

Ľubomír Livovský

Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Velostat pre flexibilné snímače sily

Abstrakt. Nasledujúci text opisuje vlastnosti materiálu Velostat a možnosť jeho použitia pre snímanie sily pomocou vodivých elektród, ktoré sú natlačené na polyetylénereftalátovom (PET) substráte. Ako citlivý odporový snímač je použitý materiál Velostat, ktorého zmeny odporu v závislosti na pôsobiacej sile na plochu materiálu sú snímané pomocou hrebeňových elektród.

Kľúčové slová: snímač, viskoelasticita, Velostat, polymérna pasta.

Abstract. The following text describes the Velostat properties, measurement of force using a Velostat based resistor sensor. The sensor is formed by contacts made of a polymeric conductive paste on a PET film. **(Velostat for flexible force sensors)**

Keywords: sensor, viscoelastic, Velostat, polymer paste.

Úvod

Článok je zameraný na možnosti snímania sily pomocou odporového flexibilného snímača sily vyrobeného sieťotlačovou technológiou na ohybnej PET fólii natlačením vodivých ciest a kontaktov za účelom merania zmeny odporu Velostatu v závislosti od pôsobiaceho tlaku na materiál. Materiál Velostat je použitý v úlohe prevodníka neelektrickej veličiny – tlak na elektrickú – odpor.

Podľa fyzikálnych princípov môžeme rozdeliť flexibilné odporové senzory pre snímanie sily do týchto skupín:

- Tenzometre, používajú pre meranie sily zmenu odporu v deformovanom vodiči,
- „Kvantové tunelovanie“ - využíva sa efekt tunela, ktorý v kompozitnom materiáli, kde sú vodivé častice rozptýlené vo vnútri polymérneho materiálu. Pri použití tlaku sa mení vzdialenosť medzi vodivými časticami vo vnútri kompozitného materiálu, pričom sa mení celková vodivosť materiálu.
- Perkolácia - precedencie v tomto prípade sa mení vodivosť materiálu z izoláčného na vodivú. Prahová hodnota závisí od množstva vodivých častíc rozptýlených v objeme elastického materiálu a od tlaku, ktorý deformuje kontakty medzi vodivými časticami, ktoré vytvárajú vodivú cestu vo vnútri materiálu.
- Piezorezistívne odporové snímače využívajú materiál, ktorý mení vodivosť pri zmene pôsobiaceho tlaku.

Ak je snímač vytvorený na princípe „perkolácie“ (podobný postup sa používa aj pre snímače založené na „kvantovom tuneli“), odpor kompozitného materiálu sa meria použitím elektród, ktoré sú v kontakte s polymérnym kompozitom. Tieto elektródy môžu byť vložené do materiálu počas výroby, lepené na materiál alebo sú s ním v kontakte. V prvých dvoch prípadoch je povrchový odpor medzi elektródami a materiálom konštantný. Ak sú elektródy len v kontakte s materiálom, môže mať zmena povrchového odporu veľký vplyv na funkciu snímača.

Velostat

Materiál Velostat je vyrobený z nepriehľadného polyolefinu z triedy polymérov a je impregnovaný časticami uhlíka. Vykazuje vodivé vlastnosti v dôsledku implementovania uhlíka do štruktúry polymérneho materiálu. Jeho fyzikálne vlastnosti nie sú závislé od času a vlhkosti. Vďaka svojim vlastnostiam polymérov, ktoré menia elektrický

odpor pri mechanickom ohýbaní, predĺžení alebo tlaku, otvára možnosť použitia tohto materiálu v snímačoch tlaku.

Celkový odpor Velostatu závisí od jeho veľkosti, takže je možné zmenou geometrie zmeniť celkový odpor medzi dvoma bodmi. Zväčšenie alebo zmenšenie dĺžky prispieva k zvýšeniu alebo zníženiu celkového odporu, ktorý sa mení aj pri súčasnom pôsobení tlaku alebo ťahu pričom zmena sa môže vyhodnotiť v zmene celkového odporu alebo napätia. Elektrické vlastnosti materiálu závisia od jeho hrúbky a celkovej plochy, ktorá sa používa ako vodič. Tým je možné vytvárať vodivé prepojenia s rôznou vodivosťou a tým aj citlivosťou na mechanické zmeny.

Viskoelastický model

Viskoelasticita materiálov súvisí so schopnosťou materiálov utlmiť mechanické vibrácie. Viskoelastické materiály kombinujú v sebe vlastnosti ideálne elastických aj viskózných materiálov. Väčšina reálnych materiálov je pri namáhaní charakterizovaná viskóznym aj elastickým chovaním. Hovoríme hlavne o prírodných a technických materiáloch (napr. polyméry, asfalty, typy biologických materiálov apod.).

Viskoelastický model materiálu sa skladá z dvoch zložiek:

- proporcionálnej zložky,
- exponenciálnej zložky

vzhľadom na pôsobenie záťaže (sily) na samotný materiál. Celkovú reakciu takého systému môžeme popísať vzťahom:

$$(1) \quad S = A[k_p + k_e(1 - e^{-(t-t_0)/\tau_{response}})]$$

kde: S – napätie deformácie materiálu, A – amplitúda pôsobiacej veličiny (v našom prípade tlak), k_p a k_e – koeficienty proporcionálnej a exponenciálnej časti odozvy, $\tau_{response}$ – časová konštanta modelu a t_0 – čas začiatku pôsobenia tlaku.

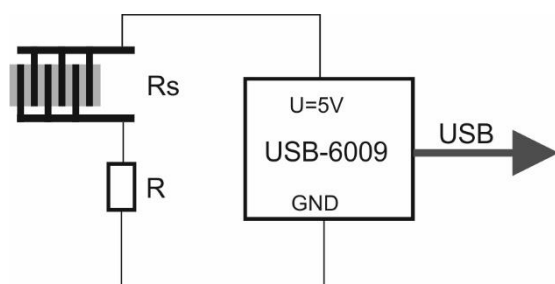
Viskoelastický model Velostatu predpokladá lineárnu závislosť vodivosti snímača tlaku na vyvíjanom tlaku, preto vzťah (1) vzhľadom na napätie U_S merané na snímači môžeme prepísať [1]:

$$(2) \quad \begin{aligned} U_S &= U_0 + S = \\ &= U_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-(t-t_0)/\tau_{response}})] \end{aligned}$$

kde U_0 - napäťové posunutie, p - pôsobiaci tlak na snímač. Následne podľa schémy na obrázku 1 môžeme vypočítať zmenu odporu snímača:

$$(3) \quad R_s = \frac{R}{U_s}(U - U_s)$$

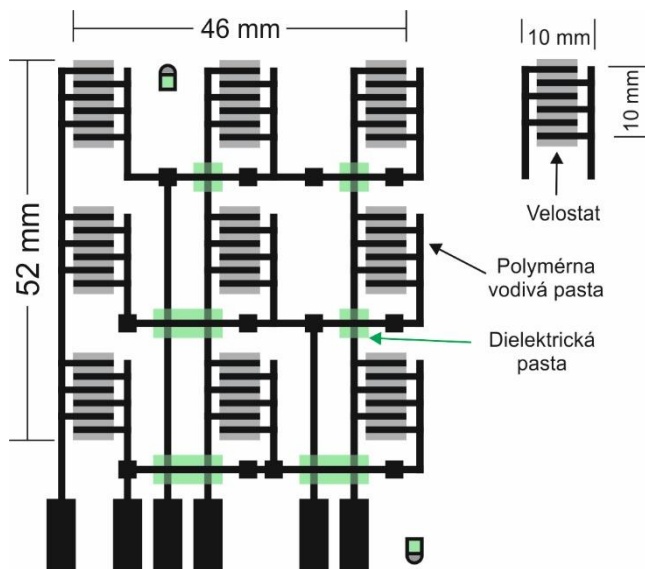
kde $U = 5V$, $R = 5100\Omega$.



Obr.1. Schéma zapojenia merania odporu.

Senzorový systém

Na účel merania odporu Velostatu bol vytvorený senzorový systém. Senzorový systém bol vyrobený natlačením polymérnej vodivej pasty na PET fóliu podľa návrhu zobrazenom na obrázku 2. Systém snímačov sily je tvorený meracími miestami, ktoré sú zapojené do matice 3x3, teda celkovo 9 snímačov sily. Jednotlivé meracie miesta sú medzi sebou prepojené vodivými čarami, križovanie vodivých čiar bolo vyriešené pomocou mostíkov z dielektrickej pasty ED7500DIELECTRIC. Použitím polymérnej pasty ED3000FLEX sme získali po výpale hodnotu plošného odporu $40,6m\Omega/\text{štvorec}$. Meracie miesta pre snímanie sily sú tvorené hrebeňovými kontaktnými plochami, ktoré sú v kontakte s materiálom Velostat, čím sa vytvára prevodník medzi pôsobiacou silou na plochu a zmenou elektrického odporu Velostatu. Zmena tlaku na snímač sa realizovala prikladaním závažia na testované miesto.

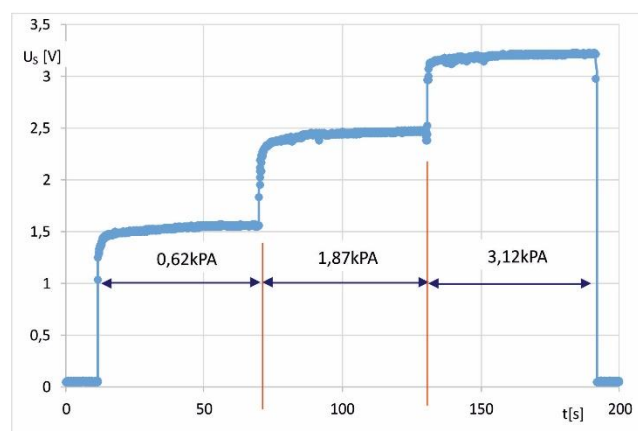


Obr.2. Hrebeňové snímače sily na flexibilnej PET fólii.

Vývody z maticového senzorového systému sú pripojené k multifunkčnému DAQ zariadeniu National Instruments USB-6009. Pomocou troch digitálnych výstupov sú buzené stĺpce maticového zapojenia a pomocou troch A/D prevodníkových vstupov sú merané napätia v riadkoch matice. Hodnoty napätia na jednotlivých hrebeňových kontaktoch sa zobrazujú do tabuľky a priebežných grafov v aplikácii navrhutej na tento účel v LabWindows/CVI.

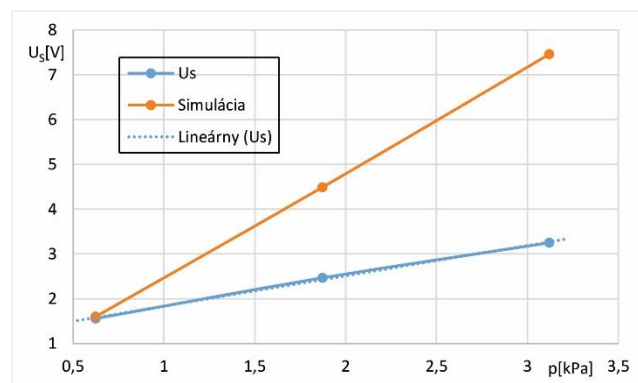
Prvé merania boli zamerané na zistenie závislosti zmeny odporu Velostatu na veľkosti pôsobiaceho tlaku.

Nakoľko relaxačné časy pri zaťažení a uvoľnení snímača sú rozdielne, merania snímača sú zamerané len na zaťaženie snímača. Na snímač bol postupne vyvíjaný tlak 0,62 kPa až 3,12 kPa a odmeraná závislosť je znázornená na obrázku 3.



Obr.3. Zmena napätia v závislosti od pôsobiaceho tlaku.

Na obrázku 4 je znázornená prevodová charakteristika zmeny napätia snímačového odporu na zmene pôsobiaceho tlaku. Z obrázku je zrejماً lineárna závislosť tejto zmeny.



Obr.4. Závislosť zmeny napätia na senzore na tlaku.

Táto lineárna zmena platí pre nízke hodnoty tlaku. Merania poukázali, že od hodnoty tlaku $p > 4 \text{ kPa}$ sa lineárna závislosť mení na nelineárnu a od hodnoty $p > 10 \text{ kPa}$ sa snímač tlaku mení na „tlakový spínač“, ktorý rozoznáva dve hodnoty zopnutý a rozopnutý.

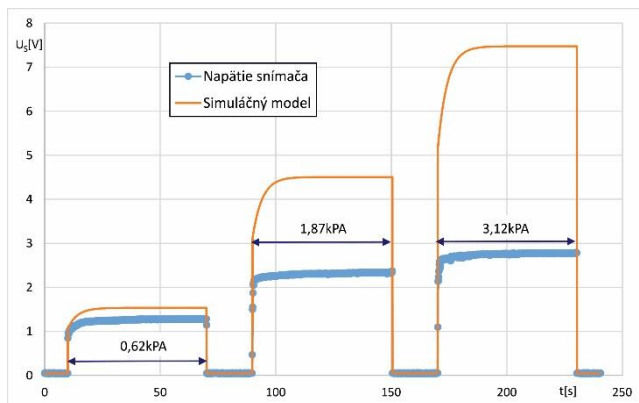
Prvotné testy s materiálom podľa výsledkov na obrázku 3 ukázali na pomerne krátky relaxačný čas ($T_{\text{response}} \approx 8 \text{ s}$), čo malo vplyv na podmienky vykonania skúšky pre overenie a určenie parametrov viskoelastického modelu (k_p , k_e , T_{response}):

- 20 sekundové meranie bez záťaže,
- 60 sekundové meranie so záťažou.

Tento postup sa viackrát opakoval. Boli použité tri rozdielne tlaky: 0,62 kPa; 1,87 kPa; 3,12 kPa. Z nameraných dát meraní sa určili jednotlivé parametre, ktorých priemerné hodnoty sa použili pre výpočet simulácie viskoelastického modelu. Použité parametre mali tieto hodnoty:

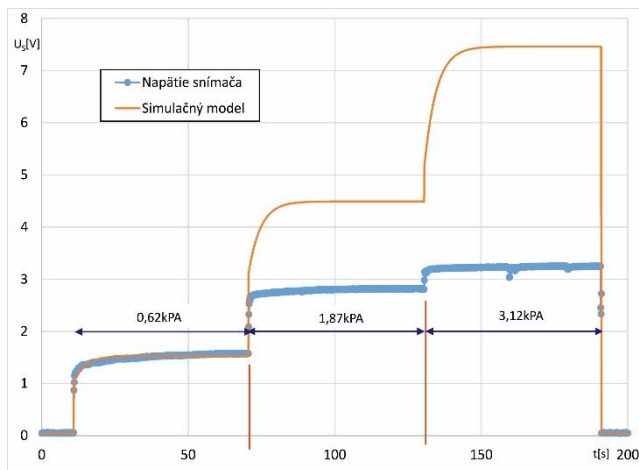
$$k_p = 1,64; k_e = 0,736; T_{\text{response}} = 4,1 \text{ s.}$$

Na obrázku 5, 6 a 7 sú zobrazené priebehy zmeny napätia na senzore v závislosti na zmene tlaku a súčasne je zobrazený aj priebeh simulácie. Z obrázkov je zrejmé, že simulácia sa zhoduje s nameranými hodnotami len pre hodnotu tlaku 0,62 kPa.

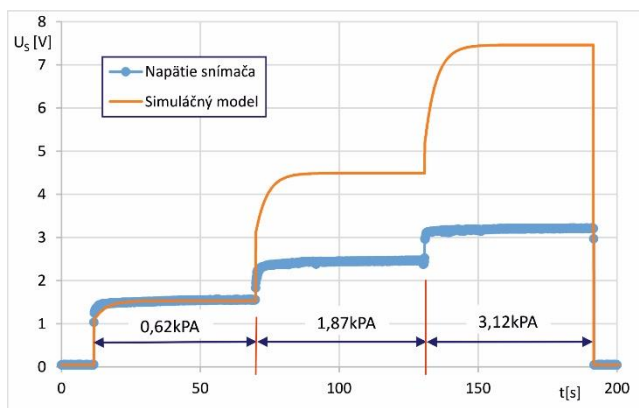


Obr.5. Závislosť zmeny napätia na senzore na tlaku.

Pri vyšších tlakoch je priebeh simulácie podstatne odlišný, čo môže byť spôsobené zmenou elastických vlastností použitej vzorky Velostatu.



Obr.6. Závislosť zmeny napätia na senzore na tlaku.



Obr.7. Závislosť zmeny napätia na senzore na tlaku.

Na obrázku 6 a 7 sú zobrazené priebehy, z ktorých je zrejma odlišnosť v hodnotách napätia pri tlaku 1,87 kPa. Takáto odlišnosť v hodnotách napätia bola nameraná aj pri iných hodnotách tlaku, ktoré nie sú prezentované graficky.

Záver

Flexibilné snímače sily sa vyvíjajú a testujú najmenej 20 rokov, ale o ich presnosti a opakovateľnosti sa vedie diskusia. Z vykonaných meraní vyplýva, že opakovateľnosť je jedným z hlavných problémov flexibilných senzorov (čo je zrejme z obrázkov 6 a 7). Problém sa dá čiastočne odstrániť pomocou priemerovania výsledkov, no signál by mal vykazovať určitú periodicitu. Vplyv na opakovateľnosť flexibilných senzorov má vlastnosť podložky, ktorá tvorí referenčnú „hodnotu“ pri pomernom snímaní tlaku.

Flexibilné snímače by sa mali používať v konfigurácii matice, ktorá by pokrývala celú oblasť, na ktorej sa má pôsobiť tlak vyhodnocovať.

Namerané výsledky ukazujú, že merať absolútny tlak flexibilným snímačom by mohlo byť veľmi problematické. V aplikáciách, v ktorých sú kľúčové informácie o priestorových zmenách pôsobenia sily, je ich možné využiť. Zlá opakovateľnosť merania tejto snímačovej technológie je jedným z dôvodov prečo sa nepoužíva pre komerčné zariadenia na snímanie sily.

Literatúra

- [1] D. Giovanelli, E. Farella. Force Sensing Resistor and Evaluation of Technology for Wearable Body Pressure Sensing. In Journal of Sensors, Volume 2016, Article ID93991850, 13 pages, Hindawi.
- [2] L.Wang, J. Li, and Y. Han, "Aprototype of piezoresistive fringe-electrodes-element based on conductive polymer composite," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 61, no. 1, pp. 129–135, 2014.
- [3] M. Benocci, E. Farella, and L. Benini, "A context-aware smart seat," in *Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI '11)*, pp. 104–109, IEEE, Savelletri di Fasano, Italy, June 2011.

Podakovanie



Európska únia



Európska únia

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku. Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

Autor: Ľubomír Livovský, Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: lubomir.livovsky@tuke.sk