



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

TESTOVÁNÍ POLYMERNÍCH PIEZOREZISTIVNÍCH MATERIÁLŮ PRO POUŽITÍ V TLAKOVÝCH SENZORECH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Janík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Čech, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Ing. Jan Janík

ID: 142588

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Testování polymerních piezorezistivních materiálů pro použití v tlakových senzorech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište piezorezistivitu a její druhy, prostudujte piezorezistivní materiály s důrazem na přehled polymerních kompozitních materiálů s piezorezistivními vlastnostmi. Provedte rešerši existujících piezorezistivních polymerních materiálů použitelných pro tlakové senzory a zjistěte jejich komerční dostupnost. Seznamte se s problematikou přípravy piezorezistivních a vodivých silikonových kompozitů. Podle zadání vedoucího práce připravte a otestujte silikonové kompozity.

Jako doplněk otestujte vodivost a odolnost vodivých nití, které budou použity pro vodivé cesty mezi piezorezistivními senzory.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Čech, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce má za cíl vybrat vhodné piezorezistivní a vodivé materiály pro výrobu tlakových senzorů použitých v oblasti e-textilií. Práce je rozdělena na praktickou a teoretickou část. Teoretická část přibližuje samotný piezorezistivní jev a vybrané kompozitní piezorezistivní materiály. Praktická část se zaměřuje na měření odporu a kapacity tlakových materiálů a senzorů při změnách jejich zatížení. Tato pasáž obsahuje též testování spolehlivosti využitých vodivých materiálů skrze proces zrychleného stárnutí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Piezorezistivita, odpor, tlak, vodivost, kompozitní materiál, elastomer

ABSTRACT

The aim of the bachelor's thesis is to choose convenient piezoresistive and conductive materials for pressure sensors in the field of e-textiles. Thesis is divided into practical and theoretical part. Theoretical part deals with piezoresistive effect itself and describes composite and piezoresistive materials. Practical part is focused on laboratory measuring resistance and capacitance of pressure materials and sensors in dependence on stress level. This part also includes practical reliability testings of conductive materials using accelerated aging testing methods.

KEYWORDS

Piezoresistivity, resistance, pressure, conductivity, composite material, elastomer

JANÍK, Jan. Testování polymerních piezorezistivních materiálů pro použití v tlakových senzorech. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127072>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ondřej Čech.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Jan Janík

VUT ID studenta: 142588

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Testování polymerních piezorezistivních materiálů pro použití v tlakových senzorech

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 7. června 2020

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Čechovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Úvod.....	9
1. Piezorezistivita	10
1.1 Historie.....	10
1.2 Princip	12
1.3 Využití.....	14
1.4 Kapacitní snímače tlaku	15
2. Materiály pro tlakové senzory	17
2.1 Velostat	17
2.2 Linqstat.....	18
2.3 Zoflex	19
2.4 EeonTex	20
2.5 Antistatická vodivá pěna	21
2.6 Kompozity na bázi silikonu	21
2.7 Elektricky vodivé hybridní nitě.....	22
2.8 Finanční a logistická dostupnost materiálů	24
3. Experimentální část	26
3.1 Cíl práce	26
3.2 Vzorky obsahující antistatickou vodivou pěnu	26
3.2.1 Vzorek A s antistatickou vodivou pěnou	27
3.2.2 Vzorek B s antistatickou vodivou pěnou	29
3.3 Vzorek s Velostatem	30
3.4 Vzorky se silikonem.....	32
3.4.1 Vzorek 1.....	33
3.4.2 Vzorek 2.....	35
3.4.3 Vzorky 3, 4-10 a 4-15	36
3.4.4 Vzorek 5.....	38
3.4.5 Vzorek 6.....	39
3.4.6 Vzorek 7.....	41
3.4.7 Vzorek M2	42

3.4.8	Zhodnocení silikonových vzorků.....	44
3.5	Sledování zrychleného stárnutí nerezové vodivé nitě.....	45
	Závěr.....	47
	Literatura.....	48
	Seznam grafů.....	51
	Seznam tabulek.....	52
	Seznam obrázků.....	53
	Seznam zkratk.....	53

ÚVOD

Piezorezistivita je jedním z nejrozšířenějších fyzikálních jevů využívaných v senzorových prvcích. Tyto senzory se používají k měření celé řady různých, zejména neelektrických veličin. Základní funkcí piezorezistoru je transformovat mechanické namáhání působící v určitém směru na odpovídající změnu jeho odporu. Tímto můžeme měřit sílu, tlak, zrychlení apod.

Moderní studie se snaží tento jev stále častěji využít v oblasti inteligentních technologií. Rozsah využití se rozšiřuje do mnoha oblastí od robotiky, kde nachází uplatnění jako řešení hmatového snímání pro integraci robotické ruky až po e-textil, kde dokáže měřit pohyb člověka, jak pro zdravotní, tak například výkonnostní důvody.

V rámci práce je hlavní pozornost upřena na kompozitní materiály založené na bázi elastomerů. Oproti polovodičovým látkám a kovům, zde dochází k piezorezistenci jiným způsobem. Piezorezistentní kompozity se staly pro výrobce atraktivní, jelikož kombinují jednoduchou a levnou přípravu s vysokou flexibilitou a přizpůsobivostí povrchům. Dále se vyznačují nízkou spotřebou energie a použitím jednoduché vyhodnocovací elektroniky.

Teoretická část práce se zabývá vysvětlením piezorezistivního jevu, historií tohoto jevu a současnému využití v technické praxi. Rovněž jsou popsány kapacitní snímače tlaku, které jsou alternativou k piezorezistivním přístrojům. Dále autor předkládá svůj průzkum trhu vhodných materiálů na výrobu snímače tlaku, kde mimo popisu jednotlivých kompozitních materiálů, taktéž řeší ceny a dostupnost.

Praktická část se věnuje testování funkčnosti a elektrických vlastností obdržených snímačů tlaku, které využívají kompozitní piezorezistivní materiály zmíněné v teoretické části práce. Dále jsou vytvořeny kompozitní materiály založené na silikonech, u nichž jsou také ověřeny jejich předpokládané vlastnosti. Autor testuje rovněž spolehlivost vodivých součástí skrze proces zrychleného stárnutí.

1. PIEZOREZISTIVITA

Piezorezistivním jevem rozumíme změnu elektrického odporu v látce způsobenou tlakem či mechanickým napětím. Zde je rozdíl oproti piezoelektrickému jevu, kde dochází ke změně elektrického potenciálu, ale odpor je stabilní. Mnoho materiálů vykazuje piezorezistivní vlastnosti, nicméně reálně se pro výrobu senzorů využívá pouze těch, které mají vysokou citlivost [1].

Obvyklou součástíou využívající tento jev jsou samozřejmě piezorezistory. Fyzikální vlastnosti piezorezistivity se uplatňují ve výrobě integrovaných odporových sítí, potenciometrů, převodníků a akcelerometrů. Zařízení vyrobená s piezorezistivních materiálů jsou již ze své podstaty využívána především pro měření tlaku [2].

Alternativu k piezorezistivním senzorům představují kapacitní senzory tlaku. Ty fungují na základě změny kapacity, která nastane v případě namáhání zařízení. Elektrody (desky kondenzátoru) v senzoru se k sobě pod vlivem tlaku přiblíží a tím změní hodnotu kapacity [3]. Pro lepší představu je v této kapitole tato varianta také přiblížena. Nicméně autor s ní již dále v rámci bakalářské práce nepracuje.

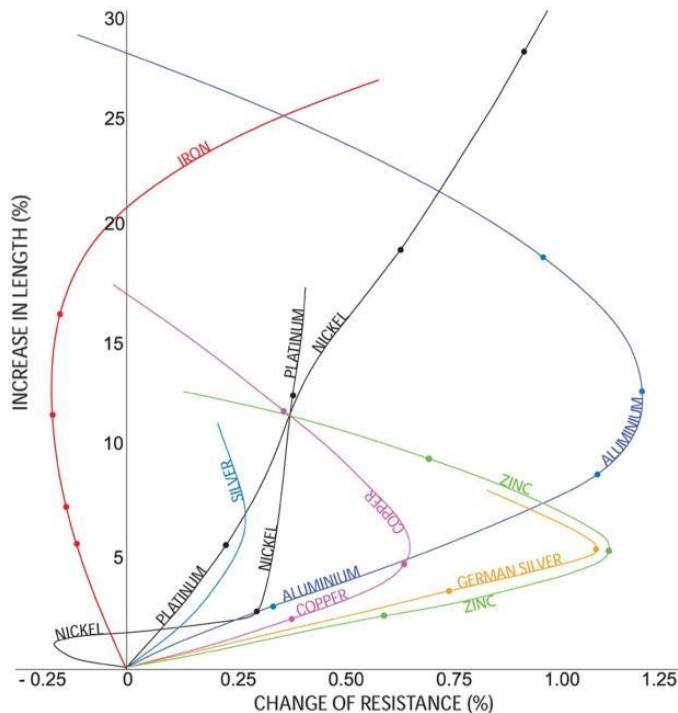
1.1 Historie

Piezorezistivní jev byl poprvé pozorován Williamem Thomsonem (známý jako lord Kelvin) v roce 1856. Ten zjistil změnu odporu u mechanicky zatíženého železa a mědi [4].

Pozorování tohoto fenoménu zpočátku vyžadovaly především telegrafní společnosti, kterým působily nemalé potíže změny vodivosti telegrafní sítě a změny v šíření signálu. Kelvin na jedné ze svých přednášek prezentoval svůj experiment, v rámci něhož paralelně natáhl železný a měděný drát a ty zatížil. Změny odporu následně měřil modifikovaným Wheatstoneovým můstkem. Jelikož bylo prodloužení obou drátů stejné, tak Kelvin určil, že efekt skutečně závisí na jejich vodivosti. Toto zjištění bylo s ohledem na přesnost tehdejších přístrojů pozoruhodné [5].

Z práce lorda Kelvina dále vycházel H. Tomlinson. Ten potvrdil, že deformace některých materiálů vede ke změně jejich vodivosti. Provedl měření kovů při rozdílných orientacích mechanického zatížení a za různého elektrického proudu. Níže vidíme výsledky Tomlinsonova měření pro různé látky [6].

Graf 1: Změny odporu v kovech vyvolané tlakem kladiva [7]



Metody měření byly nadále vylepšovány a aplikovány na další polykrystalické a amorfni vodiče. V roce 1938 Edward E. Simmons a Arthur C. Ruge vynalezli nejběžnější typ tenzometru, který slouží k nepřímému měření mechanického napětí na povrchu součástky skrze měření její deformace. Na začátku 50. let Bardeen a Shockley predikovali relativně velké změny vodivosti za deformace v monokrystalických polovodičích. To následně potvrdil v roce 1954 ve své knize C. S. Smith, který objevil velký piezorezistivní účinek v křemíku a germaniu [5].

O tři roky později Mason a Thurston vynalezli první křemíkové tenzometry pro měření posuvu, síly a točivého momentu. Polovodičové tenzometry nabídlly citlivost více než padesátkrát větší oproti konvenčním tenzometrům z kovu. To bylo považováno za velký skok v technologii snímání. V roce 1960 existovali ve Spojených státech již nejméně dva komerční výrobci křemíkových tenzometrů [5].

Technologický pokrok do dnešních dní umožnil další značný posun při výrobě piezorezistivních snímačů. Moderní výroba integrovaných obvodů nám nabízí významné posun v citlivosti piezorezistivních zařízení, rozlišení, šířky pásma a jejich celkové miniaturizace [5].

Pojem piezorezistence byl prvně použit Johnem W. Cooksonem v roce 1935. Definoval jej jako rozdíl vodivosti při mechanickém zatížení odlišnou od celkové zlomkové změny odporu. Termín „piezo“ má kořeny ve slově „piezen“, které v řečtině znamená stisk. Velmi podobný pojem je piezoelektrický jev, z něhož při vzniku slova Cookson

vycházel. Nicméně ačkoliv zní podobně, tak se jedná o rozdílný efekt, kdy deformací je v látce generován náboj [8].

1.2 Princip

Jak již bylo výše zmíněno, tak piezorezistivita je jev, při kterém mechanicky namáhaný materiál mění své odporové vlastnosti. Ačkoliv byl prvně efekt pozorován a měřen u kovů, tak postupem let bylo odhaleno, že několikanásobně vyšší účinek má u polovodičových materiálů či kompozitních materiálů na bázi elastomerů. Nicméně způsob, jakým dochází ke změně odporu, se u nich liší.

Teorie **polovodičové piezorezistence** se zabývá popisem transportu elektronů a děr v krystalických strukturách, kdy se při mechanickém napětí mění pásová struktura materiálu. Pohyblivost a efektivní hmotnost nosičů náboje se od sebe výrazně liší a pod napětím kolísají. Piezorezistory typu N a P vykazují opačné trendy ve změně odporu a dosahují různých velikostí v závislosti na velikosti deformační síly. Velikost a známky piezorezistivních koeficientů závisí na řadě faktorů včetně koncentrace nečistot, teplotě, jakož i na vztahu proudu, napětí a mechanickém zatížení k sobě navzájem a krystalografickým osám. Obecně lze říct, že silové napětí usnadňuje či naopak ztěžuje přesun elektronů do vodivostního pásu. Následkem toho se změní množství volných nosičů náboje, což ovlivní celkový odpor dané látky [5].

Odpor R je závislý na rezistivitě ρ , délce l ve směru měření odporu a průřezovou plochou A kolmou ke směru měření odporu:

$$R = \rho l / A \quad (1.1)$$

Dílní změna odporu je dána rovnicí:

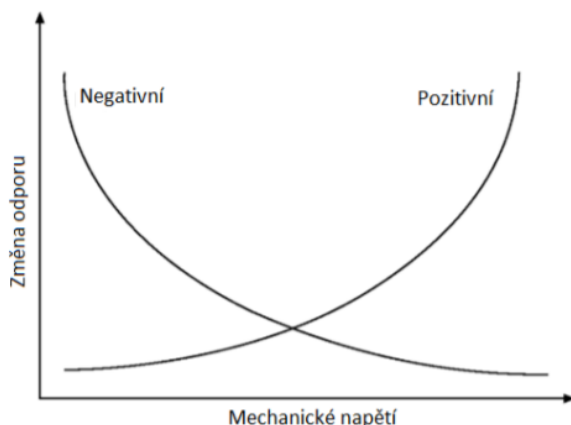
$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta \rho}{\rho} + \left(\frac{\delta l}{l}\right) (1 - \nu_{12} - \nu_{13}) \quad (1.2)$$

kde ν_{12} a ν_{13} jsou hodnoty Poissonovy konstanty, což je poměr příčného zkrácení k podélnému protažení.

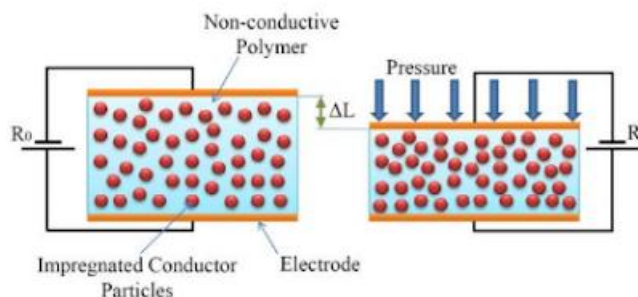
Můžeme pozorovat dva typy piezorezistivity. **Pozitivní** piezorezistivita označuje chování, při kterém se odpor zvyšuje se zvyšujícím se tlakem, tj. $\left(\frac{\delta p}{p}\right) / \left(\frac{\delta l}{l}\right) > 0$.

Negativní piezorezistivita označuje chování, ve kterém se odpor se snižujícím se mechanickým napětím snižuje, tj. $\left(\frac{\delta p}{p}\right) / \left(\frac{\delta l}{l}\right) < 0$. Piezorezistivita je obvykle pozitivní, protože protažení má tendenci měnit mikrostrukturu takovým způsobem, že se odpor ve směru protažení zvětšuje [9].

Graf 2: Závislost odporu na tlaku u piezorezistivních látek [10]



Polymerní kompozity oproti polovodičům a kovům získávají svou piezorezistivní vlastnost skrze rozdílnost složek, ze kterých jsou vytvořeny. Polovodivé polymerní kompozity se skládají z impregnovaných vodivých nanočástic uvnitř struktury nevodivého materiálu. Vodivé částice nebo plniva jsou náhodně rozptýleny uvnitř struktury nevodivé látky. Elektronů mohou přeskakovat z jedné částice na druhou tunelováním čili vytvářením polovodivých cest v látce. Materiál tedy vykazuje určitý stupeň elektrické rezistivity. Když je materiál stlačen, vzdálenost mezi těmito vodivými částicemi se zmenšuje, čímž se zvyšuje počet vodivých cest a mění se jejich prostorové rozložení. To vede ke změně elektrického odporu a vodivosti. Tuto situaci názorně vykresluje obr. 1. [11].



Obrázek 1: Piezorezistivní jev v polymerním kompozitu [11]

Při použití mechanické síly je zřetelný rozdíl ve vzdálenostech mezi vodivými částicemi. Tímto přiblížením narůstá vodivost a snižuje se odpor celého materiálu. Dle grafu 2 můžeme tedy určit, že u polovodičového kompozitu na bázi elastomerů dochází k negativní piezorezistivitě.

1.3 Využití

V praxi se využívají především piezorezistivní účinky polovodičů a elastomerů. Nejčastěji používaným piezorezistivním polovodičem je křemík. Ten lze použít v samotný senzor a taktéž jako součást elektrického rozhraní integrovaného k senzoru. Elastomery mohou získat piezorezistentní vlastnosti různými způsoby zpracování, například přidáním vodivých částic k nevodivému elastickému materiálu. Nejčastější využívanou součástí je piezorezistor [1].

Piezorezistory jsou široce využívány u tlakových, silových a inerciálních senzorů. Vnější síla vytváří prohnutí nebo natažení úměrné měřené veličině a piezorezistence se mění úměrně s použitým mechanickým napětím. Měření namáhání je důležité v mnoha aplikacích ve vědě a strojírenství [5].

Již od konce 50. let se využívá piezorezistivního jevu v **tenzometrech**. Tyto polovodičové tenzometry první generace byly použity pro měření velikosti namáhání. Měřidla byla organicky připojena ke kovovým ohybovým prvkům, aby se tak vytvořily tlakové senzory, snímače tlaku či akcelerometry [5]. V současnosti můžeme říct, že se jedná o pasivní čidla nalepená na povrchu součástky nebo pevně spojená s tělesem. Polovodičový tenzometr slouží jako převodník, jenž převádí mechanické prodloužení nebo posunutí vyvolané silou na odpovídající změnu odporu [12].

Piezorezistivní tlakové senzory jsou využívány především pro svou vysokou citlivost a linearitu. Staly se jedněmi z prvních MEMS (mikro-elektrické mechanické systémy) zařízení, která přišla na trh. Našly uplatnění v různorodé škále průmyslových odvětví jakožto prostředek měření tlaku. Biomedicína tyto senzory využívá jako nástroje k měření krevního tlaku, automobilový průmysl k měření hladiny oleje a plynu v motorech automobilů [13].

U piezorezistivního tlakového senzoru je piezorezistor zpravidla implementován na povrch tenké křemíkové membrány. Působením mechanického napětí se membrána deformuje, což ovlivňuje pohyblivost nosičů a výsledné naměřené hodnoty [13].

Další využití najdeme u výroby akcelerometrů. **Akcelerometr** je elektromechanické zařízení používané k měření akceleračních sil. Takové síly mohou být statické, jako je nepřetržitá gravitační síla nebo, jak je tomu u mnoha mobilních zařízení, dynamické snímání pohybu nebo vibrací [14].

Akcelerometry využívající piezorezistivní efekt jsou zařízení určená především pro

vysokofrekvenční šoková měření. Oproti piezoelektrickým protějškům je výhoda, že dokážou měřit až k úrovni 0 Hz. Tato schopnost měřit velmi nízké frekvence dovoluje zařízení poskytovat velmi přesné statické měření zrychlení. Tyto akcelerometry se často používají při analýze nárazů a vibrací v automobilovém průmyslu. Konkrétněji při zkouškách bezpečnosti včetně airbagů a testech protiblokovacích brzdových systémů [13].

1.4 Kapacitní snímače tlaku

Alternativou k piezorezistivním snímačům mohou být kapacitní snímače tlaku. Kapacitní tlakové senzory zpravidla používají systém s tenkou membránou, která zde tvoří jednu desku kondenzátoru. Způsobený stres zapříčiní vychýlení membrány, což vede ke změně kapacity. Změna dosahuje řádově několika jednotek pF. Změna kapacity může být použita k řízení frekvence oscilátoru nebo ke změně vazby střídavého signálu přes síť [15].

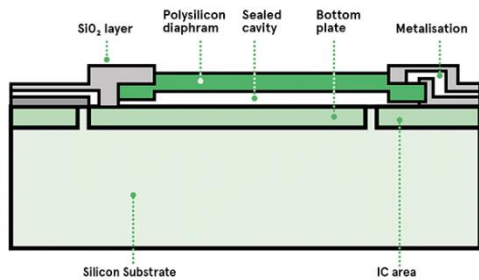
Tento jev matematicky popisuje následující rovnice.

$$C = \epsilon_r \times \epsilon_0 \times \frac{S}{l} \quad (1.3)$$

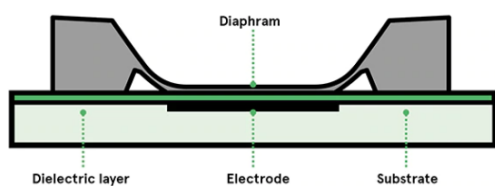
Písmeno l zde označuje vzdálenost mezi deskami kondenzátoru a S jejich plochu. Při tlaku se tedy tyto desky přiblíží, což má za následek zvýšení konečné hodnoty [16].

Výhodu kapacitních senzorů spatřujeme v tom, že jsou schopné pracovat v širokém teplotním i tlakovém rozsahu. Mohou být použity pro měření od vakua (250 Pa) až po vysoké tlaky (70 MPa). Jsou ideální jak pro aplikace s nízkým tlakem, tak i pro poměrně drsné prostředí s vyššími hodnotami mechanického namáhání. Jsou vhodné pro přenositelné nebo implantované zdravotnické prostředky. Jelikož se jedná o zařízení na střídavý proud, jsou kapacitní senzory vhodné pro bezdrátové aplikace [15].

Nevýhodou je robustnost, která je nezbytná, aby se získal dostatečný signál. To snižuje možnosti využití v některých aplikacích. Další z nevýhod kapacitních senzorů je jejich nelinearita, protože výstup je nepřímě úměrný mezeře mezi paralelními elektrodami. To lze zlepšit použitím senzoru v dotykovém režimu, kde je membrána v kontaktu s izolační vrstvou na spodní elektrodě. To však může snížit citlivost a zvýšit hysterezi. Jsou rovněž citlivé na vibrace. Navíc je nutné minimalizovat parazitní kapacitu tím, že je elektronika snímače umístěna co nejbližší senzoru [15].



Obrázek 2: Průřez konstrukcí kapacitního senzoru [17]



Obrázek 3: Kapacitní senzor v dotykovém režimu [17]

2. MATERIÁLY PRO TLAKOVÉ SENZORY

Tato kapitola se zabývá rešerší materiálů vyznačující se změnou vodivosti při rozdílném zatížení tlakem. Tyto materiály svými vlastnostmi mají potenciál využitelnosti uvnitř tlakových senzorů, které by řešily problematiku měření v rámci e- textilu či do inteligentních matrací na sledování rozložení hmotnosti lidského těla. Kapitola se také zabývá elektricky vodivými hybridními nitěmi, které jsou důležité pro vytváření vodivých cest pro tlakové senzory v rámci textilií, jako jsou matrace či různé druhy oblečení.

2.1 Velostat

Jedná se o vodivý materiál s piezorezistivními účinky při mechanické deformaci. V případě jeho vložení mezi dvě vodivé vrstvy nabízí značný rozsah změny odporu pro výrobu snímačů tlaku, ohybu či snímání polohy. Další využití nalezneme jako ochranný prvek pro zařízení, které jsou náchylné k poškození elektrostatickým výbojem. Velostat je obchodní název pro materiál vytvořený americkou firmou 3M, nicméně ta ho již v současnosti nevyrábí [18].

Vzhledem ke svým vlastnostem se tento materiál v posledních letech stal oblíbeným u domácích kutilů pro výrobu levných tlakových senzorů pro experimenty s mikrokontrolery. Jako příklad se dá uvést rozšířený experiment s obuví, která se při došlápnutí rozsvítí. Senzor změnou odporu pozná, kdy je aplikován tlak hmotnosti lidského těla a kdy je bota zvednuta nad zem. Dle toho ovládá světlo na botách [19].

Jedná se o uhlíkem (sazemi) impregnovaný polyolefin. Má černou barvu, je neprůhledný a objemově vodivý. Jeho elektrické vlastnosti nejsou ovlivněny stářím ani vlhkostí. Tlakem na jeho povrch se snižuje jeho odpor. Materiál se vyznačuje vysokou chemickou odolností [20].

Velostat se nejčastěji prodává ve formě piezorezistivního vodivého filmu. V objemovém klidu má odpor menší než 500 ohmů na cm, typickou tloušťku 104 μm , ohybové moduly v rozsahu 275 000 – 350 000 kPa (tendence materiálu odolat ohybu) a pevnost v tahu 11,7 – 13,8 N/mm². Nejčastěji se prodávají ve tvaru čtvercové filmu o rozměrech cca 30 x 30 cm [21].



Obrázek 4: Velostat / Linqstat [19]

2.2 Linqstat

Linqstat je alternativou k dříve zmíněnému Velostatu. Obchodní značka tohoto materiálu spadá pod kanadskou společnost Caplinq Corporation. Linqstat je téměř totožný ekvivalent uhlíkově impregnovaného černého polyethylenového filmu o velmi podobných vlastnostech. Firma Caplinq jako generická značka při srovnání s Velostatem uvádí snahu o dosažení stejné kvality za nižší pořizovací náklady pro konečného zákazníka [22].

Caplinq nabízí Linqstat v několika provedeních s vysokou úrovní vodivosti, střední úrovní vodivosti a s nízkou vodivostí / antistatické.

Tabulka 1: Škála sortimentu Linqstat od společnosti Caplinq [23]

ANTISTATICKÉ A NÍZKOVODIVOSTNÍ

POPIS PRODUKTU	POVRCHOVÝ ODPOR	TLOUŠŤKA	OBJEMOVÝ ODPOR
Linqstat VCF Series			
VCF-25200K	<200.000 ohmů / čtverec	0.05mm (2 mil)	Bez objemové vodivosti
VCF-45200K	<200.000 ohmů / čtverec	0.1mm (4 mil)	Bez objemové vodivosti
VCF-85200K	<200.000 ohmů / čtverec	0.2mm (8 mil)	Bez objemové vodivosti
VCF-35100K	<100.000 ohmů / čtverec	0.075mm (3 mil)	Bez objemové vodivosti
VCF-45100K			
Linqtape Antistatické pásky a filmy			
PIT1S-ESD/PIT1A-ESD (Antistatická polyimidová páska)	N/A	0.025mm (1 mil)	2.500.000.000 ohmů

STŘEDNÍ VODIVOST

POPIS PRODUKTU	POVRCHOVÝ ODPOR	TLOUŠŤKA	OBJEMOVÝ ODPOR
Linqstat MVCF Series			
MVCF-8S50K	<50.000 ohmů / čtverec	0.2mm (8 mil)	2.000 ohmů
MVCF-4S50K	<50.000 ohmů / čtverec	0.1mm (4 mil)	800 ohmů
MVCF-8S10K	<10.000 ohmů / čtverec	0.2mm (8 mil)	Bez objemové vodivosti

VYSOKOVODIVOSTNÍ

POPIS PRODUKTU	POVRCHOVÝ ODPOR	TLOUŠŤKA	OBJEMOVÝ ODPOR
Linqstat XVCF Series			
XVCF-4S500	<500.000 ohmů / čtverec	0.1mm (4 mil)	100 ohmů
XVCF-3S500	<500.000 ohmů / čtverec	0.075mm (3 mil)	50 ohmů
XVCF-3.5S200	<200.000 ohmů / čtverec	0.089mm (3.5 mil)	25 ohmů
XVCF 150 a nižší			
Linqtape Antistatické pásky a filmy			
PIT1N-ALUM	>3 ohmů / čtverec	0.025mm (1 mil)	N/A
CFT1CA (měděná páska)	>1.5 ohmů / čtverec	0.035mm (1.4 mil)	N/A
AFT2CA (Hliníková páska)	>3 ohmů / čtverec	0.05mm (2 mil)	N/A

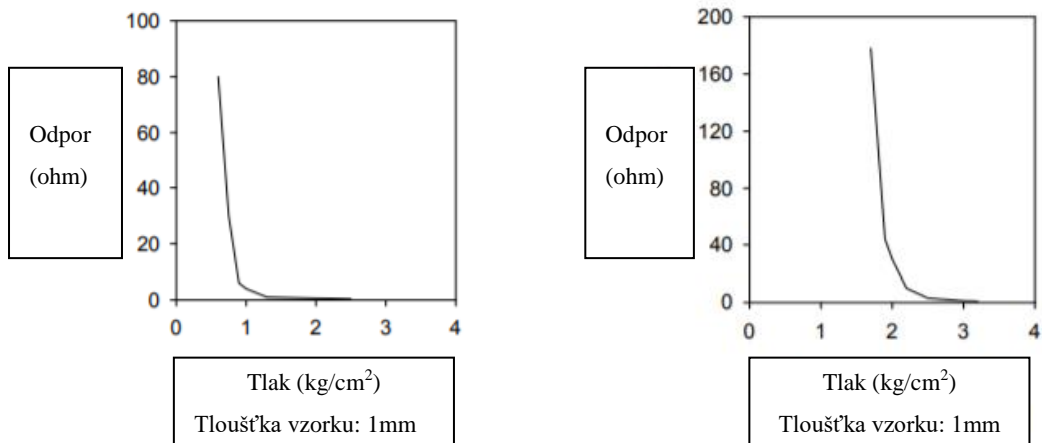
2.3 Zoflex

Zoflex je vodivý gumový materiál citlivý na tlak vyráběn stejnojmennou irskou společností. Využívá se ve výrobě tlakových senzorů, vodivých gumových klávesnic a mechanických tlakových spínačů [25].

Zoflex nabízí dva různé druhy odporových gumových materiálů (ZL45.1 a ZL60.1). První z nich je křehčí a při roztažení se roztrhne, druhý je odolnější. Tyto materiály jsou v normálním stavu (bez tlaku) vysoce rezistivní. Nicméně při aplikaci aktivačního tlaku jejich odpor znatelně klesá. V normálním stavu prodávané listy mají odpor větší než 30

MΩ. Při zatížení materiálu, ale odpor může klesnout až pod 0,1 Ω [25].

Graf 3: Závislosti odporu na tlaku pro Zoflex ZL45.1 a ZL60.1 [25]



2.4 EeonTex

Tento materiál je vysoce vodivý. Skládá se z netkaných mikrovláken s piezorezistivní funkcí pro použití v dynamických senzorech pro mapování a měření tlaku, ohybu a kroucení. Tkanina se využívá především v oblasti e-textilu [25].

EeonTex byl vyvinut a je vyráběn americkou firmou Eeonyx. Ta se i u jiných svých produktů zaměřuje na oblast e-textilu, kdy nabízí tkaniny různých vodivostí a vlastností [25].



Obrázek 5: EeonTex piezorezistivní materiál [25]

2.5 Antistatická vodivá pěna

Dalším materiálem, který je možno využít pro výrobu tlakových senzorů jsou antistatické vodivé pěny. Klasickým zástupcem jsou polyuretanové pěny obohacené o grafitový prášek.

Polyuretanové pěny se vyznačují nízkou hustotou, vysokou měrnou pevností a dobrou odolností vůči nárazům. Mají široké využití od podrážek, stavebního materiálu po obalový materiál pro elektronické zařízení a součástky [26].

Vodivá pěna v senzoru nevyužívá klasický piezorezistivní efekt. Naproti tomu využívá toho, že při tlaku se částice grafitu přiblíží blíže k sobě a začnou vytvářet nové vodivé cesty skrze materiál. Tyto vodivé trasy svým vznikem sníží odpor pěnového kusu [26].



Obrázek 6: Antistatická vodivá pěna [27]

2.6 Kompozity na bázi silikonu

Další z alternativ pro výrobu piezorezistivních a kapacitních senzorů využitelných v nositelné elektronice je využití kompozitních materiálů založených na silikonech. Oproti kovovým fóliím a polovodičům zavedených v běžných senzorech mají silikony mnohem lepší vlastnosti pro využití v kontaktu s lidským tělem. Oproti zmíněným netrpí křehkostí a jsou velmi dobře roztažitelné [31].

Kompozity podobně jako předchozí materiály vycházejí nejčastěji z obohacení základního materiálu o uhlík (například ve formě grafitu), který vytváří vodivé cesty. Při zatížení senzoru se vytvoří nové vodivé cesty a přiblíží se desky kondenzátoru, čímž měříme změny tlaku. Rešerší aktuálních studií na toto téma se jako vhodný silikon jeví produkt EcoflexTM 00-30. Vytvrzený finální silikon dovoluje roztažitelnost přesahující

hranici 100% původního rozměru a přitom nemění svou konzistenci i po více než 1000 cyklech, což zaručuje dobrou opakovatelnost měření [31], [32], [33].

Polymerová řada Ecoflex™ je vyráběna americkou společností Smooth-On, Inc. Jedná se o silikony katalyzované platinou, které jsou univerzální a snadno se používají. Výroba spočívá ve smíchání dvou složek v poměru 1A:1B. Vytvrzují se při pokojové teplotě se zanedbatelným smrštěním. Výsledný produkt bez barvení či přidání dalších látek má průhlednou barvu. Nízká viskozita zajišťuje snadné míchání a odvzdušňování. Vytvrzený silikon je velmi měkký, silný a „pružný“. Další výhodou je jeho bezpečnost pro kůži a šetrnost k životnímu prostředí pro svou odolnost proti vodě. Ecoflex™ je možno zakoupit v pěti různých variantách s různou hodnotou viskozity a pevností výsledného silikonu [34], [35].



Obrázek 7: Ecoflex [35]

2.7 Elektricky vodivé hybridní nitě

Pro výrobu produktů jakou jsou matrace s tlakovými senzory, je zapotřebí najít vhodný materiál pro strukturu vodivých cest. Těmi se v poslední době stávají právě elektricky vodivé nitě. Dále se budeme zabývat hybridními a nerezovými nitěmi.

Technologie pro výrobu **elektricky vodivých hybridních nití** nám dovoluje vytvářet různé typy nití s rozdílnými počty elementárních ultra jemných kovových vláken, které se kombinují se syntetickými filamenti (polyester, polyamid atd.). U výrobců je možné si nechat vyrobit hybridní nit' na míru dle potřeby konkrétní aplikace. Rovněž je možno použít takovou kombinaci materiálů, která by splňovala určité požadavky, které dané použití vyžaduje (nehořlavé aplikace, určitá barva, stupeň vodivosti apod.) [28].

Nitě vykazují dobré elektrické vlastnosti a to především nízký lineární odpor v Ω/m .

Samozřejmostí jsou dostatečně dobré mechanicko-fyzikální vlastnosti a kompatibilita s výrobními postupy, které se běžně využívají při výrobě textilu. Mezi tyto postupy můžeme zařadit šití, tkaní, pletení, vyšívání vodivých cest do textilu, obvodů, tetrod, vyhřívacích a propojovacích struktur atd. Důležitým parametrem při využití vodivých nití při výrobě textilií je jejich zdravotní nezávadnost pro člověka. Vodivé nitě se využívají především v oblasti e-textilu, kde se z něj vyrábějí vodivé dráhy, tetrody, senzory a další. Rovněž je možné z nich vytvářet tzv. vodivé antény [28].

Výrobou těchto nití se již aktuálně zabývá mnoho firem po celém světě. Nejvíce různých výrobců můžeme najít v USA, nicméně i v Česku existuje značka e-textilu a výroby vodivých nití CleverTex® patřící pod společnost VÚB, a.s. z Ústí nad Orlicí [29].



Obrázek 8: Ukázka vodivých nití od společnosti VÚB, a.s. [28]

Tabulka 2: Technický list pro sortiment vodivých nití značky CleverTex® [29]

Data sheet (v nominálních hodnotách)

Obchodní název	Materiálové složení	Jemnost vlákna [tex]	Lineární odpor [Ω/m]	Pevnost za sucha [cN/tex]	Prodloužení za sucha [%]
Hi-COND FR art.45	Vlákno z viskozního hedvábí FR / mosaz	54	14.80	11.11	8.92
Hi-COND FR art.47	M-aramid /mosaz	170	15.70	15.64	29.72
Hi-COND FR art.49	Polyoxadiazol / mosaz	93	14.80	26.29	10.07
Hi-COND FR art.56	Polyoxadiazol / nerezová ocel	71	2590.00	32.35	15.44

Obchodní název	Materiálové složení	Jemnost vlákna [tex]	Lineární odpor [Ω/m]	Pevnost za sucha [cN/tex]	Prodloužení za sucha [%]
Hi-COND Stainless art.7A	PES multifilament / nerezová ocel	38	2420.20	53.11	14.39
Hi-COND Stainless art.51	PES multifilament / nerezová ocel	41	1158.40	49.59	12.54
Hi-COND Stainless art.52	PES multifilament / nerezová ocel	44	779.00	50.55	14.74

Obchodní název	Materiálové složení	Jemnost vlákna [tex]	Lineární odpor [Ω/m]	Pevnost za sucha [cN/tex]	Prodloužení za sucha [%]
Hi-COND CA art.54	PES multifilament / postříbřená měď	38	8.60	30.72	12.73
Hi-COND CA art.53	PES multifilament / postříbřená měď	50	6.50	31.59	14.08

Pro oblast e-textilu jsou v současnosti velmi využívané i **nerezové nitě**. Jsou pevné, tenké a hladké. Můžou mít odpor pouhých několik desítek Ω/m . Samozřejmostí je jejich využitelnost ve všech výrobních postupech. Výhodu lze spatřovat v tom, že oproti jiným kovům nerez neoxiduje, což by daný textil mělo ochránit při praní. Nevýhodou je vyšší cena. Taktéž jako záporný faktor lze označit i neexistenci tuzemského výrobce [29].

2.8 Finanční a logistická dostupnost materiálů

Z předchozích kapitol lze vyčíst, že nalezené materiály jsou vyvíjeny a vyráběny především zahraničními subjekty a to nejčastěji z USA. Proto při úvahách nad využitelností jednotlivých řešení pro budoucí měření rozložení hmotnosti na matraci je také důležité zjistit možnosti, za jakých lze tyto materiály získat. Tento aspekt ovlivňuje

i realizační fázi práce v otázce získávání vzorků pro zkušební měření.

Nejsnadnější se jeví získávání vodivých nití pro potřeby vodivých cest. Výrobce je po světě relativně velké množství. Dokonce i v ČR nalezneme jeden subjekt, který poskytuje předpoklad pro rychlejší a pružnější dodávky zboží. Taktéž výrobce VÚB, a.s. propaguje možnost výroby na zakázku dle přání zákazníků.

Nižší dostupnost je u vodivých materiálů Velostat, Linqstat, Zoflex, EeonTex a vodivých pěn obohacených o grafitový prášek. V České republice dle autora hledání neexistuje subjekt, který by tyto materiály ve velkém prodával či je držel na našem území skladem k prodeji. Proto je nutné prověřit zahraniční výrobce, prodejce a jejich e-shopy pro získání informací o cenách, dodacích lhůtách a zemích odeslání, jak shrnuje tabulka 3.

Tabulka 3: Dostupnost materiálů

Materiál	Cena	Rozměry	Stát	Dodavatel
Velostat	110-90 Kč	28x28cm, tloušťka 0,1mm	USA	Adafruit
Velostat	560 Kč	100x91cm, tloušťka 0,1mm	Čína	Ebay
LINQSTAT XVCF	2000-800 Kč	4600x30cm, tloušťka 0,1mm	Nizozemsko	Caplinq
Zoflex	1 980 Kč	30,5x30,5cm, tloušťka 0,5mm	Irsko	Zoflex
Eeontex	xxx	xxx	USA	Eeonyx

Velostat je v současné době možno nechat dodat od více dodavatelů, kteří nahradili původního vynálezce a držitele ochranné známky 3M. Známá je americká společnost Adafruit, která nabízí širokou škálu různých jiných materiálů pro výrobu elektroniky. Druhou možností jsou asijské výrobce. Při srovnání je vidět, že při nákupu je cenově výhodnější východní varianta nákupu. Logistický čas a náklady by zde, jak pro Čínu, tak USA měly být podobné.

Linqstat je produkován firmou Caplinq sídlící v Kanadě. Avšak tato firma má pro naši oblast logistické centrum v Nizozemí. Nevýhodou je, že své produkty prodává jen v relativně velkém množství, což znemožňuje reálný nákup pro testování.

Materiál Zoflex se při srovnání s ostatními jeví velmi drazé. Výrobce má velmi zastarale vypadající stránky, kde nemá příliš informací o sobě ani o materiálu.

Cenu Eeontex se autorovi nepodařilo zjistit. Firma funguje pouze na B2B trhu pro zákazníky, kteří poptávají velké množství materiálu. Což opět znemožňuje praktické využití při testování.

Z výše uvedeného vyplývá, jako nejvhodnější materiál pro testování Velostat, který autor doplní antistatickými pěny.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

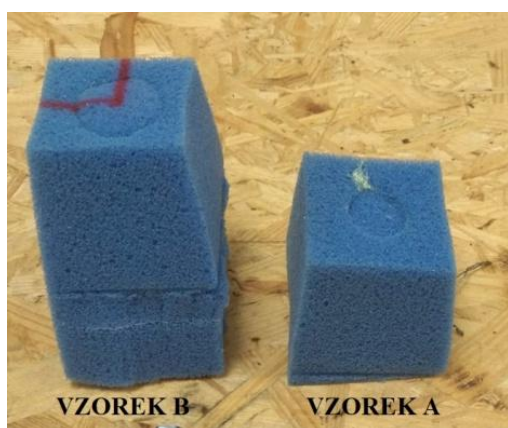
V rámci experimentální části byla provedena měření vytvořených vzorků obsahující materiály s velkou vodivostní citlivostí na změnu tlaku, které byly představeny v předchozí kapitole. Mimo hodnoty paralelního odporu R_p vzorku byla také měřena změna paralelní kapacity C_p .

3.1 Cíl práce

Cílem práce je ověření vhodných elektrických vlastností vybraných látek a potvrzení jejich dostatečné spolehlivosti pro aplikaci v e-textilu skrze proces zrychleného stárnutí. Měření budou probíhat na vzorcích dodaných vedoucím této práce a silikonových kompozitech vytvořených autorem práce. Na základě výsledků měření bude zhodnocena vhodnost použití sledovaných materiálů pro další aplikace.

3.2 Vzorky obsahující antistatickou vodivou pěnu

Prvním typem vzorku pro zkoumání piezorezistivních vlastností byly části polyuretanové matrace, uvnitř nichž byla zakomponována antistatická vodivá pěna obohacená o grafitové částice. Vzorky byly dva o různých velikostech a jiném průměru vnitřní vložení části. Měření probíhalo tak, že byly vzorky jednotlivě uloženy na váhu a společně s ní se vložily do svěraku. Přiblížením čelistí se vzorek stlačil a na váze se naměřily hodnoty, které byly využity pro výrobu grafů. Vzorky byly označeny písmeny A a B, jak ukazuje obr. 8. Největší rozdíl mezi vzorky je v objemu vodivé pěny uvnitř nich. U vzorku A se jedná o válec o tloušťce 5mm a průměru 16 mm. Vzorek B obsahuje vodivou pěnu o stejné tloušťce 5 mm, ale o průměru 20 mm.



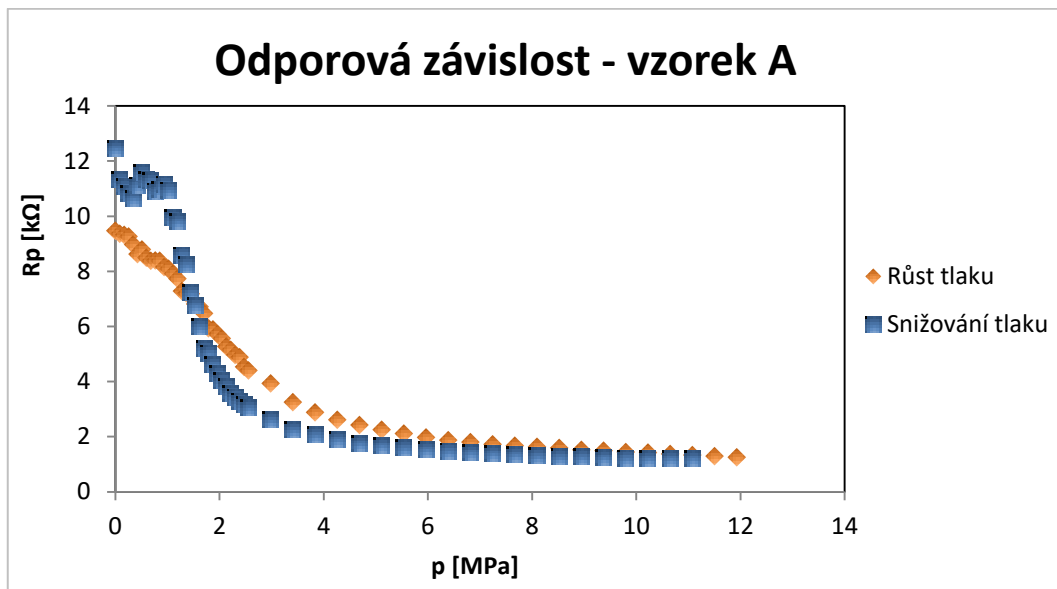
Obrázek 9: Vzorky s antistatickou pěnou

3.2.1 Vzorek A s antistatickou vodivou pěnou

Na níže zobrazených grafech měření můžeme vidět negativné piezorezistivní efekt antistatické vodivé pěny obohacené o grafit. K prudké změně odporu dochází především v počátku zatěžovacího procesu do hodnoty cca 2 kPa.

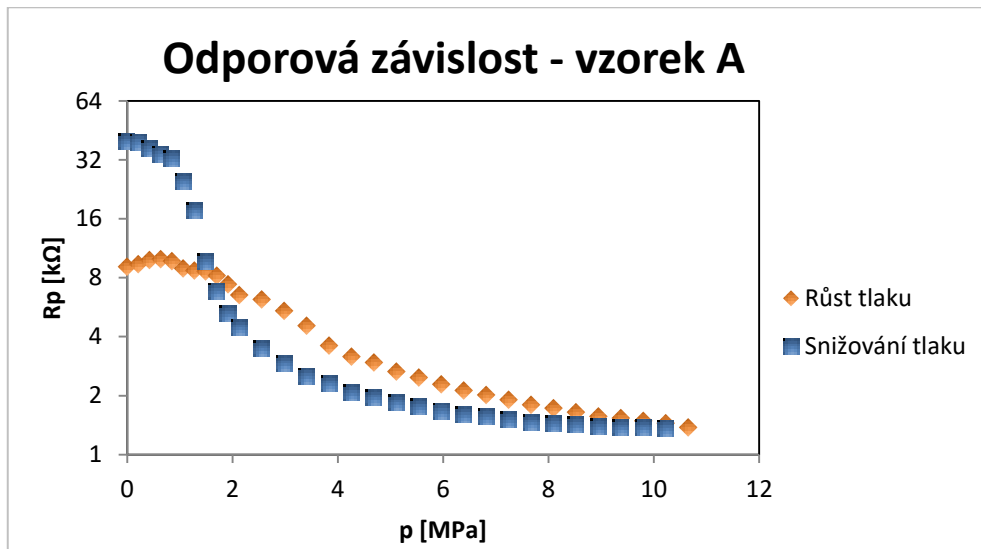
Odpor ve fázi růstu a snižování není příliš odlišný nicméně je vidět, že má pěna určitý paměťový efekt, který jí ve fázi růstu nutí tlačít proti namáhání a při fázi snižování tlaku držet svůj tvar. Z toho důvodu je u většiny hodnot grafu odpor větší při fázi růstu tlaku. U hodnot pod 2 kPa nestává opačná situace, která je způsobena tím, že vodivá pěna v důsledku paměťového efektu nemá dostatečný kontakt s elektrodami, mezi které je vložena.

Graf 4: 1. měření změny odporu vzorku A



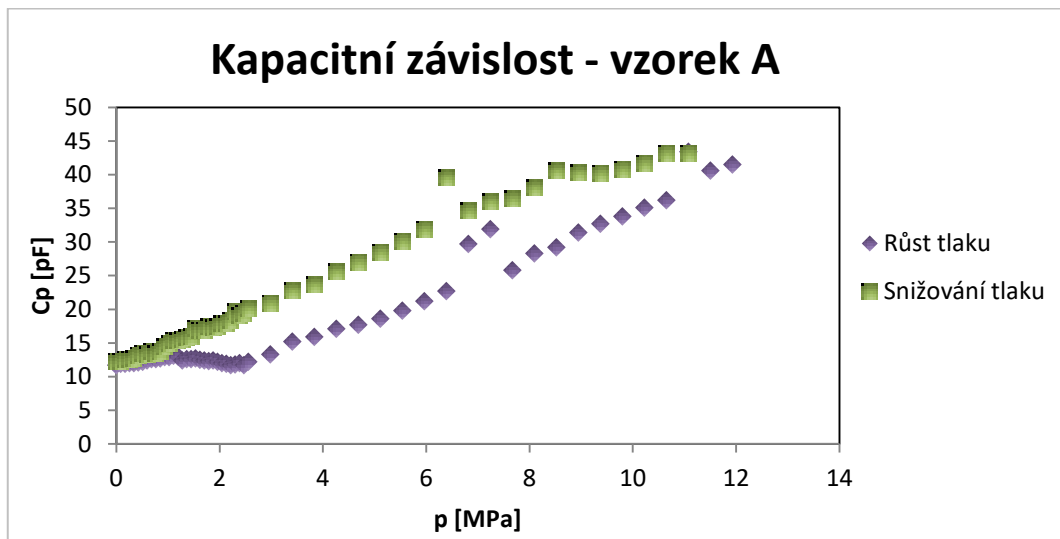
U kontrolního 2. měření je možno pozorovat anomálie na začátku a konci měření. Ve fázi růstu měl odpor zpočátku tendenci růst a na konci fáze snižování dosáhl mnohem vyšších hodnot než původně v klidovém stavu. Tyto výsledky se objevily poté, co byl vzorek přetížen tlakem vyšším než 20 kPa, který jej nejspíše poškodil.

Graf 5: 2. měření změny odporu vzorku A



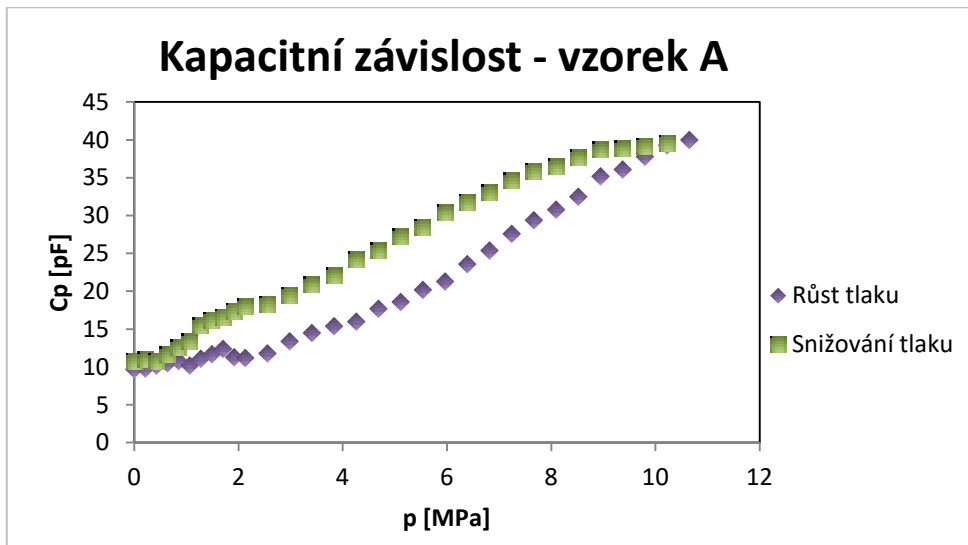
Měření kapacity vykázalo očekávané výsledky. V průběhu zvyšování tlaku se v důsledku přibližujících se elektrod kapacita zvyšovala, v opačné fázi zase naopak snižovala. Rozdíly lze přičíst opět paměťovému efektu pěny. Avšak v klidovém stavu se již kapacita téměř vyrovnala.

Graf 6: 1. měření změny kapacity vzorku A



2. ověřovací měření vykreslilo velmi podobné křivky v grafu jako 1. měření. Lze tedy konstatovat, že přetížení vzorku nemělo vliv na opětovné měření kapacity.

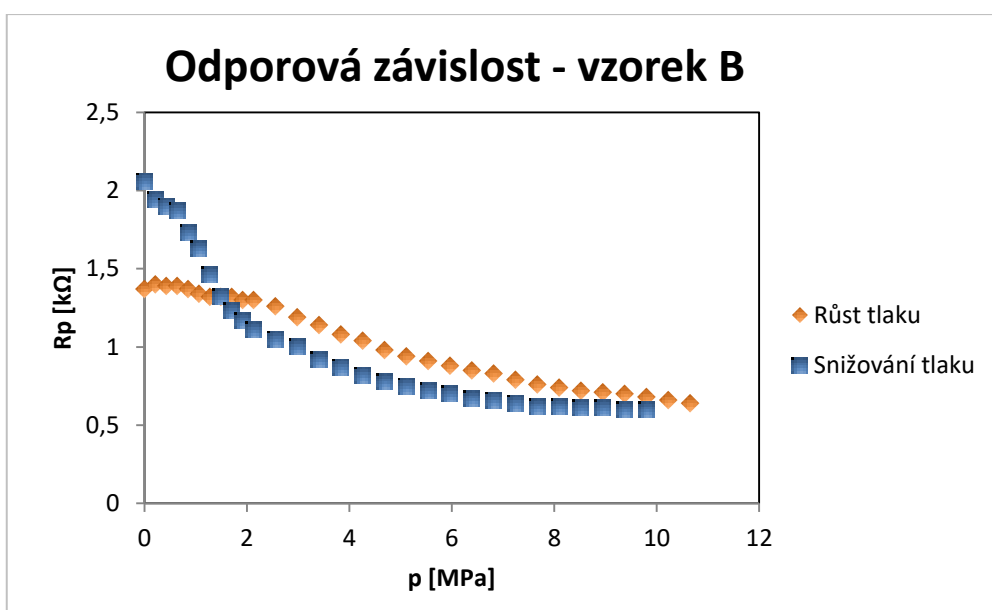
Graf 7: 2. měření změny kapacity vzorku A



3.2.2 Vzorek B s antistatickou vodivou pěnou

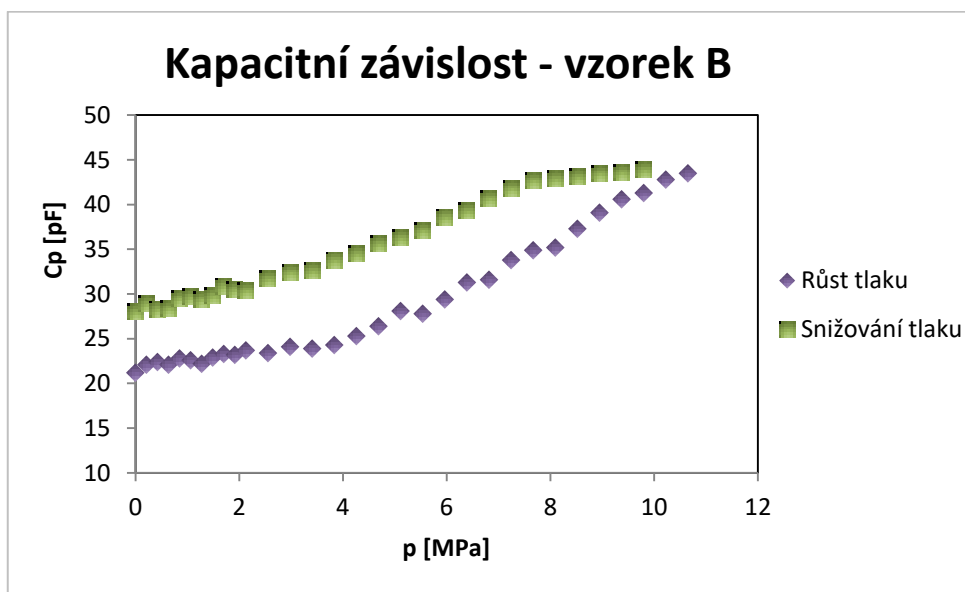
Měření vzorku B již od klidového měření vykazovalo značně nižší hodnoty odporu. Při srovnání s výsledky vzorku A jsou křivky na první pohled relativně podobné. Nicméně značný rozdíl lze spatřovat ve sklonu křivek, kdy u vzorku A (1. měření před poškozením přetížením) při tlaku 4 kPa klesl odpor o cca 75% své původní hodnoty. Zde vidíme při této situaci pokles z hranice 1,4 k Ω k hodnotě 1 k Ω . Což odpovídá procentnímu vyjádření poklesu okolo 28%.

Graf 8: Měření změny odporu vzorku B



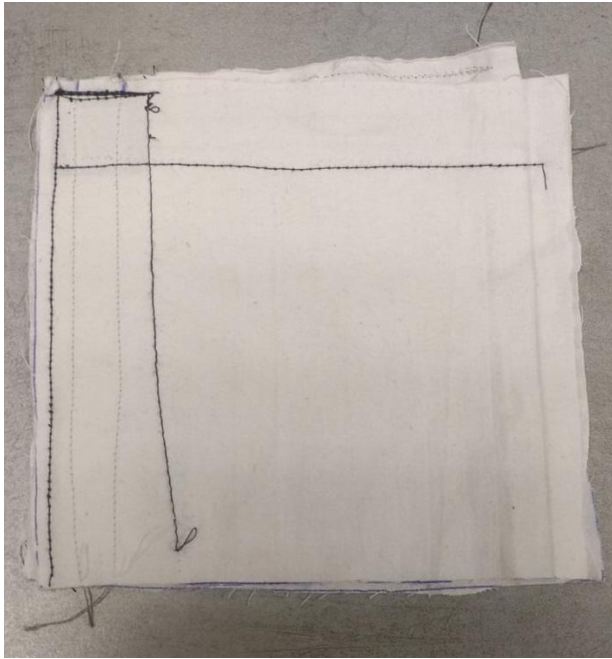
Graf změny kapacity pro vzorek B zobrazuje rostoucí průběh křivek. Avšak v klidové fázi dochází ke zdatelnému rozdílu v hodnotách C_p . Což značí, že vzdálenost elektrod není stejná jako na začátku měření a u toho vzorku tedy trvá delší dobu, než se navrátí do původního tvaru.

Graf 9: Měření změny kapacity vzorku B



3.3 Vzorek s Velostatem

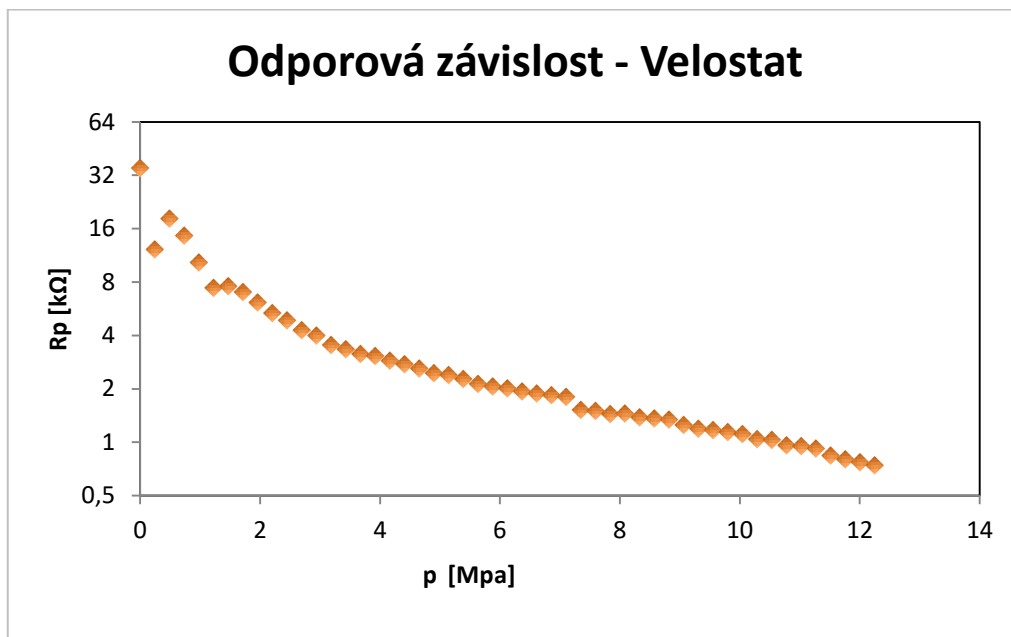
Pro zkoumání materiálu známého jako Velostat či Linqstat byl využit senzor z obr. 9. Jeho vnitřní uspořádání se skládá ze dvou podobných částí. Jedná se o vrstvu tkaniny, do níž jsou vertikálně vsity vodivé nitě a na jejímž konci se nachází čtverec vodivé tkaniny o straně 2 cm, která slouží jako elektroda. Protikus je totožný, jen vodivé nitě jsou našity horizontálně. Mezi spojenými vodivými tkaninami se nachází stejně velký čtverec materiálu Velostat. Měření proběhlo vytvářením tlaku na tuto krajní čtvercovou oblast a hodnoty byly měřeny na výstupních koncích vodivých nití.



Obrázek 10: Vzorek se všitým Velostatem

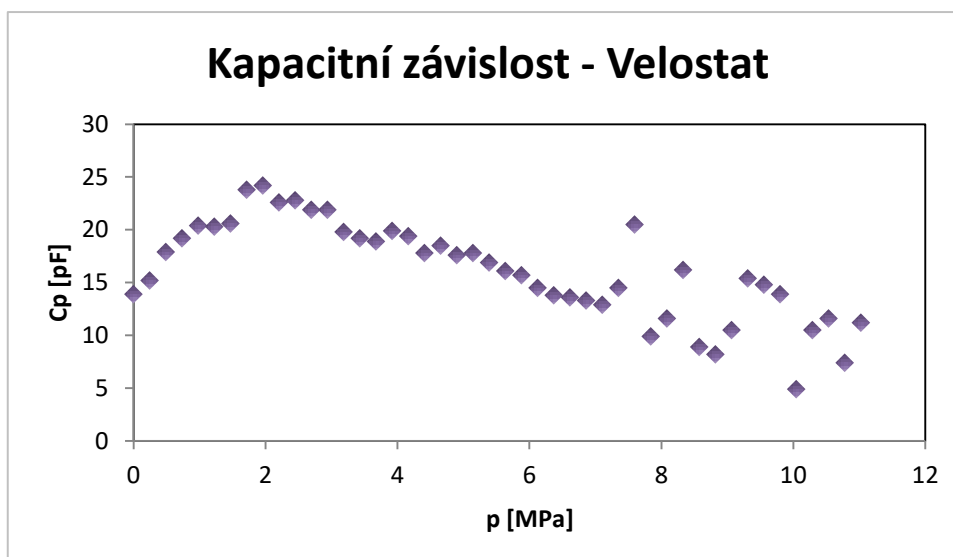
Prvotní naměřené hodnoty změny odporu vykazovaly skokové rozdíly, což bylo nejspíše zapříčiněno nedostatečným kontaktem Velostatu s elektrodami. Nicméně již od hodnoty blízké se 2 kPa je možno sledovat pozvolnější pokles křivky.

Graf 10: Měření změny odporu vzorku s Velostatem



Ačkoliv vzorek splnil teoretické očekávání při měření odporu, tak graf změny kapacity toto nenaplnil. Zpočátku dochází k předpokládanému růstu, který dosahuje svého maxima okolo tlaku 2 kPa. Od této hranice se stává křivka klesající. Další překvapení nastává okolo bodu vymezujícího 7 kPa. Zde měřicí přístroj vyobrazoval značně oscilující úroveň kapacity pro každou další zaznamenanou hodnotu.

Graf 11: Měření změny kapacity vzorku s Velostatem



3.4 Vzorky se silikonem

V rámci práce bylo vytvořeno celkem 9 vzorků silikonů obohacených o uhlíkové částice, které dle předpokladů měly zaručit piezorezistivní vlastnosti výsledného materiálu. Parametry jednotlivých vzorků shrnuje následující tabulka.

Tabulka 4: Parametry silikonových vzorků

Vzorek	Složení [g]			Tloušťka	Silikon	Ředidlo	Velikosti odporu	Očekávaný průběh křivek
	COND	CABOD	KB					
1	0,3	0	0,3	0,51	00-10	Ne	Desítky kΩ	Ano
2	0,15	0	0,15	0,48	00-10	Ne	Jednotky MΩ	Ano
3	0,3	0	0	0,87	00-30	Ne	Vysoká oscilace měřeného Rp	Ne
4-10	0,3	0	0	0,44	00-30	Ne	Vysoká oscilace měřeného Rp	Ne
4-15	0,3	0	0	0,45	00-30	Ne	Vysoká oscilace měřeného Rp	Ne
5	0	0,3	0	0,43	00-30	Ano	Jednotky MΩ	Ne
6	0	0	0,3	0,51	00-30	Ano	Stovky kΩ	Ano
7	0,3	0,3	0	0,49	00-30	Ano	Jednotky MΩ	Ne
M2	0,3	0,3	0	0,48	00-30	Ano	Stovky MΩ	Ne

Pro vytvoření vzorků byly využity silikony Ecoflex 00-10 a Ecoflex 00-30, které se vytvářejí smícháním dvou složek A a B v poměru 1:1. Pro míchání bylo využito vždy 7 gramů každé složky, do níž byl vmíchán uhlík nebo grafit o hmotnosti, které zobrazuje tabulka výše. Výsledný produkt byl nanesen na měděnou fólii a vytvrzen v sušárně při 60°C.

Dále jsou v podkapitolách uvedeny křivky pro průběh měření odporu a kapacity v závislosti na tlaku u jednotlivých vzorků. Nejsou uvedeny výsledky pro vzorky 3, 4-10 a 4-15, u nichž se nepodařilo naměřit relevantní hodnoty, které by bylo možno vykreslit do grafu.

3.4.1 Vzorek 1

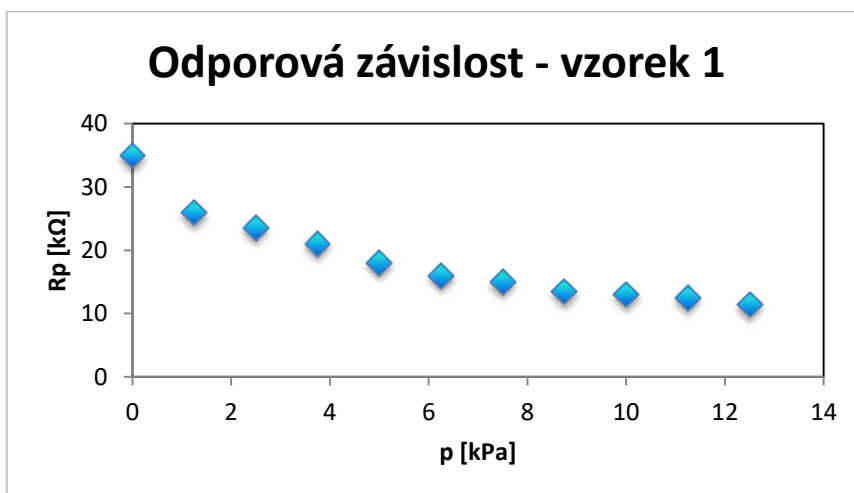
Vzorek 1 byl vytvořen přidáním uhlíku COND a grafitu KB v množství 0,3 g od každého do silikonu Ecoflex 00-10.



Obrázek 11: Vzorek 1

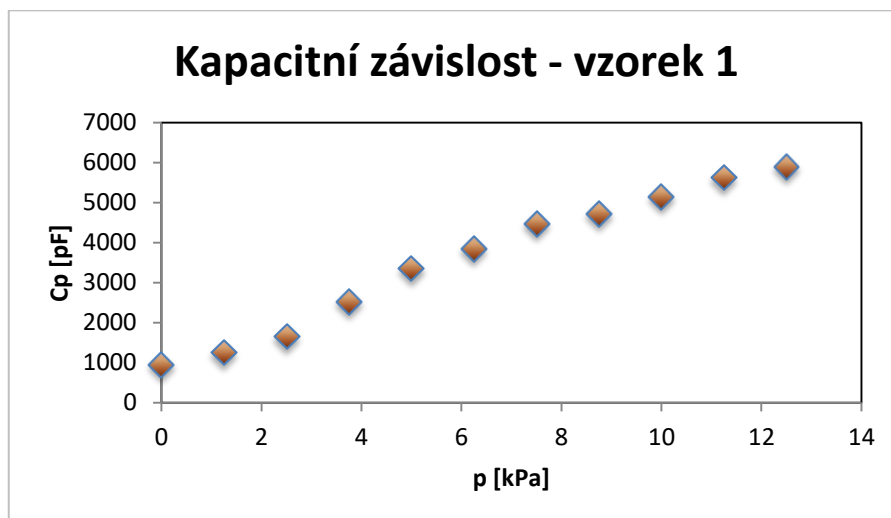
Graf průběhu změny odporu R_p odpovídá předpokladům na piezorezistivní materiál. Při zatěžování vzorku v rozsahu 12 kPa se hodnota odporu snížila téměř o 70% od původní hodnoty bez zatížení.

Graf 12: Měření změny odporu vzorku 1



Průběh změny odpovídá předpokladům svým růstem. V měřeném rozmezí stoupla hodnota odporu na šestinásobek.

Graf 13: Měření změny kapacity vzorku 1



3.4.2 Vzorek 2

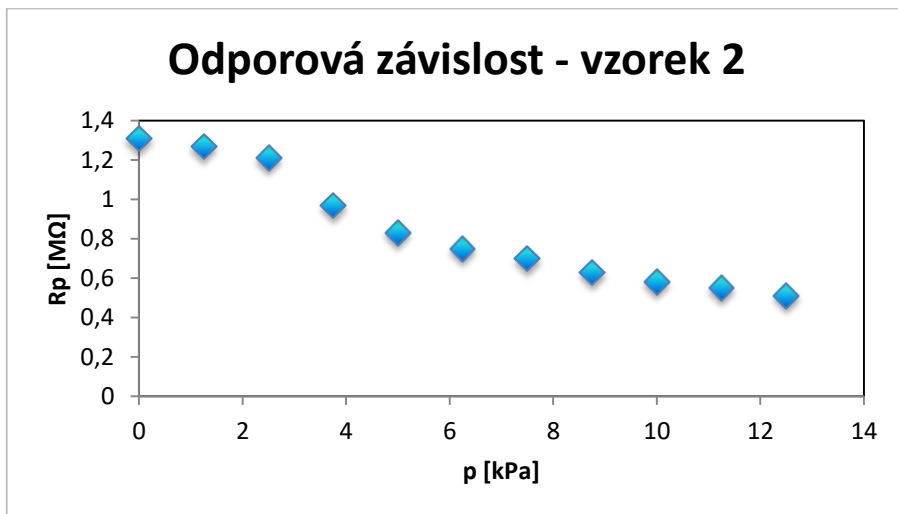
Vzorek 2 obsahuje stejné příměsi COND a KB podobně jako první vzorek. Nicméně jejich koncentrace je poloviční (0,15g).



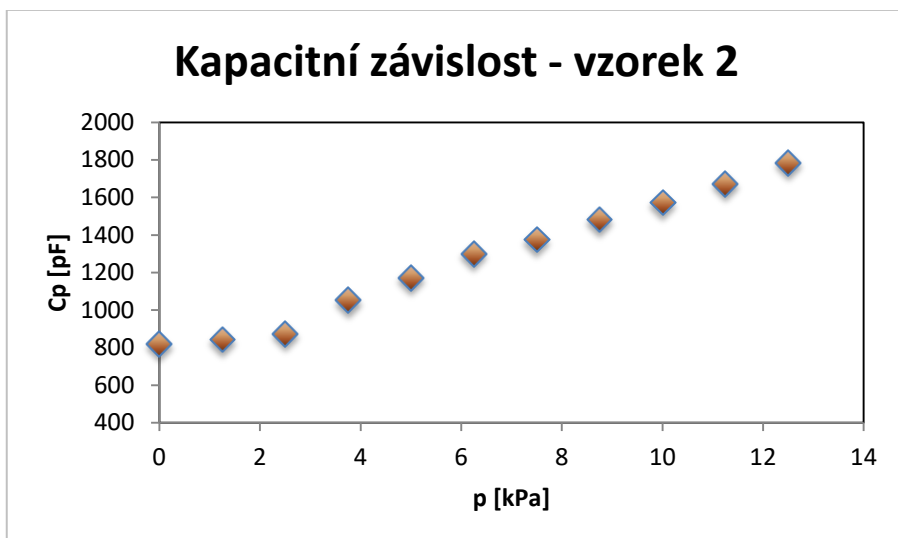
Obrázek 12: Vzorek 2

Průběhy odporu i kapacity jsou velmi podobné vzorku 1. Rozdíl je v nižší vodivosti způsobenou menší koncentrací vodivých částic. Odpor vzorku je ve srovnání s předchozím vzorkem zhruba 40x vyšší a hodnota kapacity 3x nižší.

Graf 14: Měření změny odporu vzorku 2



Graf 15: Měření změny kapacity vzorku 2



3.4.3 Vzorky 3, 4-10 a 4-15

Další tři vzorky byly vytvořeny ze Silikonu Ecoflex 00-30 a uhlíku COND (0,3g). U vzorku 3 bylo zjištěno vyšší zahřívání v průběhu míchání, čímž silikon předčasně zatvrdnul. Pro vzorky 4-10 a 4-15 byly sníženy doby míchání, aby se výsledná hmota dala vylít na měděnou fólii.



Obrázek 13: Vzorek 3



Obrázek 14: Vzorek 4-10



Obrázek 15: Vzorek 4-15

Při měření odporu výsledné hodnoty velmi oscilovaly a to až do řádů jednotek $G\Omega$. Z tohoto můžeme považovat takto vytvořené silikony za izolanty.

3.4.4 Vzorek 5

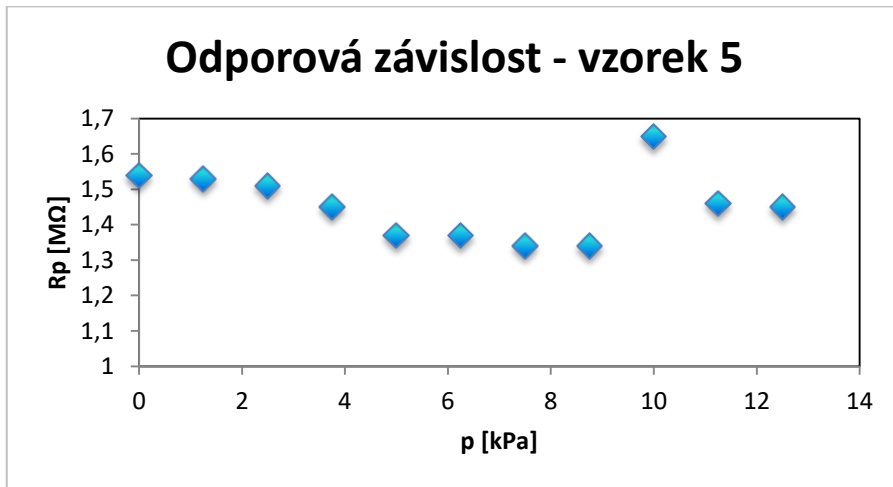
Pro vytvoření vzorku bylo využito silikonu Ecoflex 00-30 grafitu CABOD o hmotnosti 0,3 g. Pro neuspokojivé výsledky předchozích vzorků bylo navíc přidáno ředidlo na silikony, které by mělo zpomalit proces tuhnutí silikonu v průběhu míchání.



Obrázek 16: Vzorek 5

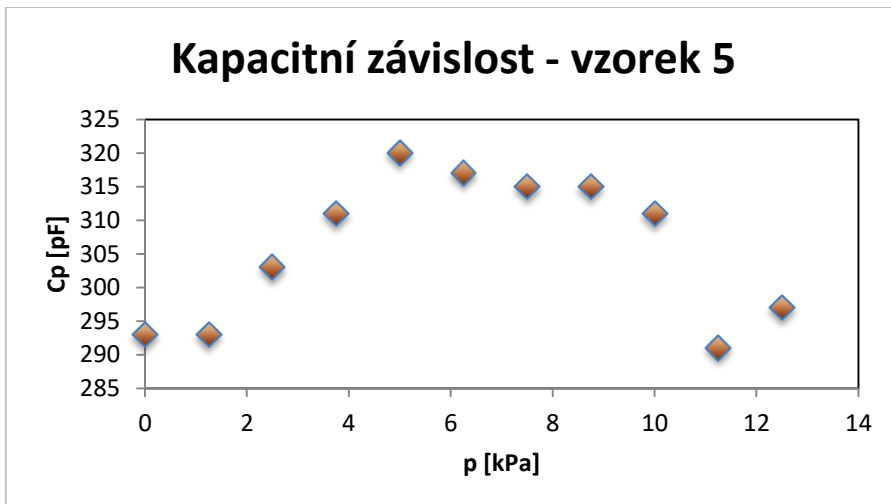
Ačkoliv konzistence výsledné pasty a povrch po zatvzení se jevily jako nejlepší, tak se v materiálu nepotvrdily jeho piezorezistivní vlastnosti. Odpor se v průběhu měření měnil jen nepatrně a to jak poklesem, tak i růstem.

Graf 16: Měření změny odporu vzorku 5



Graf změny kapacity neodpovídá předpokladům, když v průběhu roste i klesá. Při pohledu na výslednou křivku lze pozorovat, že se kapacita vzorku v průběhu měření příliš neměnila.

Graf 17: Měření změny kapacity vzorku 5



3.4.5 Vzorek 6

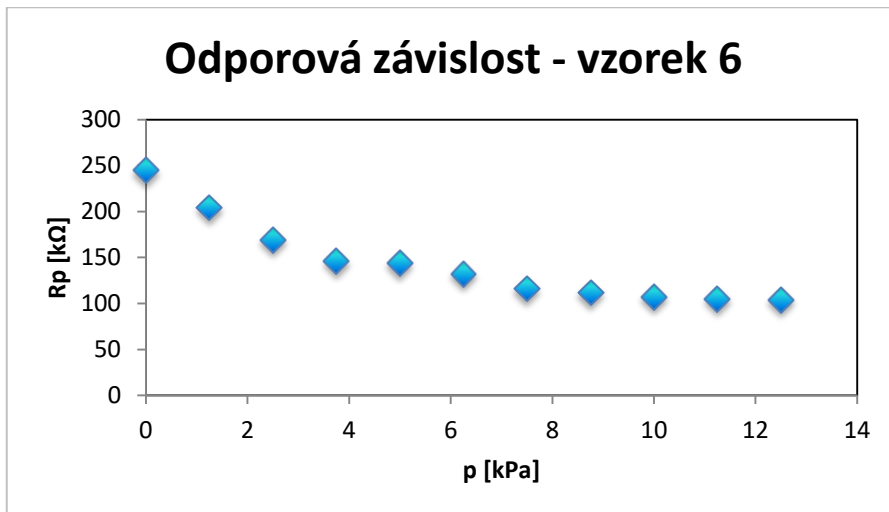
Vzorek byl složen ze silikonu Ecoflex 00-30 do něhož bylo přidáno 0,3 g grafitu KB. V průběhu míchacího procesu bylo rovněž přidáno ředidlo pro zpomalení tuhnutí.



Obrázek 17: Vzorek 6

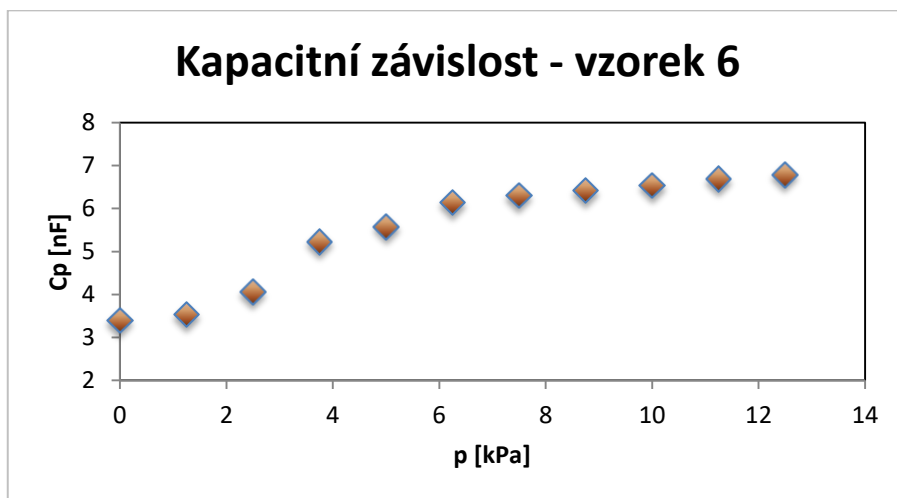
Výsledná křivka odporu potvrzuje předpoklad piezorezistivity vzorku. Nicméně ve srovnání se vzorky 1 a 2 se jeví závislost jako méně lineární.

Graf 18: Měření změny odporu vzorku 6



Kapacita v průběhu měření rostla, nicméně ani její strmost není příliš konstantní a v průběhu změny tlaku se ztelně mění.

Graf 19: Měření změny kapacity vzorku 6



3.4.6 Vzorek 7

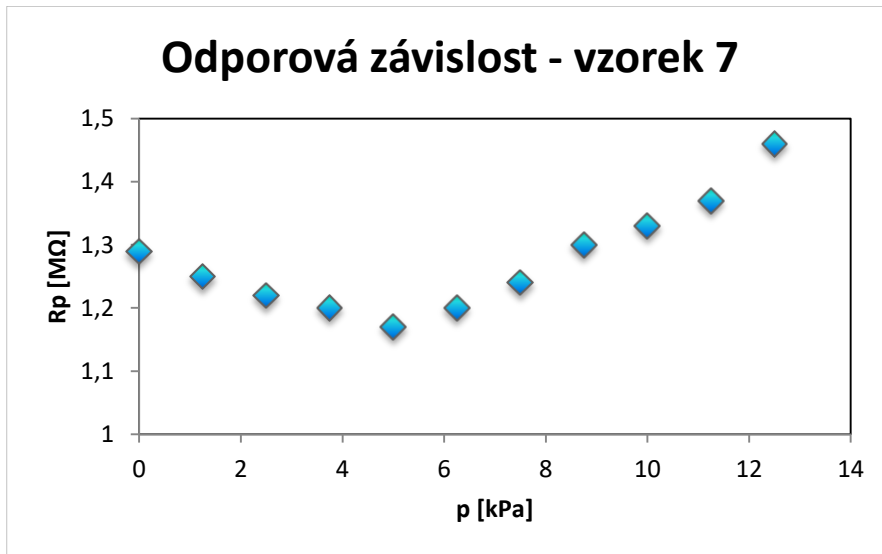
Složení vzorku obsahovalo silikon Ecoflex 00-30, COND (0,3g) a CABOT (0,3g). Rovněž bylo použito ředidlo pro zpomalení průběhu tuhnutí.



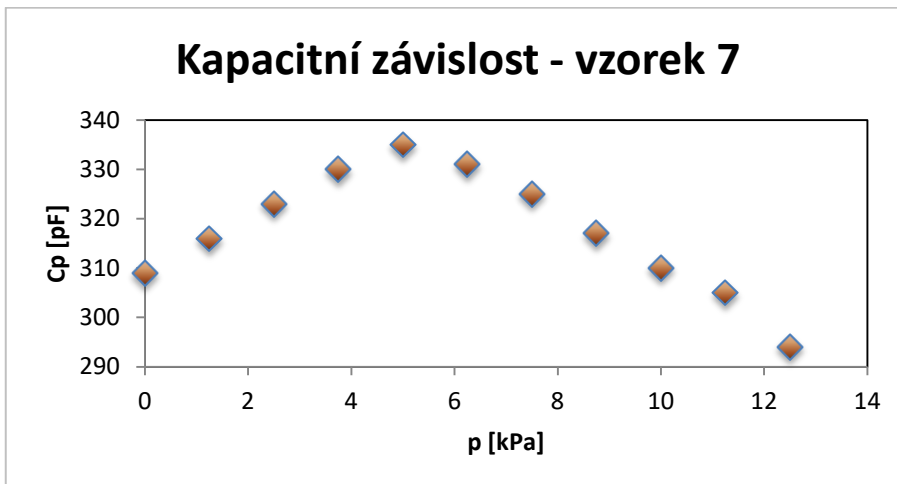
Obrázek 18: Vzorek 7

Obě sledované závislosti vykázaly shodnou anomálii, kdy se vzorek do doby zatížení 5 kPa choval dle předpokladů. Od této hodnoty se však trend změnil a odpor vzorku začal růst a kapacita klesat.

Graf 20: Měření změny odporu vzorku 7



Graf 21: Měření změny kapacity vzorku 7



3.4.7 Vzorek M2

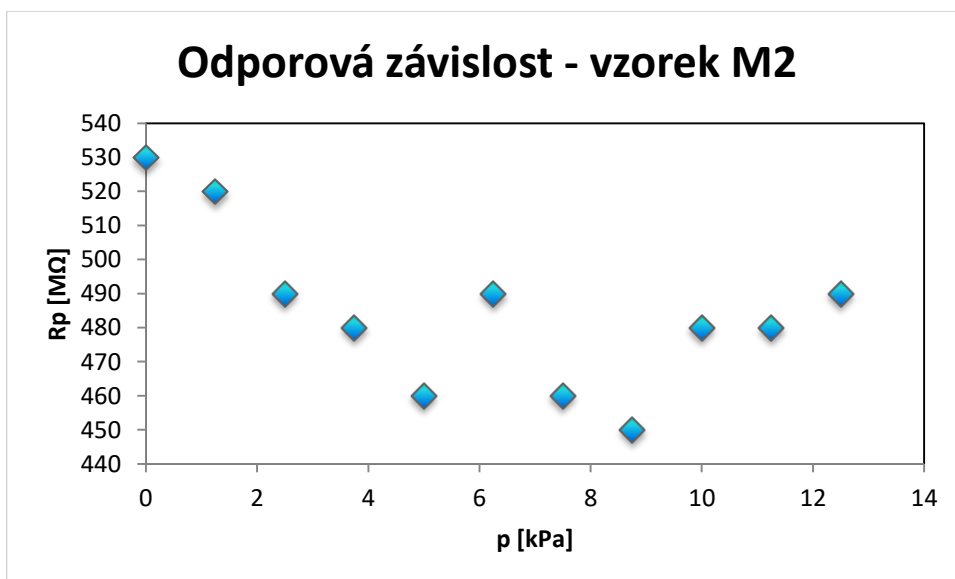
Jedná se složením o totožný vzorek jako předchozí č. 6. Tento kompozitní silikon byl dodán vedoucím práce, který proces míchání a sušení provedl jiným způsobem než autor práce u ostatních vzorků.



Obrázek 19: Vzorek M2

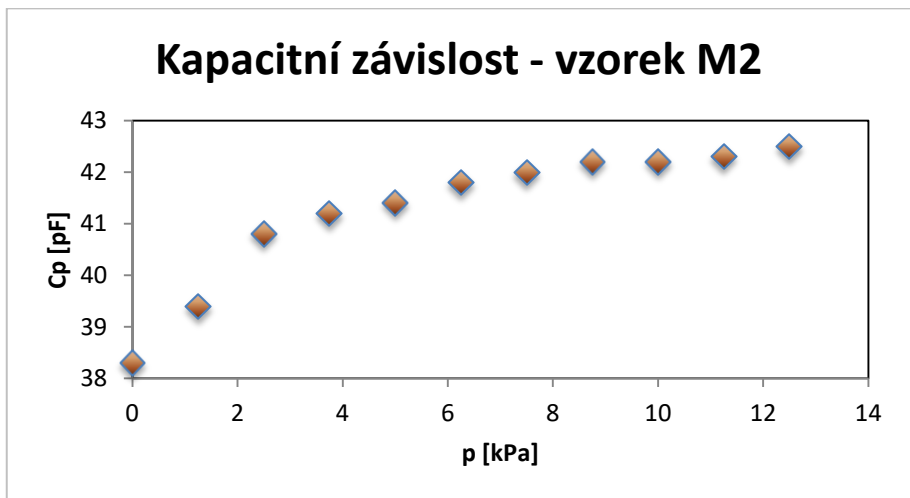
Odporová křivka osciluje okolo velmi vysoké hodnoty 480 M Ω . Piezorezistivní vlastnosti vzorku nebyly měřením potvrzeny.

Graf 22: Měření změny odporu vzorku M2



Hodnota kapacity se zvyšujícím tlakem rosla, což odpovídá předpokladu.

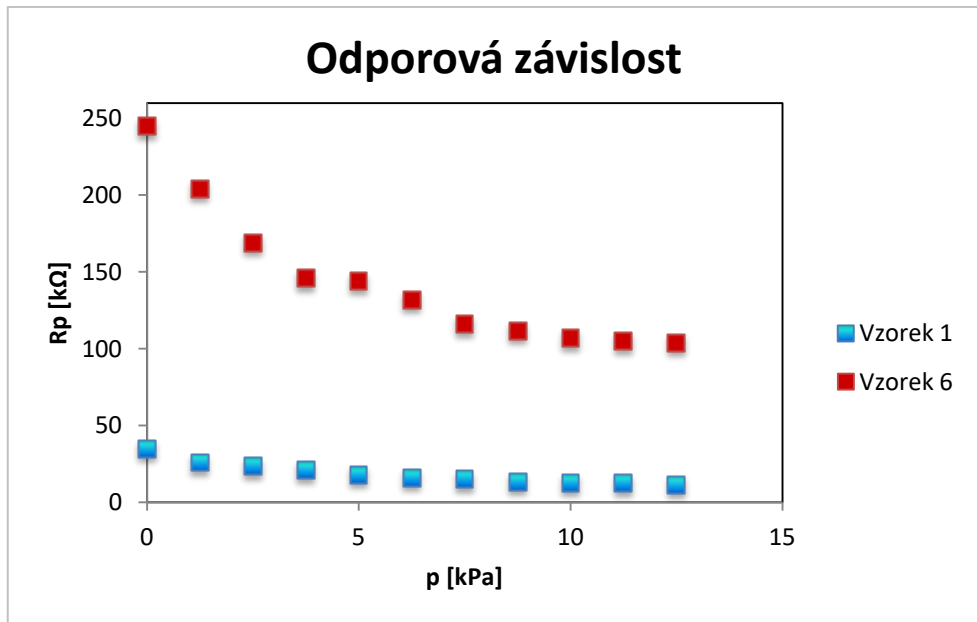
Graf 23: Měření změny kapacity vzorku M2



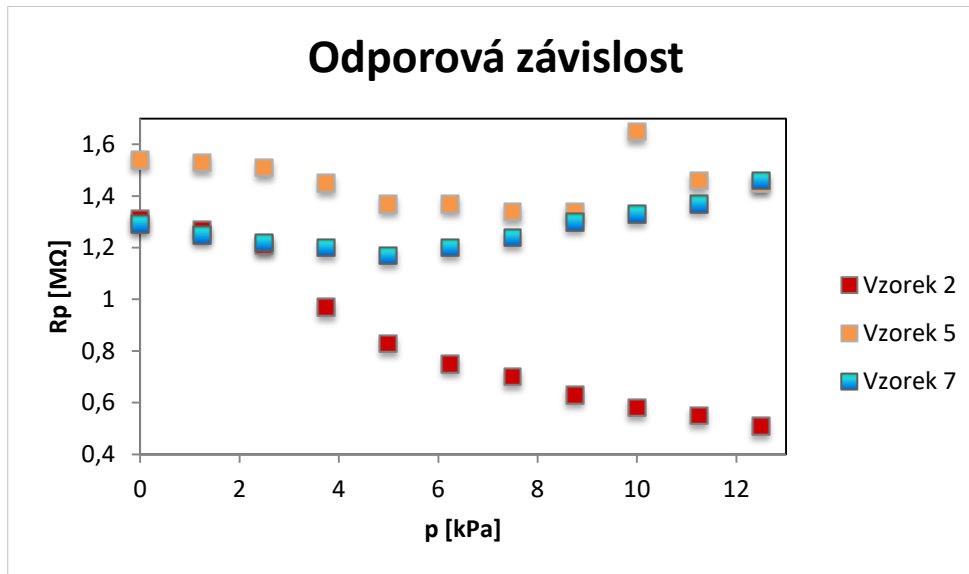
3.4.8 Zhodnocení silikonových vzorků

Bylo vytvořeno 8 vzorků, u kterých byly následně hodnoceny jejich elektrické vlastnosti. Níže pro vzájemné srovnání autor zobrazil naměřené výsledky odporu do společných grafů.

Graf 24: Odporová závislost vzorků 1 a 6



Graf 25: Odporová závislost vzorků 2, 5 a 7

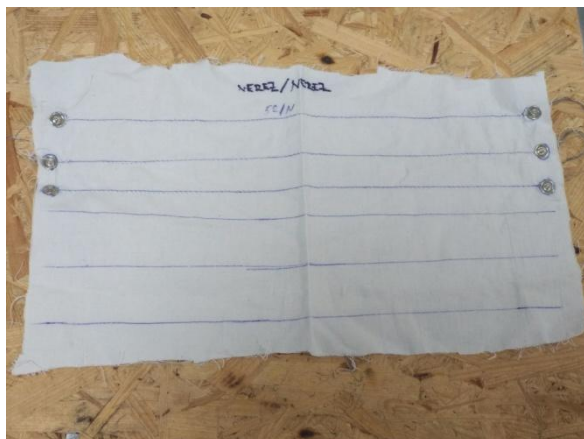


Hledané piezorezistivní vlastnosti vykazovaly pouze vzorky 1, 2 a 6. Při pohledu na tabulku 4 se ukazuje, že se jedná o vzorky, jejichž součástí byl grafit KB. Nicméně při kontrole povrchů těchto vzorků jsou vidět nedokonalosti ve formě oblastí s nedostatečně rozmíchaným grafitem. Tato skutečnost nejspíše ovlivnila výsledné naměřené hodnoty.

Vzorek M2 oproti uvedeným dosahoval mnohem vyšších hodnot okolo 500 MΩ, proto nebyl do grafů přidán. Nicméně velikosti odporů všech vzorků hodnotí autor jako vysoké. Proto by doporučoval pro budoucí testování vzorky obohatit o větší množství vodivých částic.

3.5 Sledování zrychleného stárnutí nerezové vodivé nitě

Pro výrobu tlakových senzorů bude kromě piezorezistivního materiálu, také zapotřebí dalších vhodných vodivých látek. Vhodnost využití vodivých nití se autor snaží také simulovat určitým „zrychleným procesem stárnutí“. Tento proces prozatím spočívá v několika násobném vyprání vzorku. Ten je složen s tkaniny, do níž je všita nerezová nit.



Obrázek 20: Všité nerezové nitě

Tři měření jsou zaznamenány v následující tab. 3. Proběhly celkem dva prací procesy, které byly oba nastaveny na teplotu 40°C. Jak je s výsledku patrné, tak praní nemělo na velikost odporu nitě žádný vliv.

Tabulka 5: Hodnoty odporu nerezových nití

	Počáteční hodnota	1. praní	2. praní
Horní nit	7,8 Ω	7,8 Ω	7,7 Ω
Střední nit	8,2 Ω	8,5 Ω	8,3 Ω
Spodní nit	7,3 Ω	6,9 Ω	7,0 Ω

ZÁVĚR

V rámci teoretické části byla provedena literární rešerše zabývající se piezorezistivním jevem, jak v polovodičích, kovech tak i v dále testovaných kompozitních materiálech na bázi elastomerů. Autor provedl průzkum trhu a vybral vhodné materiály pro výrobu tlakových senzorů. Ty rozvíjí v samostatných kapitolách, hodnotí jejich cenu a dostupnost.

V úvodu experimentální části byla provedena měření, která testovala funkčnost nakoupených materiálů a z nich vyrobených senzorů. Odporová závislost těchto kompozitních materiálů odpovídala teoretickým předpokladům. Rovněž použitelnost vodivých nití se jevila jako velmi dobrá. Proto se tyto materiály dají doporučit pro předpokládanou aplikaci v rámci e-textilu.

V další části autor testoval silikonové kompozitní materiály, které sám vyráběl. V rámci práce bylo vytvořeno osm rozdílných vzorků s různým složením. Rozdílné byly jak koncentrace a druh vodivé složky, tak i typ silikonu. I přes předpoklady byly piezorezistivní vlastnosti odhaleny pouze u tří vzorků, které však trpěly nedostatečným rozmícháním grafitu, což mohlo výsledky ovlivnit.

Z toho důvodu autor nedoporučuje přímé využití materiálů, jak byly testovány. V případě budoucího využití bude potřeba otestovat jiné varianty složení a případně odlišné způsoby míchání. V souladu se zjištěnými závěry autor navrhuje vyšší koncentraci vodivé složky kompozitu, což by vedlo ke snížení odporu a lepší využitelnosti materiálu v praxi.

Při procesu míchání je nutné sledovat mimo míry rozmíchání, také teplotu a rychlost zahřívání materiálu. To může způsobit předčasné zatvrzení kompozitu. Tento jev nastal u vzorku 3, což znemožnilo lepší promíchání složek kompozitu a především pak ovlivnilo jeho strukturu pro další manipulaci a vytvoření požadované struktury. Míra zahřívání ztlačně závisela na množství a typu vodivé příměsi. Řešení tohoto problému nalezneme v ochlazování směsi v průběhu výroby či přidání příměsi, která zpomalí reakci složek silikonu. Z tohoto důvodu autor u pozdějších vzorků využíval silikonového ředidla zpomalující zmíněnou reakci.

LITERATURA

- [1] REGTIEN, Paul P.L. *Resistive Sensors. Sensors for Mechatronics* [online]. Elsevier, 2012, 2012, s. 57-100 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1016/B978-0-12-391497-2.00004-2. ISBN 9780123914972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123914972000042>
- [2] DIRJISH, Mat. *What's The Difference Between Piezoelectric And Piezoresistive Components?* [online]. In: . ELECTRONIC DESIGN, 2012 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/components/what-s-difference-between-piezoelectric-and-piezoresistive-components>
- [3] TEPROSTROJ, S.R.O. *Extrémně přesné senzory měření vzdálenosti* [online]. In: . ElektroPrůmysl.cz, 2016 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/extremne-presne-senzory-mereni-vzdalenosti>
- [4] THOMSON, W. *On the electro-dynamic qualities of metals: —Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron.* Proceedings of the Royal Society of London [online]. 1997, 8, 546-550 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1098/rspl.1856.0144. ISSN 0370-1662. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspl.1856.0144>
- [5] BARLIAN, A.A., W.-T. PARK, J.R. MALLON, A.J. RASTEGAR a B.L. PRUITT. Review: *Semiconductor Piezoresistance for Microsystems.* Proceedings of the IEEE [online]. 2009, 97(3), 513-552 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2013612. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4811093/>
- [6] TOMLINSON, Herbert. *On the increase in resistance to the passage of an electric current produced on wires by stretching.* Proceedings of the Royal Society of London [online]. 1997, 25(171-178), 451-453 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1098/rspl.1876.0066. ISSN 0370-1662. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspl.1876.0066>
- [7] TOMLINSON, H. *The influence of stress and strain on the action of physical forces.* Philos Trans R Soc London. 1883;174:1–172
- [8] PARK, Woo-Tae. *Piezoresistivity.* BHUSHAN, Bharat, ed. Encyclopedia of Nanotechnology [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, 2016-11-29, s. 3246-3252 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1007/978-94-017-9780-1_222. ISBN 978-94-017-9779-5. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-9780-1_222
- [9] WANG, Shoukai a D. D. L. CHUNG. *Negative piezoresistivity in continuous carbon fiber epoxy-matrix composite.* Journal of Materials Science [online]. 2007, 42(13), 4987-4995 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1007/s10853-006-0580-z. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-006-0580-z>
- [10] KESTEN, Harry. *What is...Percolation?.* NOTICES OF THE AMS. 2006 (Volume 53, Number 5). Dostupné z: <http://www.ams.org/notices/200605/what-is-kesten.pdf>

- [11] KALANTARI, Masoud, Javad DARGAHI, Jozsef KÖVECSES, Mahmood Ghanbari MARDASI a Shahrzad NOURI. *A New Approach for Modeling Piezoresistive Force Sensors Based on Semiconductive Polymer Composites*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics [online]. 2012, 17(3), 572-581 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1109/TMECH.2011.2108664. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5727954/>
- [12] ELECTRICAL4U. *Transducer: Types of Transducers And What They Are* [online]. In: . 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/transducer-types-of-transducer/>
- [13] COMSOL. *Piezoresistive Effect*. In: Multiphysics CYCLOPEDIA [online]. 2017 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics>
- [14] GOODRICH, Ryan. *Accelerometers: What They Are & How They Work*. In: LiveScience [online]. 2013 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40102-accelerometers.html>
- [15] AVNET ABACUS. *Capacitive vs piezoresistive vs piezoelectric pressure sensors*. AVNET ABACUS [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/capacitive-vs-piezoresistive-vs-piezoelectric/>
- [16] DIVIŠ, Jozef. *Kondenzátor*. SPŠE Mohelnice [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/kondenzatory.htm>
- [17] AVNET ABACUS. *Capacitive pressure sensor*. AVNET ABACUS [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/capacitive-vs-piezoresistive-vs-piezoelectric/>
- [18] HAGGERTY, James J. *Spinoff 1980: An Annual Report*. U.S. Government Printing Office, 1980
- [19] ADAFRUIT. *Pressure-Sensitive Conductive Sheet (Velostat/Linqstat)*. Adafruit.com [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/1361>
- [20] KOKABANT. *VELOSTAT*. Kobakant.at [online]. 2009 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=381>
- [21] ANWARY, Arif Reza, Hamid BOUCHACHIA a Michael VASSALLO. Real time visualization of asymmetrical sitting posture. *Procedia Computer Science* [online]. 2019, 155, 153-160 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.024. ISSN 18770509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187705091930938X>
- [22] CAPLINQ. *When is a generic brand good enough?* Caplinq.com [online]. 2007 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: https://www.caplinq.com/blog/when-is-a-generic-brand-good-enough_5/
- [23] CAPLINQ. *Linqstat™ Conductive films*. Caplinq.com [online]. 2016 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: [https://www.caplinq.com/index.php?option=com_filecabinet&task=download&cid\[\]=162](https://www.caplinq.com/index.php?option=com_filecabinet&task=download&cid[]=162)
- [24] ZOFLEX. *Products*. Zoflex.com [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.zoflex.com/products.html>
- [25] SPARKFUN. *EeonTex Pressure Sensing Fabric*. Sparkfun.com [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/retired/14111>

- [26] DANQING CHEN a GUOHUA CHEN. *The conductive property of polyurethane/expanded graphite powder composite foams*. Journal of Reinforced Plastics and Composites [online]. 2011, 30(9), 757-761 [cit. 2019-12-12]. DOI: 10.1177/0731684411407101. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684411407101>
- [27] KOKABANT. *ANTI-STATIC FOAM*. Kobakant.at [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=950>
- [28] CLEVERTEX. *ELEKTRICKY VODIVÉ HYBRIDNÍ NITĚ*. Clevertex [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.clevertex.cz/vodive-nite/elektricky-vodive-hybridni-nite-detail-761>
- [29] BALABÁN, Jan. *Průmyslové chytré textilie*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [30] ADAFRUIT. *Stainless Thin Conductive Thread - 2 ply - 23 meter/76 ft*. Adafruit.com [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/640>
- [31] AMJADI, Morteza, Yong Jin YOON a Inkyu PARK. *Ultra-stretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes–Ecoflex nanocomposites*. Nanotechnology [online]. 2015, 26(37) [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1088/0957-4484/26/37/375501. ISSN 0957-4484. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/26/37/375501>
- [32] MAI, Huy, Rahim MUTLU, Charbel TAWK, Gursel ALICI a Vitor SENCADAS. *Ultra-stretchable MWCNT–Ecoflex piezoresistive sensors for human motion detection applications*. Composites Science and Technology [online]. 2019, 173, 118-124 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.02.001. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353818325612>
- [33] CHOLLETI, Eshwar, Jonathan STRINGER, Mahtab ASSADIAN, Virginie BATTMANN, Chris BOWEN a Kean AW. *Highly Stretchable Capacitive Sensor with Printed Carbon Black Electrodes on Barium Titanate Elastomer Composite*. Sensors [online]. 2019, 19(1) [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.3390/s19010042. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/42>
- [34] SMOOTH-ON, INC. *Ecoflex™ 00-30*. Smooth-On, Inc. [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>
- [35] SILIKONY, S.R.O. *Ecoflex*. Silikony [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.silikonysro.cz/silikony/adicni-silikony/ecoflex>

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Změny odporu v kovech vyvolané tlakem kladiva	11
Graf 2: Závislost odporu na tlaku u piezorezistivních látek	13
Graf 3: Závislosti odporu na tlaku pro Zoflex ZL45.1 a ZL60.1.....	20
Graf 4: 1. měření změny odporu vzorku A	27
Graf 5: 2. měření změny odporu vzorku A	28
Graf 6: 1. měření změny kapacity vzorku A.....	28
Graf 7: 2. měření změny kapacity vzorku A.....	29
Graf 8: Měření změny odporu vzorku B.....	29
Graf 9: Měření změny kapacity vzorku B	30
Graf 10: Měření změny odporu vzorku s Velostatem.....	31
Graf 11: Měření změny kapacity vzorku s Velostatem	32
Graf 12: Měření změny odporu vzorku 1	34
Graf 13: Měření změny kapacity vzorku 1	35
Graf 14: Měření změny odporu vzorku 2	36
Graf 15: Měření změny kapacity vzorku 2	36
Graf 16: Měření změny odporu vzorku 5	39
Graf 17: Měření změny kapacity vzorku 5	39
Graf 18: Měření změny odporu vzorku 6	40
Graf 19: Měření změny kapacity vzorku 6	41
Graf 20: Měření změny odporu vzorku 7	42
Graf 21: Měření změny kapacity vzorku 7	42
Graf 22: Měření změny odporu vzorku M2.....	43
Graf 23: Měření změny kapacity vzorku M2.....	44
Graf 24: Odporová závislost vzorků 1 a 6	44
Graf 25: Odporová závislost vzorků 2, 5 a 7	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Škála sortimentu Linqstat od společnosti Caplinq	19
Tabulka 2: Technický list pro sortiment vodivých nití značky CleverTex®.....	24
Tabulka 3: Dostupnost materiálů	25
Tabulka 4: Parametry silikonových vzorků	33
Tabulka 5: Hodnoty odporu nerezových nití	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Piezorezistivní jev v polymerním kompozitu	13
Obrázek 2: Průřez konstrukcí kapacitního senzoru	16
Obrázek 3: Kapacitní senzor v dotykovém režimu.....	16
Obrázek 4: Velostat / Linqstat	18
Obrázek 5: EeonTex piezorezistivní materiál.....	20
Obrázek 6: Antistatická vodivá pěna	21
Obrázek 7: Ecoflex	22
Obrázek 8: Ukázka vodivých nití od společnosti VÚB, a.s.....	23
Obrázek 9: Vzorky s antistatickou pěnou	26
Obrázek 10: Vzorek se všitým Velostatem.....	31
Obrázek 11: Vzorek 1	34
Obrázek 12: Vzorek 2	35
Obrázek 13: Vzorek 3	37
Obrázek 14: Vzorek 4-10.....	37
Obrázek 15: Vzorek 4-15.....	37
Obrázek 16: Vzorek 5	38
Obrázek 17: Vzorek 6	40
Obrázek 18: Vzorek 7	41
Obrázek 19: Vzorek M2	43
Obrázek 20: Všité nerezové nitě	46

SEZNAM ZKRATEK

FEKT Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

MEMSMikro-elektrické mechanické systémy

VUT Vysoké učení technické v Brně