákonem elektrostatiky, přiložením napětí působí mezi elektrodami a ty se přitahují. Důležitou veličinou je pak elektrostatický tlak působící na elastomerové dielektrikum, který způsobuje, že se dielektrikum začne vytlačovat z prostoru mezi elektrodami. Aby tato síla byla dostatečně velká je zapotřebí vysokého napětí (řádově kV) a velmi tenké vrstvy dielektrického elastomeru. Pro správnou funkci svalu je však zapotřebí, aby byl sval napnutý. U tohoto typu aktuátoru se jedná se o deformaci tahem a sílu danou modulem pružnosti elastomeru, neboť se nevyužívá přímo síly mezi elektrodami, nýbrž síly vytlačovaného a stahujícího se dielektrika. Takovýto sval se může protáhnout o 11,25 % své délky a působit silou 2,55 N.

3.6. Srovnání aktuátorů

Tabulka 1: Porovnání aktuátorů s aktuátorem s PVC gelem a s kosterním svalem

Typ aktuátoru	Síla (N)	Normálové napětí (kNm ⁻²)	Míra deformace (%)	Odezva (ms)	Výhody	Nevýhody
kosterní sval	-	100	10 - (50)	<100	-	-
pneumatický aktuátor	6 000	-	25		velká síla i kontrakce	zdroje stlačeného plynu
slitina s tvarovou pamětí	-	150 000	8	<100	Síla, deformace	neefektivní tepelná výměna
piezoelektrický aktuátor	-	35 000	<0,1	<<100	odezva, malé napětí do 50 V	malá kontrakce
cívka v magnetickém poli	dle proudu	dle proudu	dle konstrukce	<<100	přesnost pohybu, odezva, široký rozsah síly	velká váha, velký příkon,
aktuátor s elastickým dielektrikem	2,55	-	11,25	1000	lehký, kontrakce	vysoké napětí do 5 kV
aktuátor s PVC gelem	3	4	14	150	lehký, kontrakce	nízké napětí do 1 kV

Protože není žádná obecná teorie aktuátorů je třeba ke každému typu přistupovat individuálně. Pro popsání aktuátorů, které se deformují se běžně používá mechanika deformace pevných těles a Hookův zákon:

$$\varepsilon_H = \frac{\sigma}{E_H} \text{ (-; Nm}^{-2}, \text{ Nm}^{-2}), \quad (1)$$

kde $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ je poměrné délkové prodloužení, E je konstantní Youngův modul pružnosti a σ je normálové napětí dané vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ (Nm}^{-2}; \text{ N, m}^2), \quad (2)$$

kde F je síla působící tahem nebo tlakem kolmo k průřezu S materiálu. Bohužel nelze u všech aktuátorů uvažovat o deformaci v tahu, či v tlaku, jak je definováno Hookovým zákonem. Jejich sílu proto nepopisujeme normálovým napětím ale přímou působící silou na povrchu aktuátoru. Příklad, kde nelze použít normálové napětí, jsou pneumatické svaly, u kterých se výrazně zvyšuje průřez při působení síly, nebo aktuátory s elastickým dielektrikem, jejichž průřez kolmo ke směru působení síly je téměř zanedbatelný. U aktuátorů s cívkou v magnetickém poli nedochází k deformaci, ale k posouvání pevné trubice. Toto posouvání je dáno délkou vinutí cívky na této trubici. I přesto se pokusíme srovnat sílu všech aktuátorů.

Z tabulky je zjevné, že silou se nejvíce blíží ke kosterní svalovině o dva řády silnější piezoelektrický aktuátor a o dva řády slabší aktuátor s PVC gelem. Mezi nejsilnější aktuátory patří slitina s tvarovou

paměť a pneumatický sval. Zvláštní případ je aktuátor s cívkou v magnetickém poli, jehož sílu lze nastavit ve velkém rozsahu pomocí proudu. Je však třeba brát v úvahu přizpůsobení vodičů.

Kontrakcí se nejvíce ke kosterní svalovině blíží opět aktuátor s PVC gelem, vhodným kandidátem je však i pneumatický aktuátor a aktuátor s elastickým dielektrikem.

Doba odezvy je důležitá, pokud uvažujeme o použití k podpoře svalové tkáně, protože souvisí s rychlostí deformace. U piezoelektrických aktuátorů a aktuátorů s cívkou v magnetickém poli je doba odezvy velmi krátká. To je výhoda například u audio měničů. U podpory svalové tkáně však hrozí nebezpečí příliš rychlých pohybů, které mohou tkáň poškodit. PVC gel má nepatrně delší dobu odezvy než kosterní sval, a proto je bezpečnější pro podporu svalové tkáně. Srovnatelnou odezvu mají aktuátory se slitinou s tvarovou pamětí.

Co se nejhůře srovnává je způsob napájení. U pneumatických aktuátorů je největší nevýhoda použití zdroje stlačeného plynu, jak je výše zmíněno. Aby byl aktuátor přenosný je třeba použít mobilní zdroj, například baterie. Aktuátory s elastickým dielektrikem potřebují vysoké napětí (1 kV – 6 kV), což není příliš bezpečné. O moc lépe na tom není ani aktuátor s PVC gelem, který potřebuje napětí řádově stovky voltů. Aktuátory s cívkou v magnetickém poli mají velkou spotřebu díky vysokým proudům. Ideálně lze tedy baterií napájet piezoelektrické aktuátory a aktuátory s tvarovou pamětí. Aktuátor s tvarovou pamětí je však nutno chladit.

Celkově má tedy aktuátor s PVC gelem srovnatelné vlastnosti s kosterním svalem. Pokud by se nám podařilo snížit napájecí napětí a zvýšit sílu, dosáhli bychom ještě lepších výsledků, a především větší bezpečnosti.

4. Aktuátor s PVC gelem

Svými vlastnostmi se tento aktuátor řadí mezi měkké aktuátory ovládané elektrickým polem. PVC gel se skládá ze dvou komponent: ze změkčovadla a z čistého nezměkčeného PVC. Vlastnosti aktuátorů s PVC gelem závisí na poměru těchto dvou složek, na typu použitého změkčovadla a na tvaru a uspořádání elektrod. Autoři studie z univerzity v Shinshu používali pro výrobu gelu DBA (dibutyladipát). Ten však nebyl dostupný, proto jsme použili u nás dostupný DIBA (diisobutyladipát) a DOA (dioktyladipát). Lze tedy očekávat jisté odlišnosti ve vlastnostech výsledného aktuátoru.

4.1. Princip deformace PVC gelu

Stejně jako u aktuátoru s elastickým dielektrikem působí u aktuátorů s PVC gelem Lorentzova síla, tedy síla působící na náboj v elektrickém a magnetickém poli.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (\text{N; C, Vm}^{-1}, \text{ms}^{-1}, \text{T}) \quad (3)$$

Protože na náboj q působí pouze elektrické pole \mathbf{E} lze vztah zjednodušit zanedbáním pohybu náboje \mathbf{v} v magnetickém poli \mathbf{B} :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (\text{N; C, Vm}^{-1}), \quad (4)$$

kde \mathbf{E} je dáno napětím U a vzdálenostmi elektrod d :

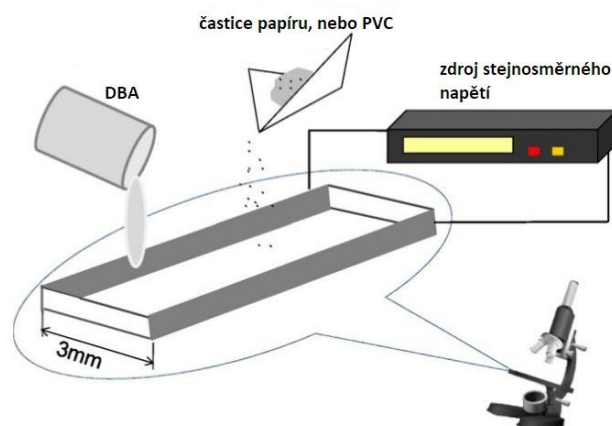
$$\mathbf{E} = \frac{U}{d} \quad (\text{Vm}^{-1}; \text{V, m}) \quad (5)$$

Síla působící mezi elektrodami je dána vztahem:

$$F = -\frac{1}{2} \varepsilon S \frac{U^2}{d^2} \quad (\text{N; Fm}^{-1}, \text{m}^2, \text{V, m}), \quad (6)$$

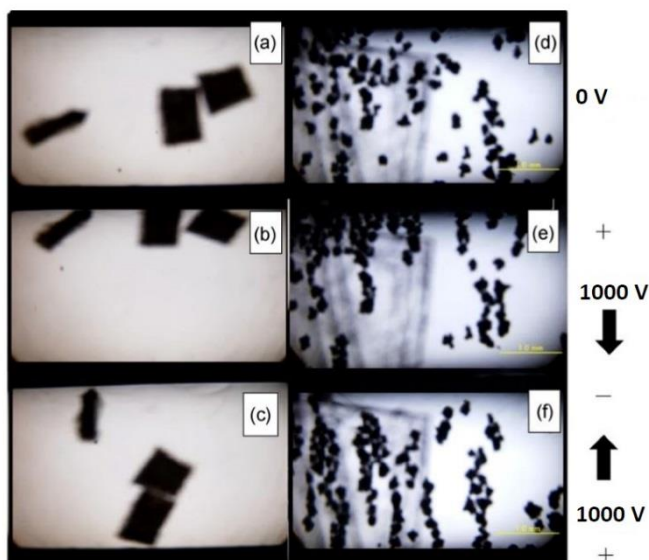
kde ε je permitivita dielektrika a S je plocha překrývajících se elektrod.

Bylo však zjištěno působení ještě dalších sil. Ve studii [14] byl učiněn pokus, při kterém byly nasypány do DBA nejprve částice papíru následně pak částice PVC (Obrázek 4).



Obrázek 4: Pracoviště na pokus se změkčovadlem DBA (převzato z [13])

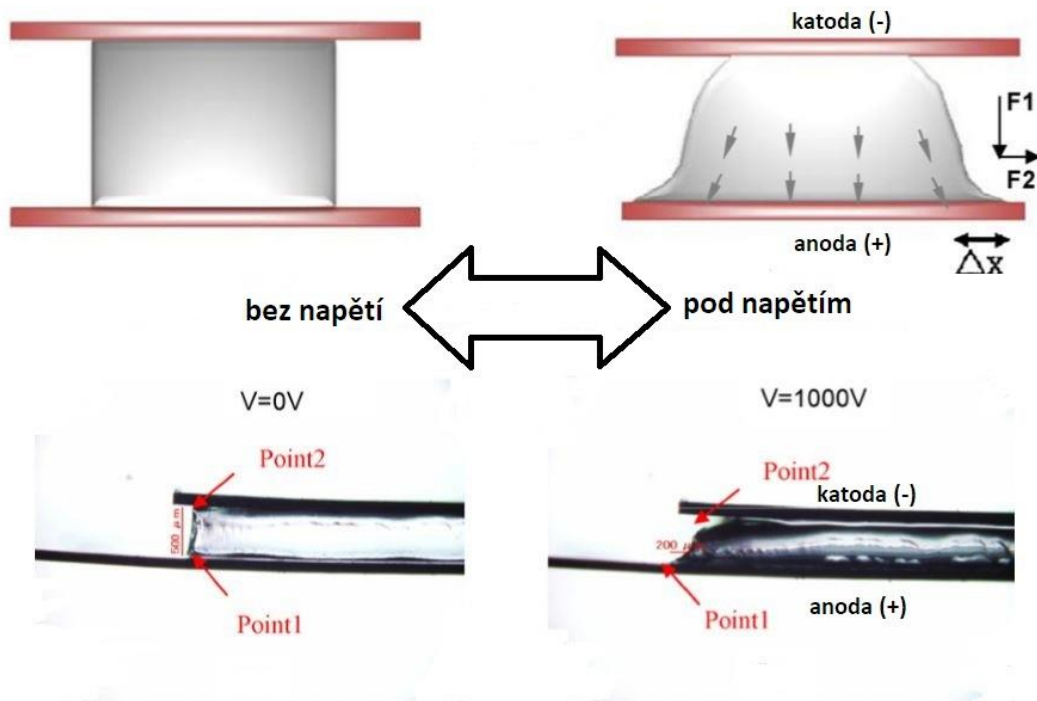
Byla učiněna následující pozorování: při nepřítomnosti elektrického pole byly papírové částice volně rozloženy mezi elektrodami. Při přiložení napětí 1000 V na elektrody se začaly papírové částice pohybovat směrem k anodě a při reverzním zapojení se opět částice začaly pohybovat na opačnou stranu směrem k anodě. Zatímco PVC částice se pohybovali v přímých řadách kolmo směrem k anodě. Stejný pokus byl učiněn ve vodě namísto DBA a částice se nijak nepohybovali. Tento pohyb znamená že při přiloženém napětí proudí DBA směrem k anodě (obrázek 5).



Obrázek 5: vlevo - částice papíru v DBA, (a) bez napětí, (b) a (c) s napětím; vpravo - částice PVC v DBA, (d) bez napětí, (e) a (f) s napětím; (převzato z [14])

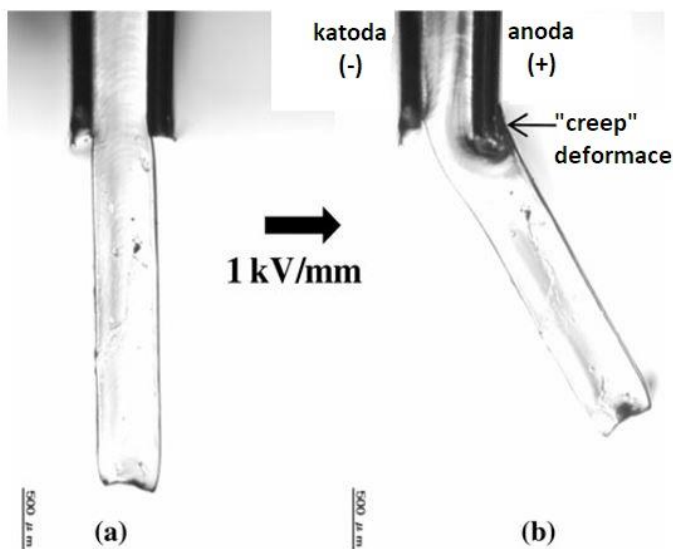
Z toho plyne, že je DBA jakýmsi typem elektrorheologické tekutiny, jejíž viskozita se zvyšuje v elektrostatickém poli [14]. To také způsobuje, že u gelu s DBA je povrch u anody při přiloženém napětí více adhesivní. Z pohledu molekulární mikrostruktury jsou PVC a DBA snadno polarizovatelné díky řetězcům C-Cl a C=O. C-Cl vazby PVC se orientují dle dipólového momentu pole a v poli nastává pohyb molekul DBA s vazbami C=O. U pevného PVC gelu lze tedy uvažovat o pevné mřížce z molekul PVC mezi nimiž se pohybuje změkčovadlo. Při přiložení napětí se tedy mřížka pouze přeorientuje dle dipólového momentu a změkčovadlo se navrství k anodě. Dále bylo zjištěno metodou PEA (pulzně elektroakustická), že se na povrchu PVC gelu u anody akumuluje negativní náboj a narůstá prostorový náboj. Ve studii [15] se také hovoří o injikování elektronů z katody do gelu. Nic podobného se neprojevovalo u silikonu ani u polymethyl methacrylátového (PMMA) filmu. V PVC gelu tedy působí nejen síla elektrického pole, ale přispívá k ní i mezipovrchová adhesivní síla přitahujících se volných nosičů k elektrodě.

Deformace gelu je asymetrická a projevuje se zejména na povrchu anody (Obrázky 6 a 7), je závislá na intenzitě elektrostatického pole.



Obrázek 6: Přilnutí neboli „creep deformace“ u povrchu anody, vlevo bez napětí, vpravo pod napětím (převzato z [14])

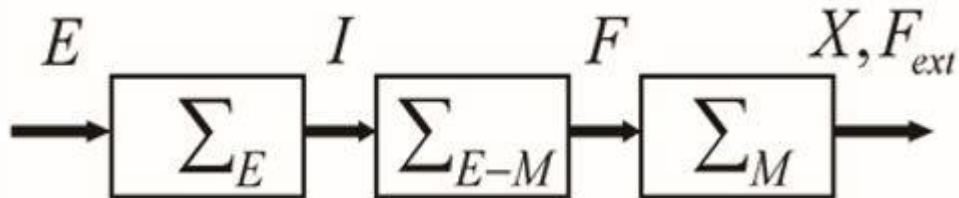
Další studie [4] se pak zabývá paměťovým efektem PVC gelu, při všech pokusech se při nepůsobení elektrického pole navrátil gel do původního stavu. To je podpořeno teorií o pevné mřížce z PVC. Dále je prokázáno, že s menším podílem změkčovadla je tento paměťový efekt výraznější. Jak skutečně tato deformace funguje a jaké síly v gelu působí není však zcela ověřené, proto se zde jedná pouze o teoretické úvahy.



Obrázek 7: (a) gel před a po deformaci bez napětí, (b) gel při deformaci pod napětím (převzato z [4])

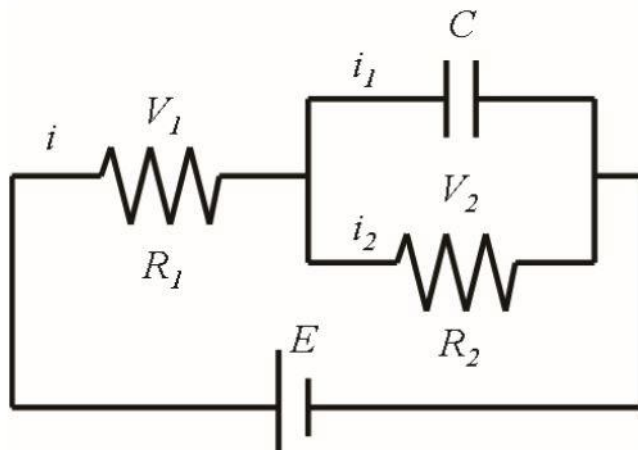
4.2. Model aktuátoru s PVC gelem

Studie [15] se zabývala modelem aktuátoru s PVC gelem. Sestavili desetivrstvý aktuátor. Gel byl připraven v poměru 4:1 DBA ku PVC. Vlastnosti tohoto aktuátoru byli: $\sigma = 4 \text{ kNm}^{-2}$, kontrakce 14 % a odezva 150 ms. Vytvořili tříložkový model sestávající ze složky elektrické, elektro-mechanické a mechanické (obrázek 8).



Obrázek 8: Tříložkový model svalu s PVC gelem s elektrickou, elektricko-mechanickou (místo proměnné F jako síly jsme použili normálové napětí σ) a mechanickou částí (převzato z [15])

Pomocí Impedančního měření a metody „Col-Col plot“ se podařilo sestavit elektrický obvod (obrázek 9) z odporu R_1 zapojeného v sérii s paralelním zapojením odporu R_2 a kondenzátoru C . Ten odpovídá elektrické složce modelu.



Obrázek 9: Náhradní elektrický obvod zjištěný impedančním měřením (převzato z [15])

Vstupní veličina tohoto obvodu je elektrické pole E a výstupní veličina je elektrický proud I . Odpor v sérii R_1 se nemění s kontrakcí, kdežto hodnota kondenzátoru C s rostoucí kontrakcí roste a paralelní odpor R_2 klesá, neboť se snižuje vzdálenost mezi elektrodami.

$$\frac{I(s)}{E(s)} = \frac{R_2 C s + 1}{R_1 R_2 C s + R_1 + R_2} \quad (\text{A, Vm}^{-1}; \Omega, \text{F, s}^{-1}, \Omega), \quad (7)$$

kde $s = j\omega$ (s^{-1}) je komplexní proměnnou odezvy dané kmitočtem ω . Odhadované hodnoty elektrických prvků jsou následující: $R_1 = 234 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 209 \text{ k}\Omega$ a $C = 0,544 \text{ }\mu\text{F}$.

Pro výpočet elektro mechanické složky modelu se nabízí dvě možnosti. Nejprve zjišťovali, jaký vliv na normálové napětí aktuátoru má proud protékající paralelním odporem. Zde bylo třeba experimentálně stanovit parametr $\alpha = 330 \text{ kPaA}^{-1}$ a časovou konstantu $T_\alpha = 0,05 \text{ s}$.

$$\sigma(s) = \frac{\alpha}{T_\alpha s + 1} I_2(s) \text{ (Nm}^{-2}; \text{ PaA}^{-1}, \text{ A, s, s}^{-1}) \quad (8)$$

$$I_2(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C s + R_1 + R_2} E(s) \text{ (A; Vm}^{-1}, \Omega, \Omega, \text{ F, s}^{-1}) \quad (9)$$

Druhá možnost byla zjišťování vlivu proudu protékajícího kondenzátorem, zde bylo třeba určit konstantu $\gamma = 2,9 \text{ MPaA}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

$$\sigma(s) = \frac{\gamma}{s} I_1(s) \text{ (Nm}^{-2}; \text{ PaA}^{-1} \text{ s}^{-1}, \text{ A, s}^{-1}) \quad (10)$$

$$I_1(s) = \frac{R_2 C s}{R_1 R_2 C s + R_1 + R_2} E(s) \text{ (A; } \Omega, \text{ F, s}^{-1}, \text{ Vm}^{-1}, \Omega) \quad (11)$$

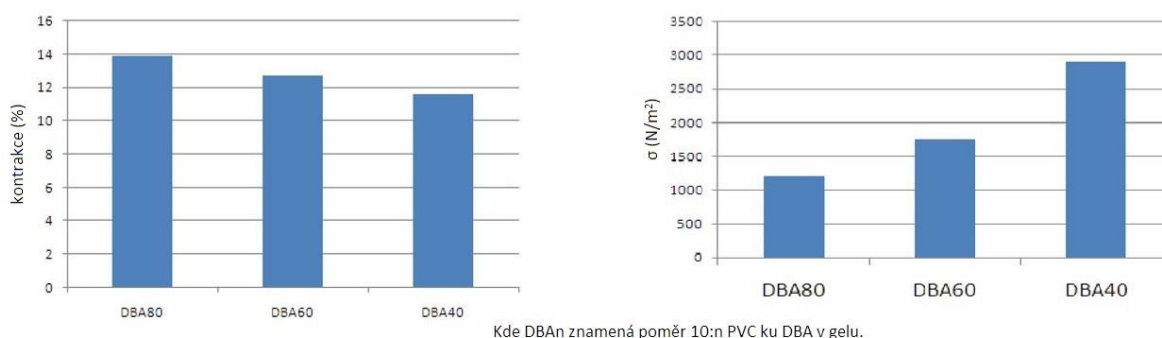
Posledním krokem bylo třeba zjistit závislost mezi normálovým napětím σ aktuátoru a kontrakcí X , zde byl opět experimentálně určen parametr $\beta = 120 \text{ Pa}$. Pokud je kontrakce X PVC gelu omezena prostředím je normálové napětí σ_{ext} napětí působící na prostředí.

$$\sigma(s) = \beta X(s) + \sigma_{ext}(s) \text{ (Nm}^{-2}; \text{ Pa, } \%, \text{ Nm}^{-2}) \quad (12)$$

Dosazením vztahů (8) a (9), nebo (10) a (11) do vztahu (12) pak získáváme závislost kontrakce X a normálového napětí σ_{ext} na intenzitě elektrického pole E . Abychom tento model mohli použít na náš aktuátor, bylo by zapotřebí experimentálně zjistit všechny zmíněné parametry.

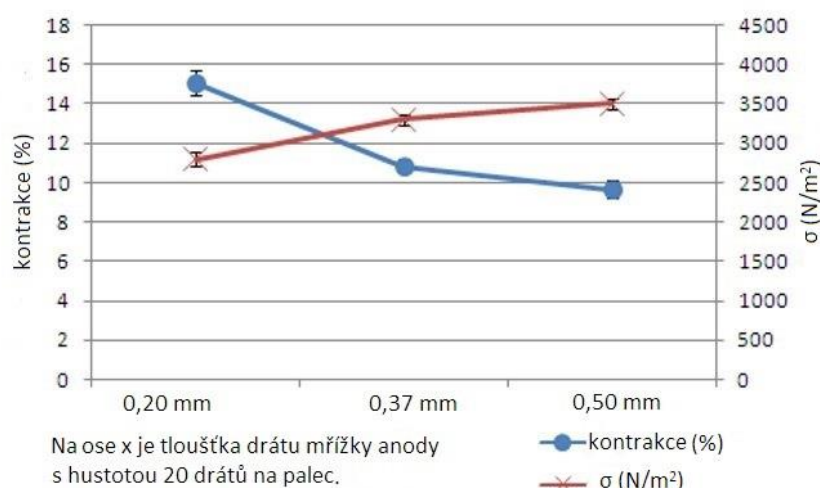
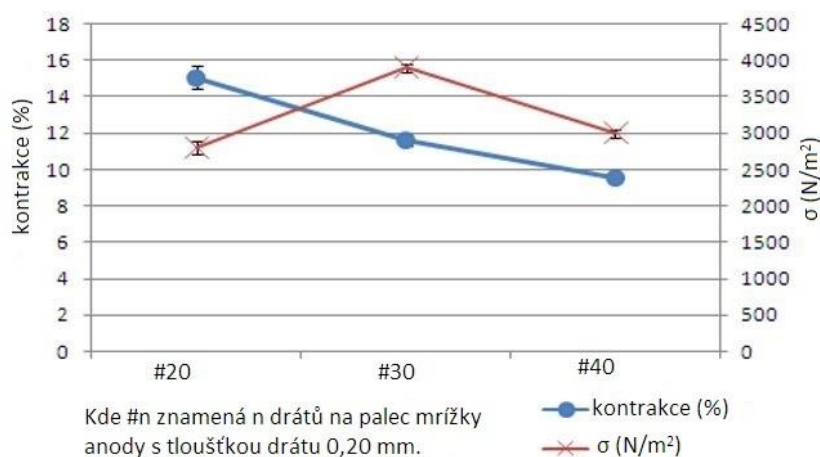
4.3. Vlastnosti

Nejčastější konstrukce aktuátoru s PVC gelem je tzv. „sendvičová struktura“, kde je jako anoda použita hliníková mřížka, jako katoda fólie z hliníku a dielektrikum z PVC gelu. Mezery mezi jednotlivými dráty hliníku mřížky uvolňují místo protlačujícímu se gelu a zároveň toto uspořádání umožňuje proudění vzduchu, který by jinak kladl gelu odpor. Dále je zapotřebí zvolit co nejtenčí katodu a vhodnou tloušťku gelu, aby míra kontrakce byla co největší. Při volbě příliš tenkého gelu však hrozí napěťový průraz. Tvar mřížky pro anodu se tedy jeví jako určující pro optimální funkci aktuátoru. Studie [16] se zabývá vlivem koncentrace DBA v PVC gelu a velikostí mřížky anody. Zjistili, že s větší koncentrací změkčovadla lze dosáhnout větší kontrakce, ale zároveň menší síly (obrázek 10).



Obrázek 10: Závislost normálového napětí a kontrakce na koncentraci změkčovadla (převzato z [16])

Čím tlustší byl použitý drát na mřížku, tím větší síla, ale menší kontrakce. Čím větší mezera mezi drátky, tím nižší kontrakce (obrázek 11). Dále bylo zjištěno, že největší sílu vykazuje mřížka s 30 dráty na palec (12 drátů/cm).



Obrázek 11: Závislost normálového napětí a kontrakce na tloušťce a hustotě mřížky (převzato z [16])

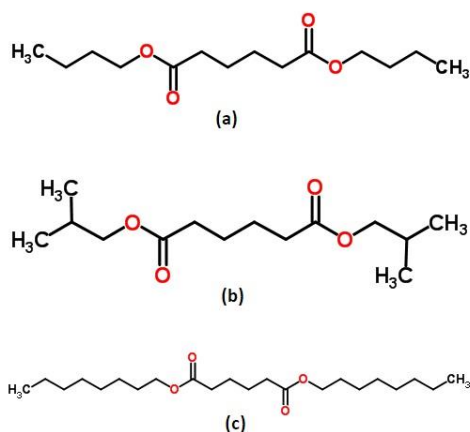
Podobných výsledků dosáhly i ve studiích [1], [16] a [17]. Výsledkem pak byl 10 vrstvý aktuátor s kontrakcí 14 %, odezvou 150 ms a výstupním normálovým napětím 4 kNm⁻². Sval je složen z gelu s poměrem DBA a PVC 4:1. Novým typem konstrukce aktuátoru s PVC gelem se zabývá studie [3]. V jejich návrhu je použita rovná deska pro katodu i anodu a gel v poměru 2:1 PVC a DBA je uspořádán do netkané textilie z nanovláken. Tento typ aktuátoru má kontrakci až 20 %, a to již při napětí 80 V, vykazuje však normálové napětí pouhých 56,8 Nm⁻². Tento sval je také mnohem lehčí a má delší dobu odezvy 0,5 s.

5. Experiment

Tato kapitola je plně věnována vlastnímu výzkumu a poznatkům. Je v ní uvedena příprava PVC gelu, konstrukce aktuátoru, návrh a sestavení měřicího pracoviště a zhodnocení naměřených dat.

5.1. Příprava PVC gelu

Pro výrobu PVC gelu je zapotřebí PVC, změkčovadla a rozpouštědla. Pro výrobu se doporučuje co nejjemněji mletý a nezměkčený PVC prášek, proto jsme použili suspenzní PVC prášek (příloha IV.). Jako změkčovadlo jsme namísto běžně používaného DBA použili nám dostupná změkčovadla DIBA a DOA (příloha III.). I když mají DIBA a DBA stejný chemický vzorec liší se svou strukturou (obrázek 12), což způsobilo jinou pevnost gelu.



Obrázek 12: Chemické struktury změkčovadel - (a) DBA, (b) DIBA, (c) DOA;

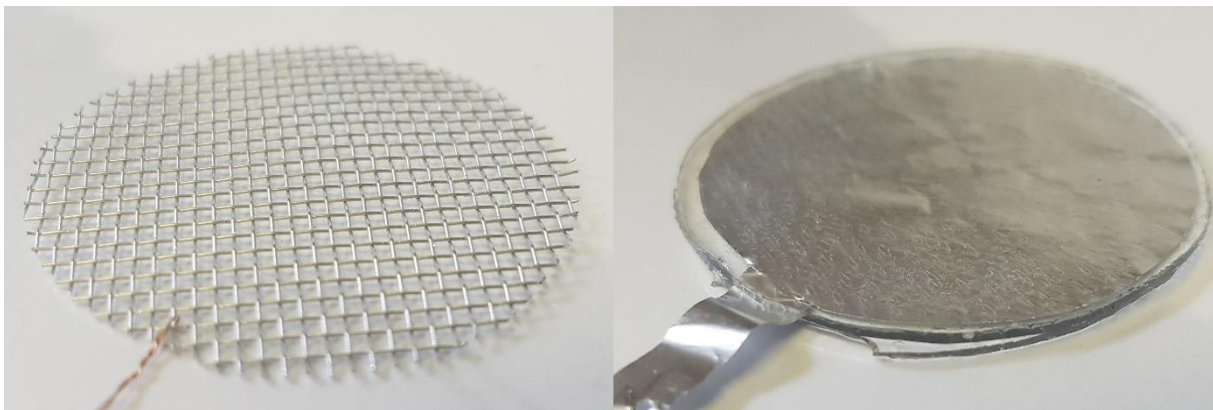
Pro změkčení PVC lze použít více chemikálií. My jsme se však omezili na adipáty. Další typy u nás dostupných změkčovadel jsou uvedeny v příloze (II.). Jako rozpouštědlo jsme použili THF, protože se velmi rychle vypařuje při pokojové teplotě. Jeho výpary jsou zdraví škodlivé, proto bylo třeba dodržovat bezpečnostní pokyny (uvedeno v bezpečnostních listech THF). Postup Přípravy probíhal následovně. Nejprve jsme odvážili množství PVC prášku v kádince na laboratorní váze, poté jsme do kádinky ve správném hmotnostním poměru přidali změkčovadlo. Za stálého míchání na magnetické míchačce jsme v digestoři přidali vhodné množství rozpouštědla. Přidávání rozpouštědla muselo probíhat v digestoři, neboť jak jsme již zmínili, výpary z rozpouštědla jsou zdraví škodlivé. Míchání probíhalo tak dlouho, dokud se PVC prášek zcela nerozpustil a směs nebyla zcela homogenní. Následně jsme rozlili směs do Petriho misek v množstvích odpovídajícím tloušťce požadovaného gelu. Směs jsme nechali odstát 2 dny při pokojové teplotě v digestoři, při zapnutém odsávání kvůli zdraví škodlivým výparům. Po dvou dnech se ze směsi odpařilo rozpouštědlo a v misce zůstal vytvrzený PVC gel. Přípravu PVC gelu jsme dělali ve třech várkách. Abychom dosáhli dostatečné kontrakce a síly zvolili jsme poměr změkčovadla a PVC 5:1. V předešlé kapitole (obrázek 10) jsme zjistili, že tento poměr má velikou kontrakci s dostačující silou. Dále víme, že rozpouštědla, která používáme, mají větší hustotu než DBA.

- V prvním várci jsme namíchali gel z DIBA v poměru 5:1 s PVC. Množství potřebného rozpouštědla nebylo v žádném zdroji uvedeno, tak jsme přidávali rozpouštědlo do poměru 1:1, dokud se směs nejevila homogenní. Poté jsme směs rozlili do Petriho misek. Protože se rozpouštědlo začalo velmi rychle odpařovat, byly ve vytvrzeném gelu hrudky a velké množství vzduchových bublin.

- Se zkušenostmi získanými při přípravě prvního vzorku PVC gelu jsme opět namíchali DIBA v poměru 5:1 s PVC práškem a rozpustili v rozpouštědle v poměru 2:1 THF a směsi. Celková směs byla bez vzduchových bublin a dostatečně řídká pro rovnoměrné rozlití v Petriho misce.
- Jednu z těchto misek jsme zkusili dát do vakua, ale až na rychlejší odpaření THF nemělo vakuum zřetelný vliv na kvalitu gelu. V poslední přípravě PVC gelu jsme použili změkčovač DOA, které bylo hustší než DIBA, proto jsme museli použít větší množství rozpouštědla THF. Opět jsme namíchali DOA v poměru 5:1 s PVC práškem a posléze rozpustili v poměru 3:1 THF a směsi. Rozpuštěnou směs jsme rozlili do Petriho misek a nechali dva dny odstát.

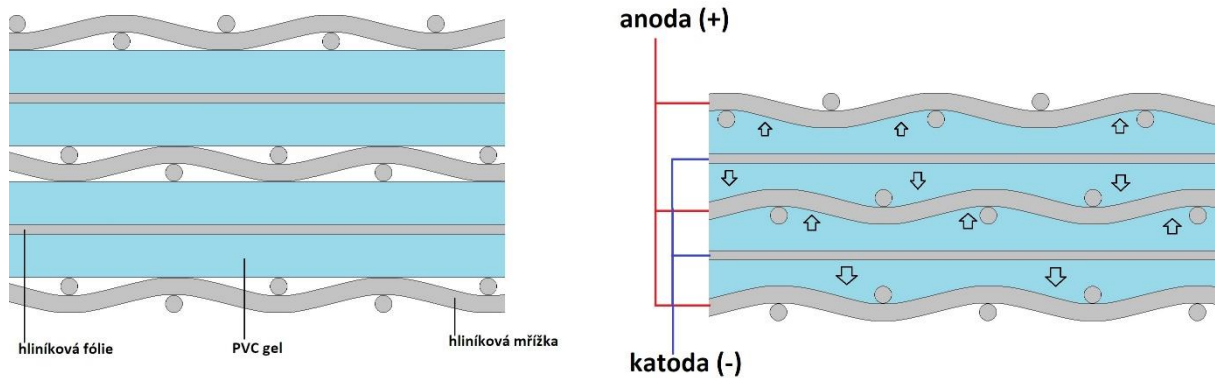
5.2. Konstrukce aktuátoru

Pro konstrukci svalu jsme zvolili osvědčenou „sendvičovou“ strukturu, používanou v pracích ze Shinshu University. Tvar svalu jsme zvolili pouze z estetického hlediska válcový i když by se kvádřová konstrukce lépe realizovala. Nejprve jsme z připraveného gelu pomocí plastového víčka vyřezali kolečka o průměru 4,4 cm. Zjistili jsme rozdíl mezi PVC gelem z DIBA a DBA, neboť gel z DIBA byl velmi křehký a snadno se trhal. (Z videa [18], ve kterém jsme viděli manipulaci s DBA gelem, se gel zdál být dostatečně pevný.) Při extrakci DIBA gelu z Petriho misek se mnoho koleček potrhalo, proto jsme do misky nalili vodu a mírným nadzvednutím kolečka nechali vodu vtéci pod kolečko. Protože má gel nižší hustotu než voda a je hydrofobní, vynesla se kolečka na hladinu vody. Z 21 koleček na miskách se nám podařilo vyndat 15 koleček neporušených. Gel z DOA byl o poznání pevnější, a tedy se nám i bez použití vody podařilo vyjmout všech 21 koleček. Poté jsme z běžné hliníkové fólie (Alobal) vystříhali kolečka o průměru 4,2 cm a nechali pásek fólie, jako vývod pro přiložení napětí. Z obou stran jsme na fólii přiložili gel tak, aby kolem dokola byla elektroda (katoda), až na vývod zakrytá. Posléze jsme z hliníkové sítě o průměru drátu 0,2 mm a hustotou 7 drátů/cm vystříhali kolečka o průměru 4,2 cm. Na okraje mřížek jsme uvázali měděné drátky, jako vývody (obrázek 13).



Obrázek 13: vlevo-anoda z hliníkové mřížky, vpravo-katoda z alobalu s přiloženým gelem z obou stran

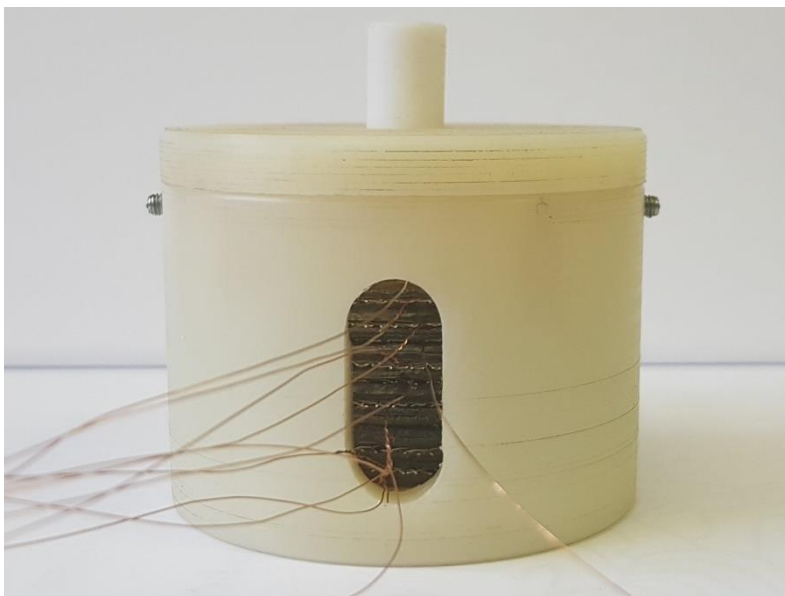
Následně jsme na sebe vše navrstvili v pořadí mřížka, gel, hliníková fólie, gel a mřížka. Toto uspořádání budeme dále nazývat vrstva svalu. Na obrázku 14 jsou k vidění dvě vrstvy svalu před a po přivedení napětí.



Obrázek 14: Struktura svalu – vlevo bez napětí, vpravo pod napětím

Jako poslední krok konstrukce jsme navrhli a na soustruhu vyrobili pouzdro na sval ze silonové tyče (obrázek 15).

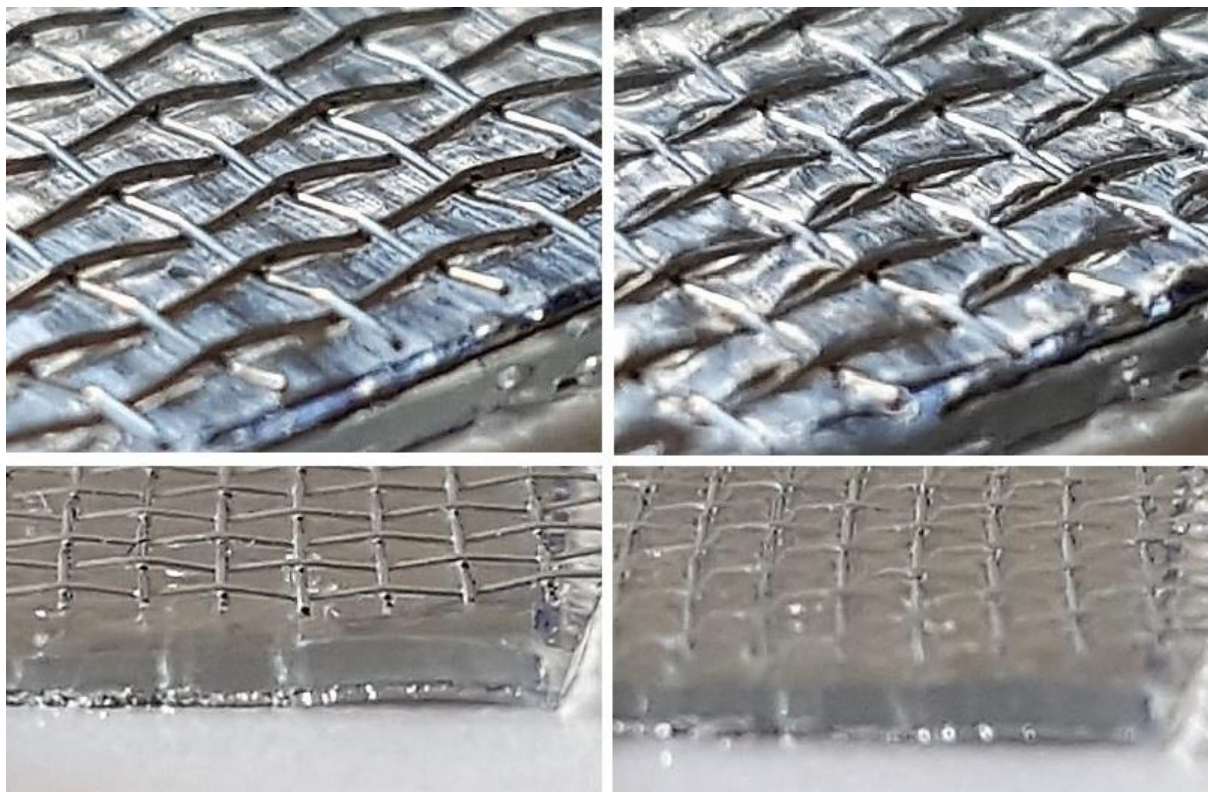
Při prvních pokusech se u svalu s DIBA gelem při napětí v rozmezí 400 V – 500 V vyskytl průraz gelu, způsobený nehomogenitou gelu, nebo zařiznutím jedné z elektrod do gelu. Proto jsme z celkových sedmi vrstev svalu skončili pouze se čtyřmi. Dále jsme pak při prvních pokusech zjistili, že máme-li na sval kolečka z PVC, jako mírnou zátěž a ochranu, gel naleptává PVC i některé jiné plasty. Tím jsme přišli o další vrstvu.



Obrázek 15: Výsledný aktuátor

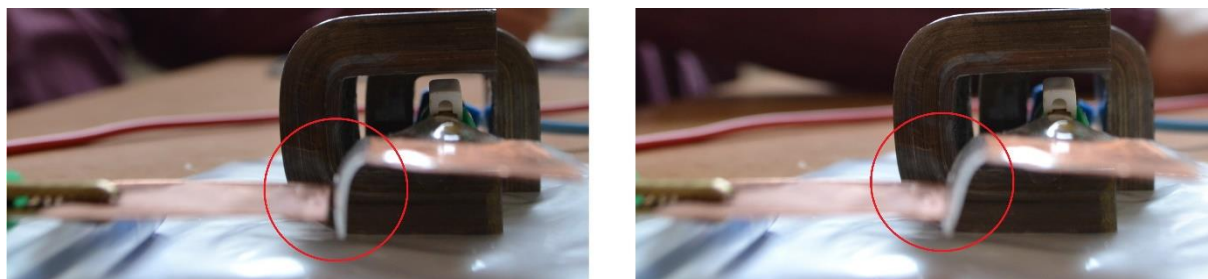
5.3. Měřicí pracoviště

Před vlastním měřením jsme provedli experiment s jednou vrstvou mřížky, gelu a fólie. Jak je na obrázku 16 vidět, je při přiloženém napětí mřížka pohlcena gelem. Při odpojení napětí se mřížka opět uvolní.



Obrázek 16: Pokus s jednou vrstvou aktuátoru, vlevo bez napětí, vpravo pod napětím

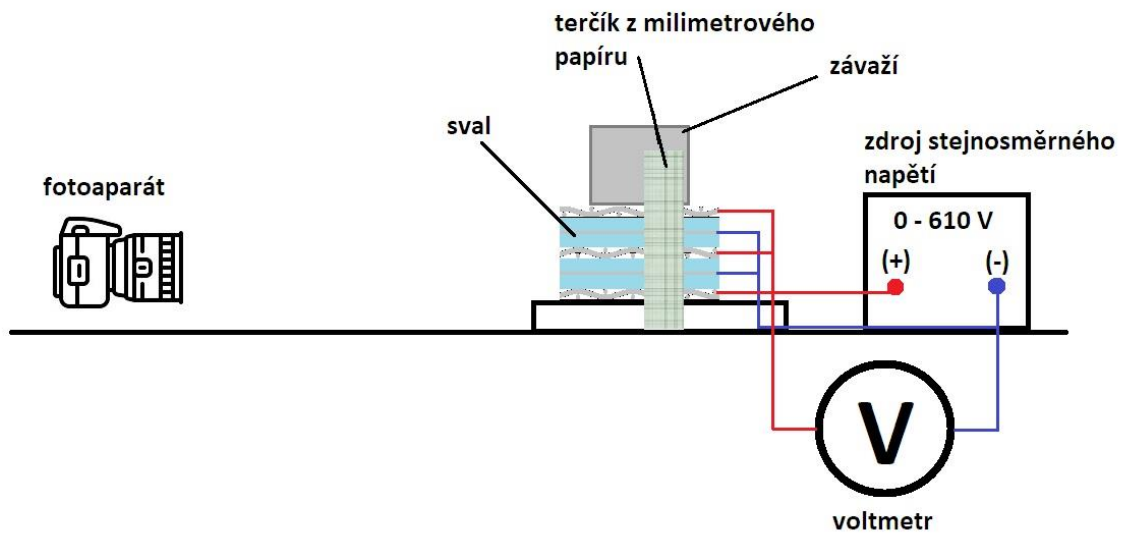
V dalším experimentu jsme na měděnou elektrodu položili kolečko gelu, aby na jedné straně volně viselo (obrázek 17). Poté jsme se přiblížili druhou elektrodou (anodou) ke gelu. Při malé vzdálenosti působí, aniž bychom přiložili napětí, síla povrchové adheze gelu. S přiloženým napětím se tato síla zvětšuje a působí na větší vzdálenost. Na obrázku je vidět, jak se při připojení zdrojového napětí přichytí gel k anodě. Při přichyceném gelu lze s anodou manipulovat, aniž by se gel odlepil. Po odepnutí napětí se gel stává méně přilnavý a uvolňuje se od anody. U gelu z DIBA se při dlouhém přilnutí začíná anoda vrývat do gelu a poškozovat jej.



Obrázek 17: Pokus s adhesivní silou gelu, vlevo bez napětí, vpravo pod napětím

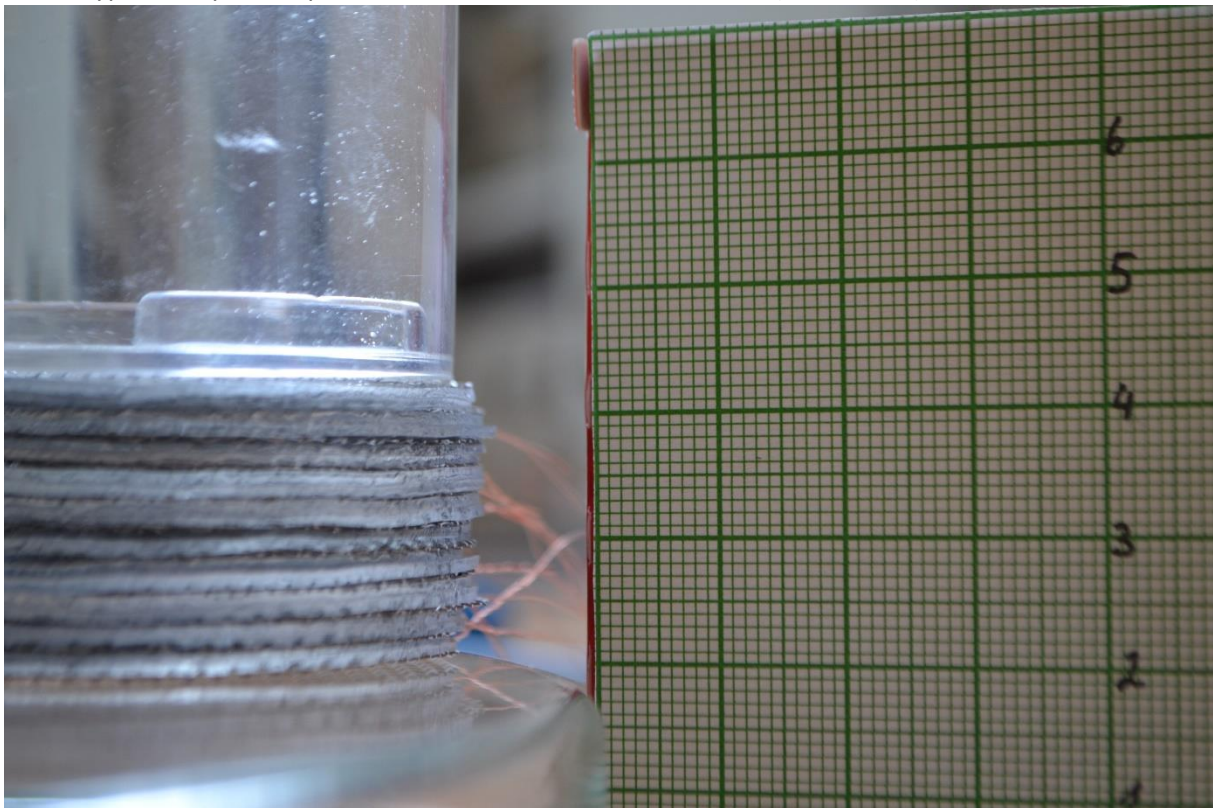
5.3.1. Měření kontrakce a délky svalu

Pro měření délky svalu bylo použito uspořádání na obrázku 18. Vedle svalu jsme umístili terčík z milimetrového papíru.



Obrázek 18: Uspořádání měřicího pracoviště pro měření kontrakce

Sval byl vyfotografován při různém napětí. Následně byla na počítači, pomocí softwaru pro zpracování fotek, vypočtena pomocí pixelů referenčního terčíku délka svalu (obrázek 19).



Obrázek 19: Snímek, z něhož byla vyhodnocena délka svalu (DOA gel zatížený 60 g)

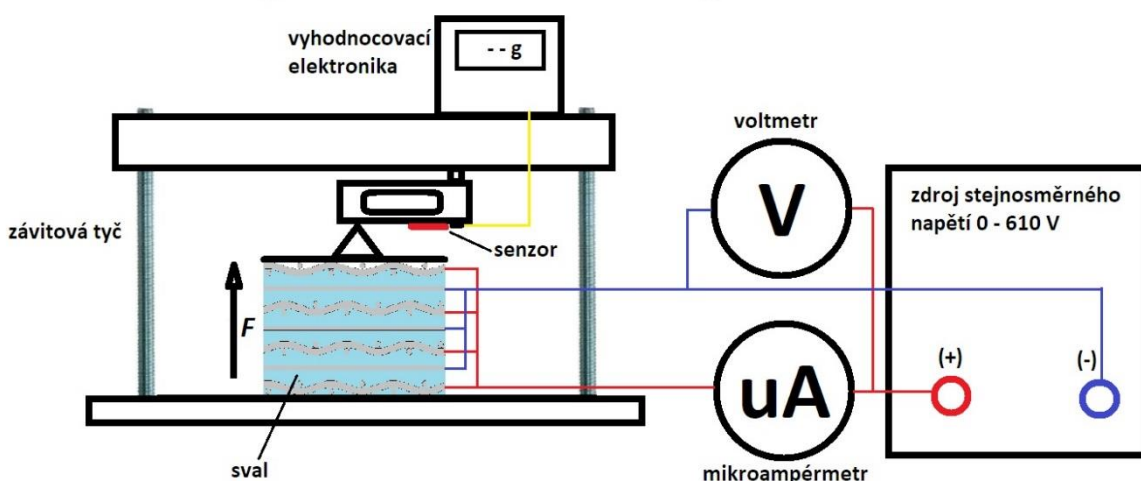
Měření jsme prováděli pro zatížený i nezatížený sval s DOA gelem a s nezatíženým DIBA gelem (obrázek 20). Dalším měřením jsme sledovali vliv zatížení svalu na jeho kontrakci tím, že jsme na sval dávali různá závaží a sledovali jeho kontrakci při přiložení napětí 550 V. Jako zdroj stejnosměrného napětí jsme použili RFT Gleichspannungsregler 4221. Pro měření napětí byl použitý multimetr s označením HC-81. Fotografie byly pořízeny fotoaparátem Nikon D3100.



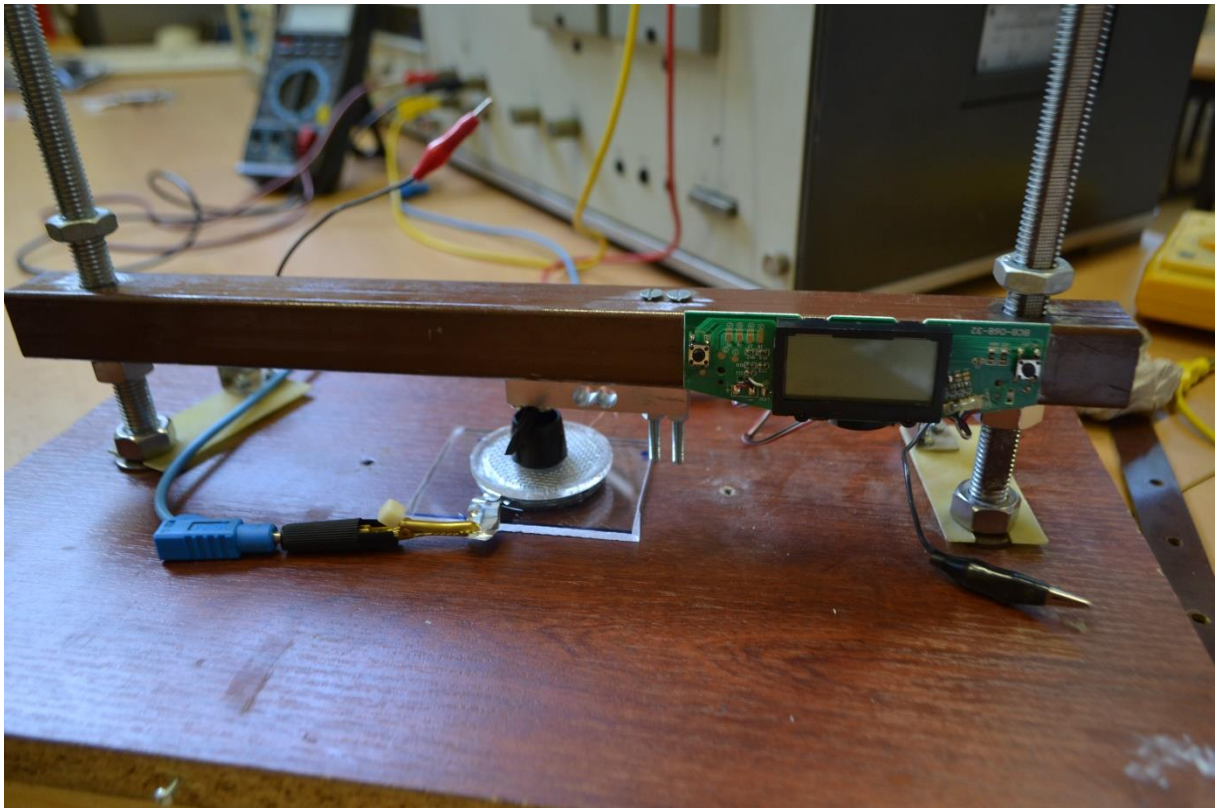
Obrázek 20: Aktuátor v klidu a při kontrakci, nahoře DOA gel, dole DIBA gel, vlevo v klidu, vpravo při kontrakci

5.3.2. Měření síly svalu

Pro měření síly svalu jsme použili konstrukci uvedenou na obrázku. Jedná se o hranatou kovovou tyč, na které je upevněný senzor (tenzometr na hliníkovém podkladu) vypreparovaný z váhy s vyhodnocovací elektronikou (digitálně analogový převodník s LCD displejem). Výsledná data byla tedy v gramech. Kovová tyč se maticemi upevnila na dvě závitové tyče. Šlo tedy nastavit a upevnit senzor v požadované výšce (obrázky 21 a 22).



Obrázek 21: Uspořádání měřicího pracoviště pro měření síly a proudu.



Obrázek 22: Fotografie měřícího pracoviště (po měření síly aktuátoru s DIBA gelem)

Měření jsme prováděli tak, že jsme sval nechali stáhnout napětím 550 V a maticemi přitáhli senzor ke svalu, dokud na senzor nezačala působit síla. Tyč se senzorem jsme upevnili maticemi. Následně postupně snižovali napětí a pozorovali, jak se mění síla při tlaku na senzor (relaxaci svalu). Pro měření síly v tahu by bylo zapotřebí sestavit sval s pevně propojenými elektrodami. Protože při měření síly v tahu je nutné připevnit senzor k vrchní elektrodě. V našem případě by se horní elektroda odpojila od zbytku svalu, proto jsme sílu v tahu neměřili. Pro tato měření existují speciální senzory například senzor T11000-240 od společnosti A&D. Pro měření jsme opět použili zdroj stejnosměrného napětí RFT Gleichspannungsregler 4221, multimetr s označením HC-81 a přesný pikoampérmetr MICROVOLTMETER-PICOAMMETER od bývalé společnosti TESLA (bez dalšího označení).

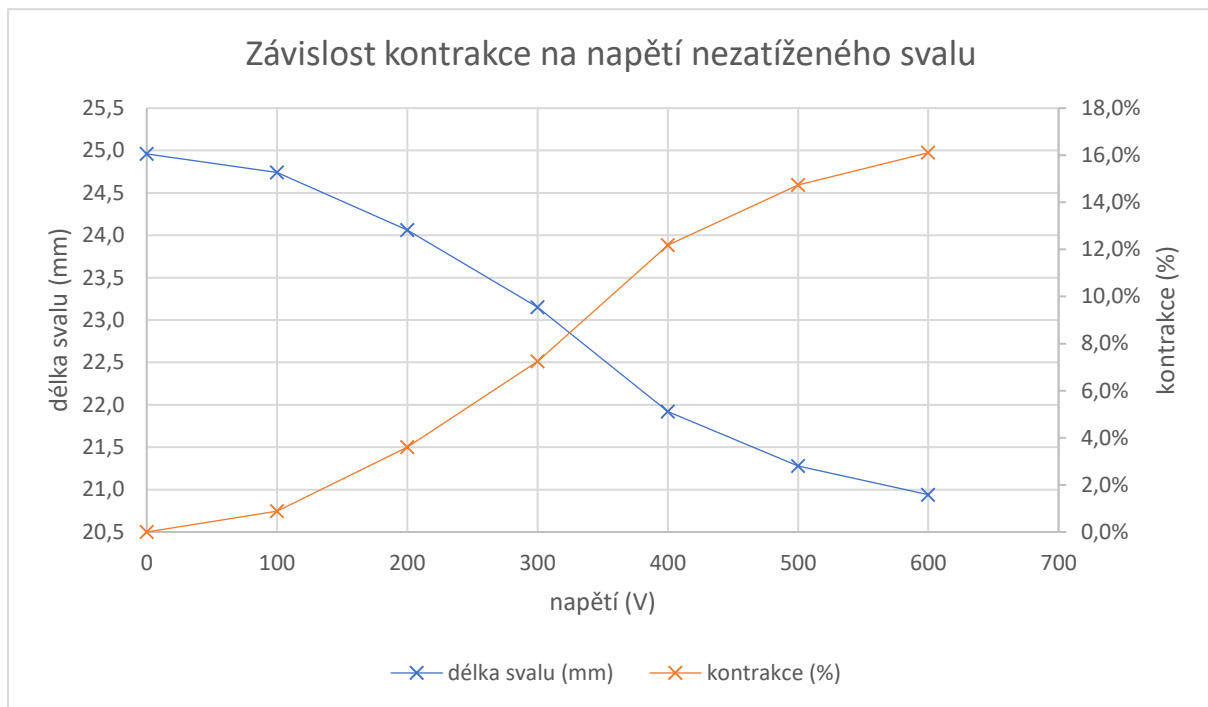
5.3.3. Měření doby kontrakce a relaxace

Toto měření jsme prováděli současně s měřením kontrakce, kdy jsme celý proces natáčeli a následně pomocí počítačového softwaru vyhodnotili dobu kontrakce a relaxace.

5.4. Vyhodnocení naměřených dat

5.4.1. Kontrakce:

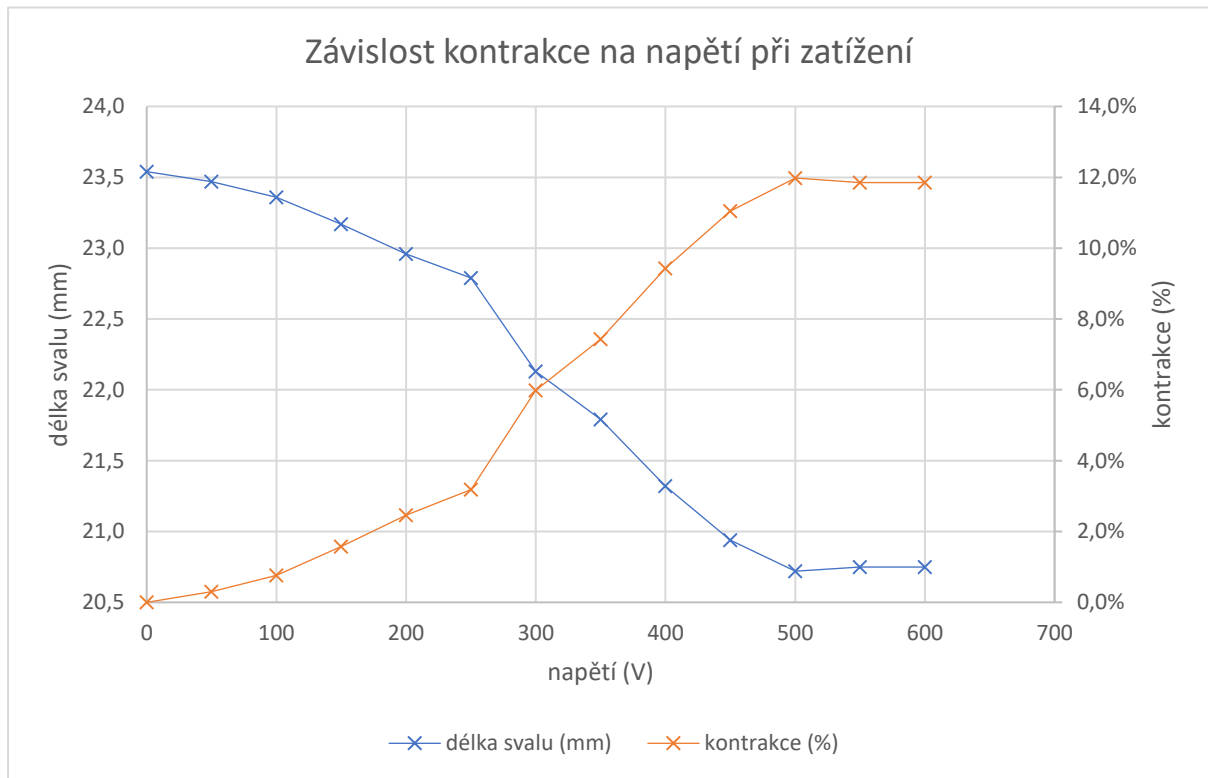
V následujícím grafu je vidět kontrakce nezátíženého desetivrstvého svalu s DOA gelem v poměru 5:1.



Graf 1: Závislost kontrakce na napětí nezátíženého svalu s DOA gelem

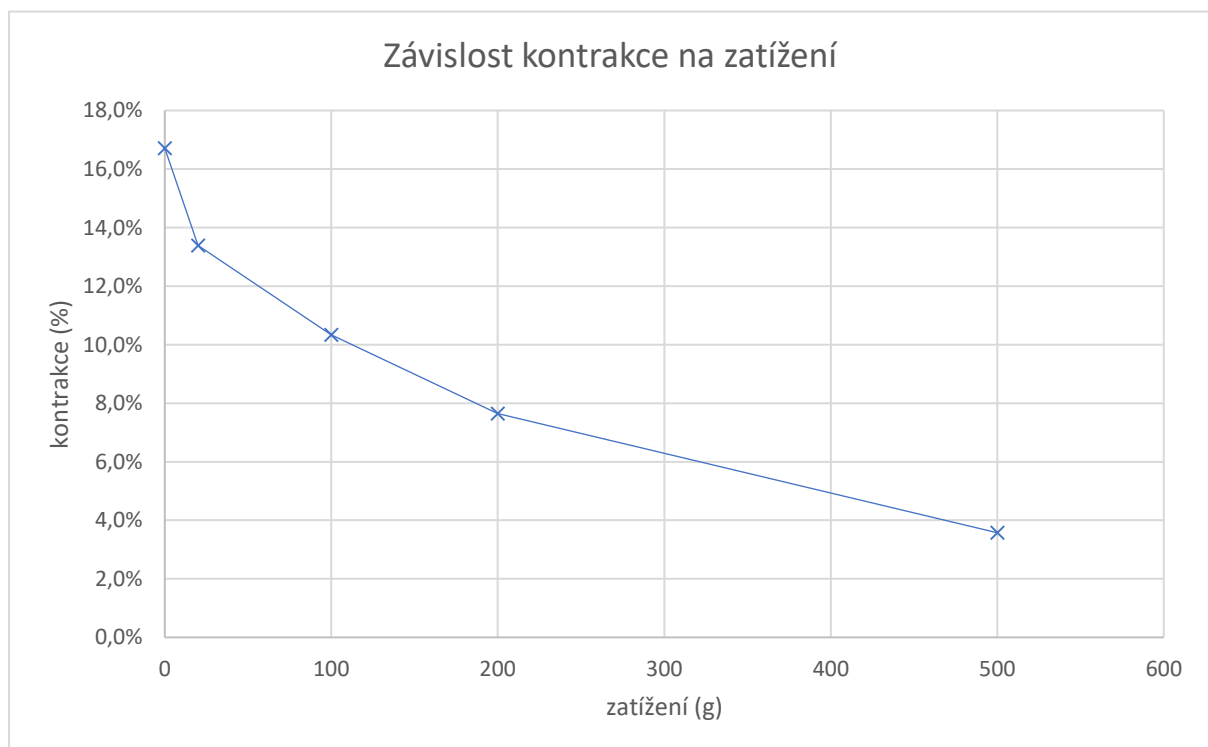
V grafu je vidět, že při napětí mezi 0 V - 100 V a 500 V - 600 V má spojnice naměřených dat menší spád než v rozmezí 300 V - 400 V. Největší dosažená kontrakce je 16,1 % (graf 1).

U zatíženého svalu (60 g) je vidět rozdíl spádů mezi krajními hodnotami napětí a napětím v rozmezí 300 V - 400 V lépe. Je také vidět snížení maximální kontrakce z 16,1% (graf 1) na hodnotu 11,9 % (graf 2).



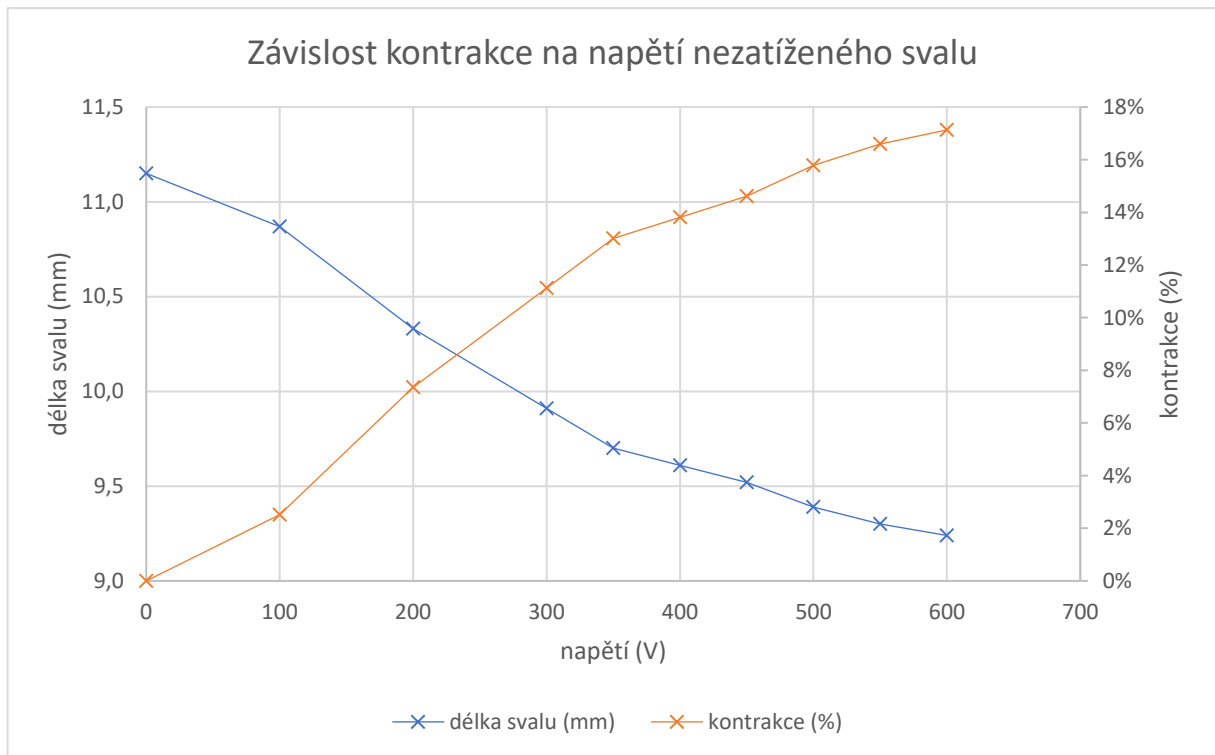
Graf 2: Závislost kontrakce na napětí při zatížení 60 g svalu s DOA gelem

Poslední graf zobrazuje závislost kontrakce na zatížení, přičemž jsme použili závaží s hodnotami 20 g, 100 g, 200 g a 500 g. Lze očekávat, že křivka dosáhne hodnoty 0 %.



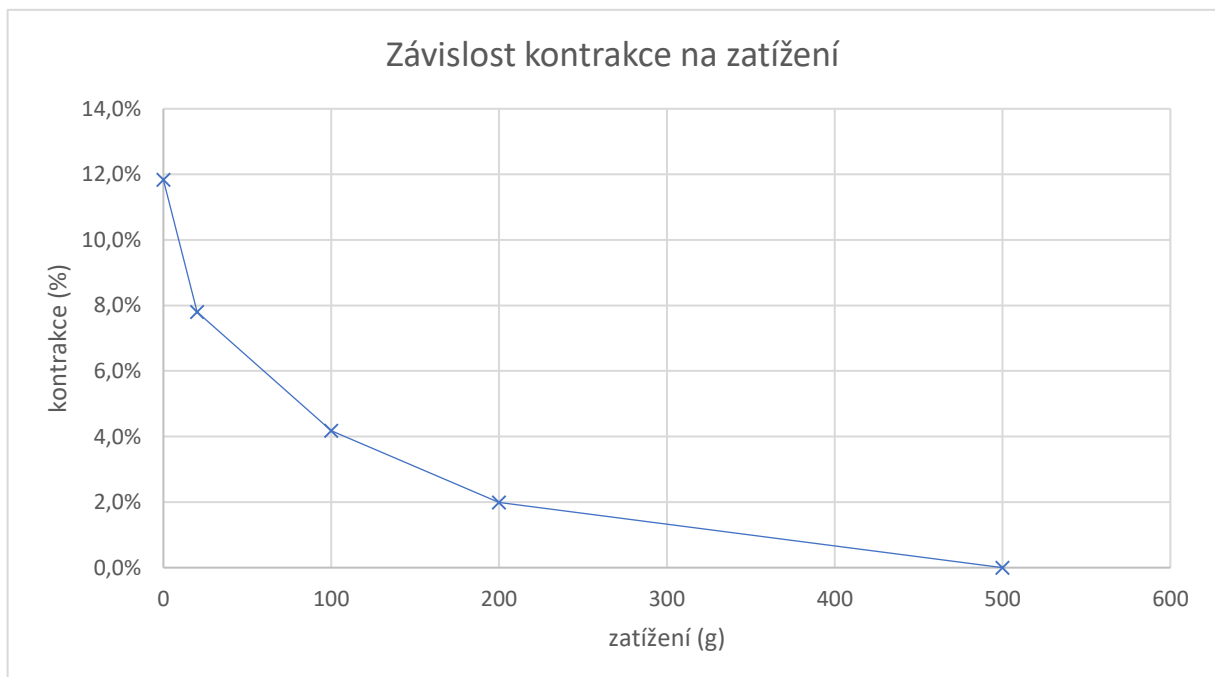
Graf 3: Závislost kontrakce svalu s DOA gelem na zatížení

U DIBA gelu jsme měřili závislost nezatíženého gelu a dosáhli jsme podobných výsledků, přestože rozdíl mezi spádem v krajních bodech a uprostřed se není tak zřetelný. Maximální dosažená kontrakce je 17 % (graf 4).



Graf 4: Závislost kontrakce na napětí nezatíženého svalu s DIBA gelem

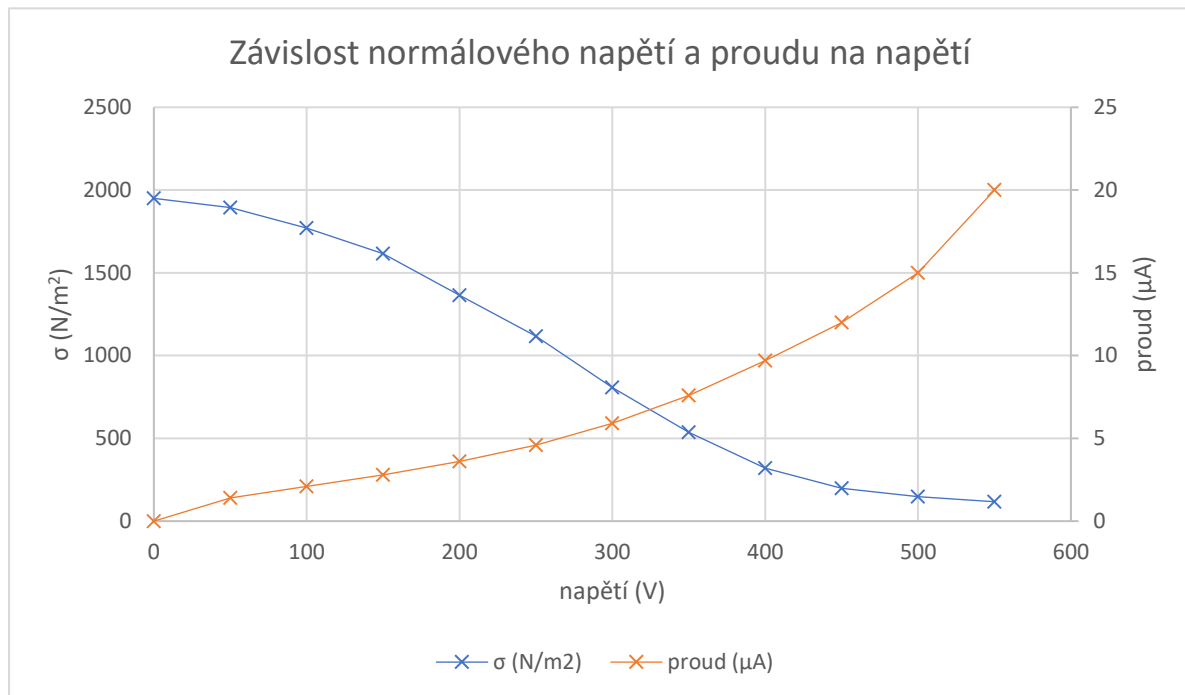
Spojnice bodů závislosti zatížení na kontrakci je opět klesající křivka. I když má spojnice hodnotu kontrakce 0 % až při zatížení 500 g, lze očekávat, že nulové hodnoty dosáhne již při nižším zatížení.



Graf 5: Závislost kontrakce svalu s DIBA gelem na zatížení

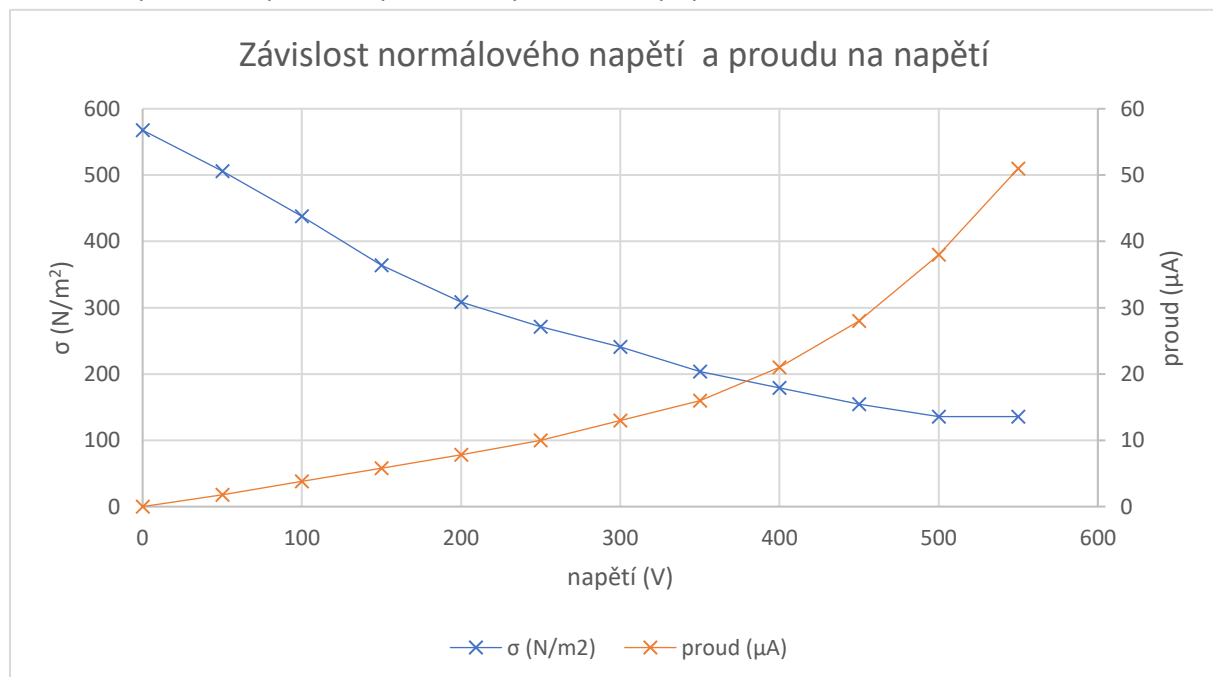
5.4.2 Síla a proud

Maximální normálové napětí, jehož jsme dosáhli uvolněním desetivrstvého svalu s DOA gelem z kontrakce při 550 V, je 1950 Nm^{-2} . Proud, který protéká svalem, roste se zvyšujícím se napětím. Není však lineární, tedy odpor gelu se se stlačováním mění, stejně tak jako kapacita celého svalu (graf 6).



Graf 6: Závislost normálového napětí a proudu na napětí svalu s DOA gelem

Maximální normálové napětí, dosažená u relaxace třívrstvého svalu s DIBA gelem z kontrakce při 550 V, je 568 Nm^{-2} . Zajímavé je, že gelem protéká více jak dvojnásobný proud než DOA gelem, i když je počet vrstev, tedy i celková plocha kapacitní i odporové vazby výrazně menší.



Graf 7: Závislost normálového napětí a proudu na napětí svalu s DIBA gelem

5.4.2 Odezva svalu

Z videozáznamu se nám podařily zjistit následující informace. Nezatíženému desetivrstvému svalu s DOA gelem trvá kontrakce 0,18 s a průměrná rychlost kontrakce je $15,06 \text{ mms}^{-1}$. Doba relaxace svalu trvá 3,94 s s průměrnou rychlostí $0,69 \text{ mms}^{-1}$. Nezatížený třívrstvý sval s gelem s DIBA potřebuje pro celkovou kontrakci 0,14 s s průměrnou rychlostí kontrakce $18,86 \text{ mms}^{-1}$. Doba relaxace je 2,99 s s průměrnou rychlostí $0,88 \text{ mms}^{-1}$. Pokud uvažujeme dobu odezvy, jako dobu kontrakce, dostáváme dobu odezvy 180 ms u DOA gelu a 140 ms u DIBA gelu.

6. Závěr

V první části této práce jsme porovnali různé typy aktuátorů. Zjistili jsme, že aktuátor s PVC gelem se svými vlastnostmi podobá kosternímu svalu. Abychom dosáhli ještě větší podobnosti, je zapotřebí vyvinout větší sílu a snížit potřebné napájecí napětí tak, aby byl sval bezpečný.

V další části jsme se pokusili vysvětlit princip fungování aktuátoru s PVC gelem. Jedná se o kombinaci Lorentzovi síly, která je posílena injikovanými elektrony do gelu a adhesivní síly gelu. Na povrchu gelu u anody dochází k tzv. „creep“ deformaci, která je po odpojení napětí vratná.

Cílem Práce bylo z dostupné literatury týkající se umělých elektrických svalů na bázi PVC gelu navrhnout a realizovat vzorky umělého svalů. Následně na sestaveném měřicím pracovišti změřit jejich mechanické vlastnosti a dosažené výsledky vyhodnotit.

Podle dostupných zdrojů jsme tedy navrhli a sestrojili dva vzorky svalů se „sendvičovou“ strukturou, upravili jsme technologický způsob přípravy gelu podle použitých změkčovadel DIBA a DOA. Podařilo se nám tak sestavit vzorky svalů s jiným typem gelu, než byl použitý v pracích z Univerzity Shinshu. Na měřicím pracovišti jsme změřili jejich kontrakci (poměr délek), normálové napětí (sílu vztaženou na průřez) a odezvu. Během pokusů se svalem s DIBA gelem došlo k průrazu několika vrstev, a tudíž ze sedmivrstvého aktuátoru nám zbyl jen třívrstvý. U svalů s DOA gelem se nám podařilo sestavit desetivrstvý sval. V tabulce 2 je vidět srovnání našich svalů se svaly vyrobených v Shinshu University.

Tabulka 2: Srovnání aktuátorů s PVC gelem

Sval	Normálové napětí (Nm ⁻²)	kontrakce (%)	doba odezvy (ms)
Sval s DOA gelem 10 vrstev	1 950	16	180
Sval s DIBA gelem 3 vrstvy	568	17	140
Sval ze studie [15] a [16]	4 000	14	143
Sval ze studie [17]	2 000	13	330
Sval ze studie [3]	57	20	500

Svaly ve studiích [15], [16] a [17] byly vyrobeny s PVC gelem v poměru 4:1 DBA a PVC a složeny z deseti vrstev „sendvičové“ struktury. Sval ze studie [3] je zkonstruován z netkané látky vytvořené z PVC gelu v poměru 2:1 DBA a PVC. Normálovým napětím jsme se nejvíce přiblížili svalů ze studie [17]. Větší kontrakce a menší normálové napětí než je u svalů ze studií [15] a [16] je způsobeno naší volbou poměru 5:1 změkčovadla a PVC. Nejrychlejší odezvu má náš sval s DIBA, protože má pouhé tři vrstvy.

Výsledkem práce je tedy funkční umělý elektrický sval na bázi PVC gelu s vlastnostmi: kontrakce 16 %, normálové napětí 1 950 Nm⁻² a doba odezvy 180 ms. Tímto jsme se přiblížili k dlouholetému výzkumu Shinshu University a vyzkoušeli i jiné typy gelu, které jsou stejně účinné jako gel s DBA.

Díky této práci máme nyní přístup k materiálům potřebným k výrobě PVC gelu, tudíž můžeme provádět další pokusy a hledat nové a lepší konstrukce aktuátoru s PVC gelem. V budoucích pracích bychom se mohli zabývat ideálním tvarem anody, tloušťkou, tvarem a poměrem PVC gelu, nebo zkusit použít jiné typy změkčovadel, například ftaláty.

Použité zdroje a literatura:

- [1] LI, Yi a Minoru HASHIMOTO. PVC gel based artificial muscles: Characterizations and actuation modular constructions. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2015, **233**, 246–258. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2015.07.010
- [2] LI, Yi a Minoru HASHIMOTO. Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2016, **239**, 26–44. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.01.017
- [3] TOKORO, H. a M. HASHIMOTO. Characteristics of a non-woven PVC gel actuator. In: *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* [online]. 2014, s. 100–105. Dostupné z: doi:10.1109/AIM.2014.6878062
- [4] ALI, Mohammad a Toshihiro HIRAI. Characteristics of the creep-induced bending deformation of a PVC gel actuator by an electric field. *Journal of Materials Science* [online]. 2011, **46**(24), 7681–7688. ISSN 0022-2461, 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-011-5746-7
- [5] HUNTER, I. W. a S. LAFONTAINE. A comparison of muscle with artificial actuators. In: *Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop: Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop* [online]. 1992, s. 178–185. Dostupné z: doi:10.1109/SOLSEN.1992.228297
- [6] KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3068-4.
- [7] *Svaly* [online]. [vid. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/151/05.html>
- [8] Enhanced Dynamic Model of Pneumatic Muscle Actuator with Elman Neural Network (PDF Download Available). *ResearchGate* [online]. [vid. 2017-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/274699128_Enhanced_Dynamic_Model_of_Pneumatic_Muscle_Actuator_with_Elman_Neural_Network
- [9] *catalogue main page* [online]. [vid. 2017-05-20]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products_010606
- [10] HUANG, W. On the selection of shape memory alloys for actuators. *Materials & Design* [online]. 2002, **23**(1), 11–19. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/S0261-3069(01)00039-5
- [11] *Hollow Core Linear Voice Coil Motors* [online]. [vid. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.moticont.com/hollow-voice-coil-motor.htm>
- [12] VLACH, Jan. *Elektrický umělý sval*. Praha, 2012. Bakalářská práce. ČVUT.
- [13] VLACH, Jan. *Aktuátory z dielektrických elastomerů*. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT.
- [14] XIA, Hong, Midori TAKASAKI a Toshihiro HIRAI. Actuation mechanism of plasticized PVC by electric field. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2010, **157**(2), 307–312. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2009.11.028
- [15] SHIBAGAKI, M., N. OGAWA a M. HASHIMOTO. Modeling of a contraction type PVC gel actuator. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* [online]. 2010, s. 1434–1439. Dostupné z: doi:10.1109/ROBIO.2010.5723540

- [16] OGAWA, N., M. HASHIMOTO, M. TAKASAKI a T. HIRAI. Characteristics evaluation of PVC gel actuators. In: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. 2009, s. 2898–2903. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2009.5354417
- [17] YAMANO, M., N. OGAWA, M. HASHIMOTO, M. TAKASAKI a T. HIRAI. A contraction type soft actuator using poly vinyl chloride gel. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* [online]. 2009, s. 745–750. Dostupné z: doi:10.1109/ROBIO.2009.4913093
- [18] *PVC_Gel_Artificial_Muscle* [online]. HashiLAB. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VqXuDhTj5J0>

Seznam příloh:

I. Tabulky naměřených hodnot

II. Tabulka komerčně prodávaných změkčovadel společnosti DEZA, a.s.

III. Informační listy ke změkčovadlu DOA a DIBA od společnosti DEZA, a.s.

IV. Informační list k PVC prášku

- CD s bakalářskou prací ve formátu PDF, s vybranými fotografiemi, videi a ostatními materiály použitými v této práci

I. Tabulky naměřených hodnot:

Tabulka 3: Naměřené hodnoty z měření kontrakce nezatíženého DOA gelu

napětí (V)	0	100	200	300	400	500	600
délka svalu (mm)	25,0	24,7	24,1	23,2	21,9	21,3	20,9
kontrakce (%)	0,0	0,9	3,6	7,3	12,2	14,7	16,1

Tabulka 4: Naměřené hodnoty z měření kontrakce zatíženého DOA gelu 60 g

napětí (V)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
délka svalu (mm)	23,5	23,5	23,4	23,2	23,0	22,8	22,1	21,8	21,3	20,9	20,7	20,8	20,8
kontrakce (%)	0,0	0,3	0,8	1,6	2,5	3,2	6,0	7,4	9,4	11,0	12,0	11,9	11,9

Tabulka 5: Naměřené hodnoty z měření kontrakce v závislosti na zatížení DOA gelu

zátěž (g)	0	20	100	200	500
délka při 0 V (mm)	25,3	24,4	23,0	22,8	21,5
délka při 550 V (mm)	21,0	21,1	20,7	21,0	20,8
kontrakce (%)	16,7	13,4	10,3	7,6	3,6

Tabulka 6: Naměřené hodnoty z měření proudu a síly nezatíženého DOA gelu

napětí (V)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
síla (N)	3,1	3,0	2,8	2,6	2,2	1,8	1,3	0,9	0,5	0,3	0,2	0,2
proud (μA)	0	1,4	2,1	2,8	3,6	4,6	5,9	7,6	9,7	12	15	20
σ (Nm^{-2})	1950	1894	1771	1617	1364	1117	808	537	321	197	148	117

Tabulka 7: Naměřené hodnoty z měření odezvy DOA gelu

délka stáhnutí (mm)	2,71
doba kontrakce (s)	0,18
doba relaxace (s)	3,94
průměrná rychlost kontrakce (mms^{-1})	15,06
průměrná rychlost relaxace (mms^{-1})	0,69

Tabulka 8: Naměřené hodnoty z měření kontrakce nezatíženého DIBA gelu

napětí (V)	0	100	200	300	350	400	450	500	550	600
délka svalu (mm)	11,2	10,9	10,3	9,9	9,7	9,6	9,5	9,4	9,3	9,2
kontrakce (%)	0	3	7	11	13	14	15	16	17	17

Tabulka 9: Naměřené hodnoty z měření kontrakce v závislosti na zatížení DIBA gelu

zátěž (g)	0	20	100	200	500
délka při 0 V (mm)	9,4	9,0	8,4	8,0	7,6
délka při 550 V (mm)	8,3	8,3	8,0	7,9	7,6
kontrakce (%)	11,8	7,8	4,2	2,0	0,0

Tabulka 10: Naměřené hodnoty z měření proudu a síly nezatíženého DIBA gelu

napětí (V)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
síla (N)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
proud (μA)	0	1,8	3,8	5,8	7,8	10	13	16	21	28	38	51
σ (Nm^{-2})	568	506	438	364	309	272	241	204	179	154	136	136

Tabulka 11: Naměřené hodnoty z měření odezvy DIBA gelu

délka stáhnutí (mm)	2,64
doba kontrakce (s)	0,14
doba relaxace (s)	2,99
průměrná rychlost kontrakce (mms^{-1})	18,86
průměrná rychlost relaxace (mms^{-1})	0,88

II. Tabulka komerčně dostupných změkčovadel společnosti DEZA, a.s.

Název, akronym	Číslo v CAS registru
Dioktyladipát, DOA	103-23-1
Diisobutyladipát, DIBA	141-04-8
Ftalanhydrid	85-44-9
Dimethylftalát	131-11-3
Dioktylftalát, DEHP	117-81-7
Dipropylheptylftalát, DPHP	53306-54-0
Dibutylftalát	84-74-2
Diisononylftalát, DINP	28553-12-0