

Verifikácia výstupných parametrov elastomagnetického snímača tlakovej sily

A. Hodulíková

¹ Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU v Košiciach, Letná 9, Košice

E-mail : anna.hodulikova@tuke.sk

Anotace:

V prvej časti článok popisuje využitie elastomagnetického javu v elastomagnetických snímačoch tlakovej sily (EMS). V druhej časti je článok zameraný na verifikáciu výstupného signálu (napätia) a výstupného užitočného signálu (napätia) EMS s cieľom zistiť, či hodnoty magnetickej indukcie, ktoré sme získali simuláciou 3D modelu EMS v prostredí COSMOEMS a použili pre výpočet výstupných parametrov, korešpondujú s experimentálnymi výsledkami.

In its first part, the article describes the utilization of elastomagnetic phenomena in elastomagnetic sensors of pressure force (EMS). The second part of the article is focused on output signal (voltage) and output effective signal (voltage) verification of EMS, in order to determine whether the values, of magnetic induction obtained via 3D model of EMS in COSMOS environment (which were used for output values calculation) are on par with experimental results.

ÚVOD

Snímače sú v súčasnosti rozšírené stále viac a viac. Je to predovšetkým ich využitím v priemyselnej a civilnej automatizácii. Avšak návrh lacného a presného snímača žiada množstvo teoretických a experimentálnych znalostí v oblasti elektroinžinierstva a materiálového inžinierstva. Snímače predstavujú najdôležitejší článok meracieho reťazca. Je nimi limitovaná celková presnosť merania, preto sú na ne kladené stále vyššie nároky na presnosť.

V meraniach veľkých tlakových síl alebo vo funkcii ochrany proti mechanickému preťaženiu – napr. v lisoch na ochranu lisovacej matice alebo ako indikátor otupenia lisovacieho nástroja majú uplatnenie elastomagnetické snímače (EMS). Ďalej sa môžu uplatniť pri meraní valcovacích síl, meraní síl v podperách mostov alebo pri hrubom vážení železničných vozňov a pod. [1].

Výhodou EMS je ich relatívne veľká citlivosť a možnosť použitia výstupnej veličiny bez potrebného zosilnenia signálu. Oproti iným snímačom sú síce mohutnejšie, ale ich tvar a stavba zároveň zaručujú lepšie mechanické vlastnosti, odolnosť voči preťaženiu, vzdušnej vlhkosti, prachu, otrasom a vibráciám.

Nevýhodou týchto snímačov je vyššia spotreba elektrickej energie a taktiež chyby snímača.

Prezentovaný článok sa zaoberá zhodnotením efektívnych hodnôt výstupných parametrov (napätí) EMS za účelom zistenia, či hodnoty magnetickej indukcie, ktoré boli získané numerickým riešením

magnetického poľa v jadre nezaťaženého a zaťaženého snímača, a použité k výpočtu výstupného signálu (napätia) sú v súlade s experimentálnymi výsledkami – nameranými efektívnymi hodnotami výstupného signálu (napätia).

ELASTOMAGNETICKÝ SNÍMAČ

Elastomagnetický jav

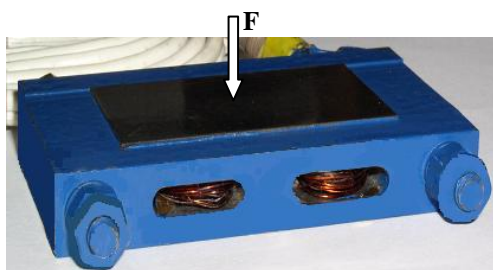
Elastomagnetický jav, ktorý bol spozorovaný Villarim už v roku 1865, sa vo feromagnetickej látke prejavuje nasledovne: ak na teleso (jadro) danej látky pôsobí vonkajšia sila, jadro sa deformuje. Následkom deformácie sa zmenia vzájomné vzdialenosti atómov v kryštalickej mriežke feromagnetika, čo spôsobí zmenu hodnoty výmenných síl vyvolávajúcich spontánnu magnetizáciu v jednotlivých doménach feromagnetickej látky. Navonok sa táto skutočnosť prejaví ako zmena magnetickej polarizácie, resp. magnetickej indukcie pri nezmenenej intenzite magnetickeho poľa pôsobiaceho na feromagnetickú látku, čiže dochádza k zmene jej magnetických vlastností. Ak pred účinkom sily bola daná látka izotropná, stáva sa anizotropnou, ak bola anizotropnou, mení sa jej anizotropia. Keďže navonok magnetické vlastnosti reprezentuje permeabilita, tá sa bude meniť v závislosti od pôsobiacej sily. Závislosť zmeny permeability $\Delta\mu$ od mechanického napätia σ popisuje nasledovný vzťah odvodený z termodynamickej rovnováhy vo feromagnetiku [2]

$$\Delta\mu = \frac{2\lambda_{ms}\mu^2}{B_{sef}^2} \cdot \sigma = k_M \cdot \sigma \quad (1)$$

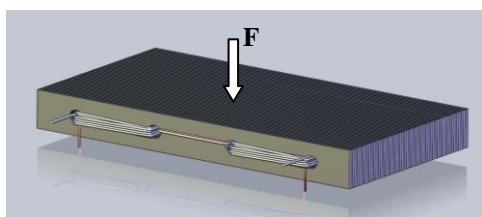
kde λ_{ms} je stredná hodnota koeficientu magnetostrikcie v nasýtení, μ je permeabilita feromagnetika ak pôsobiaca sila je nulová, B_{sef} je efektívna hodnota magnetickej indukcie v nasýtení, k_M predstavuje materiálový koeficient. Vzťah (1) platí pre prípad, ak smer mechanického napätia a intenzity magnetickeho poľa sú rovnobežné. Zo vzťahu (1) ďalej vyplýva, že pre elastomagnetické snímače je výhodné použiť také materiály, ktoré majú veľkú permeabilitu μ , veľkú hodnotu koeficientu magnetostrikcie pri nasýtení λ_s a zároveň malú magneticú indukciu pri nasýtení B_s .

Elastomagnetický snímač tlakovej sily 120kN

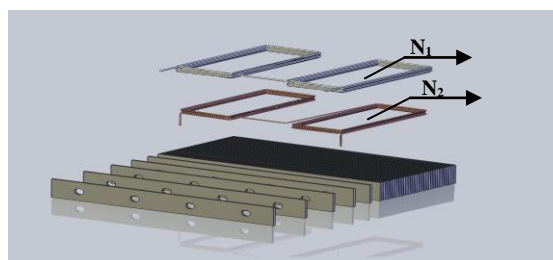
Funkcia elastomagnetického snímača tlakovej sily je založená na existencii elastomagnetického javu, ktorý sa prejavuje v telesách zhotovených z feromagnetických materiálov pri pôsobení mechanického napätia spôsobeného vonkajšou silou. Praktické vyhotovenie EMS tlakovej sily 120kN, ktorá odpovedá tlaku 100MPa (Obr. 1), geometrický počítačový model (Obr. 2), je transformátorového typu. Vinutia sú uložené v jednej rovine kolmo na smer pôsobiacej sily. Jadro snímača je zložené z 50 lamiel z transformátorového plechu Et 2,6 hrúbky 0,5mm. V štyroch otvoroch jadra je vedľa seba paralelne uložené primárne, z $N_1 = 10$ závitov medeného smaltovaného drôtu priemeru 0,35mm, a sekundárne vinutie, z $N_2 = 8$ závitov medeného opradeného drôtu priemeru 0,25 – 0,3mm, v rovnakom smere (Obr. 3).



Obr. 1: Elastomagnetický snímač tlakovej sily 120kN



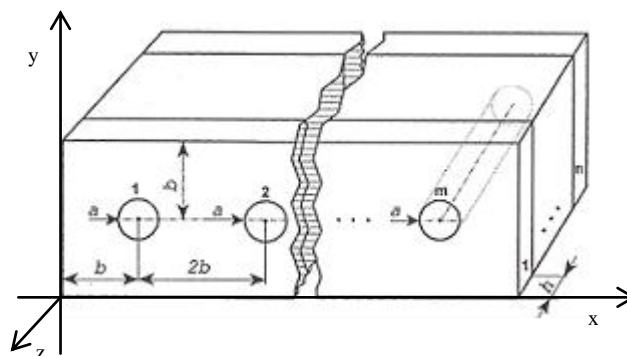
Obr.2: Počítačový model EMS 120kN



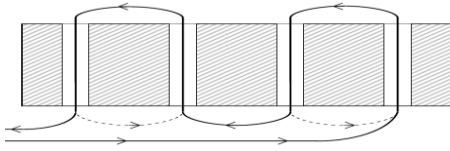
Obr. 3: Návrh lamiel a vinutí EMS 120kN

Každý snímač môžeme definovať ako zariadenie na spracovanie informácie viazanej na niektorý druh energie. V prípade elastomagnetického snímača je meraná veličina tlak a sekundárnym nositeľom informácie je výstupné napätie U_v . Výstupný signál zo snímača je vlastne úmerný zmene permeability a tým aj deformácii magnetickeho poľa.

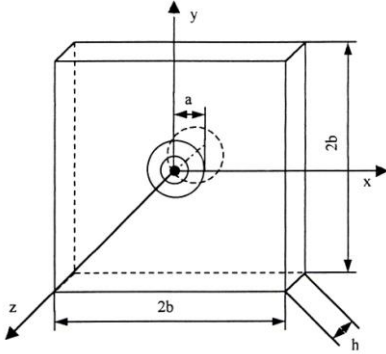
Jadro snímača, zhotovené z tenkých obdĺžnikových lamiel hrúbky $h = 0,5\text{mm}$, (Obr. 3), s n rovinami kolmými na smer vodičov, má tvar kvádra. Po zavedení pravouhlého súradnicového systému bude priestorové usporiadanie magnetickeho poľa snímača závisieť iba od súradníc x, y a nebude závisieť od súradnice z , rovnobežnej s vodičom (Obr. 4, Obr. 5). Rozmerovo sú lamely navrhnuté tak, aby ich bolo možné rozdeliť na m štvorcových útvarov so stranou $2b$ s jedným kruhovým otvorom. Stred otvoru je stredom štvorca. Jeden takýto štvorcový útvar pomenujeme *integračný prvok* jadra snímača (Obr. 6). Prítomnosť takéhoto útvaru nám umožňuje redukovať riešenie magnetickeho poľa snímača na vyšetrenie magnetickeho poľa v integračnom prvku, vybudeneho prúdom, ktorý tečie vinutím N_1 . Riešenie magnetickeho poľa elastomagnetického snímača nezaťaženého i zaťaženého v rovine (x, y) je technický problém. Nakoľko je jadro snímača zhotovené z feromagnetického materiálu, riešenie magnetickeho poľa snímača je riešením okrajovej úlohy pre vektorový magnetický potenciál v nelineárnom prostredí s využitím vhodného nástroja.



Obr. 4: Zjednodušený náčrt EMS 120kN



Obr. 5: Uloženie vinutí v otvoroch jadra EMS a smer prúdu vo vinutí



Obr. 6: Integrovaný prvok EMS

VZŤAH MEDZI VSTUPNÝM A VÝSTUPNÝM PARAMETROM EMS TLAKOVEJ SILY

Vstupným parametrom (signálom) snímača je vonkajšia tlaková sila pôsobiaca na snímač a výstupným parametrom (signálom) je efektívna hodnota napätia, ktoré sa indukuje v sekundárnom (snímacom) vinutí snímača. Pri vyjadrení napätia na výstupe snímača vychádzame z indukčného zákona. Napätie sa bude indukovať v prípade, ak celý magnetický tok obopne sekundárny vodič. Túto požiadavku je možné splniť vtedy, ak sekundárne vinutie bude navinuté otvorami primárneho vinutia. Zároveň sa v týchto otvoroch zanedbajú rozptylové toky vzduchom.

V prípade, že na snímač nepôsobí vonkajšia tlaková sila, indukované napätie $u_v(t)$ vyjadríme v tvare:

$$u_v(t) = -N_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_S \mathbf{B}(t) \cdot d\mathbf{S} \right], \quad (2)$$

kde N_2 je počet závitov sekundárneho vinutia, $\mathbf{B}(t)$ je magnetická indukcia v jadre snímača bez pôsobenia tlakovej sily v čase t , $d\mathbf{S}$ je normála na element plochy, S je plocha prierezu jadra snímača.

V prípade, že na snímač pôsobí vonkajšia tlaková sila, indukované napätie $u_v^F(t)$ vyjadríme v tvare:

$$u_v^F(t) = -N_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_S \mathbf{B}^F(t) \cdot d\mathbf{S} \right], \quad (3)$$

kde $\mathbf{B}^F(t)$ je magnetická indukcia v jadre snímača pri pôsobení tlakovej sily v čase t .

Z metrologického hľadiska je vhodné, aby výstupný signál bol úmerný vstupnému. Keďže v prípade nulovej sily bude výstupný signál nenulový, bude vhodnejšie určiť len rozdiel napätia $\Delta u_v(t)$ medzi napätím pri zaťažení snímača $u_{v(p \neq 0)}^F(t)$ a v stave nezaťaženom $u_{v(p=0)}(t)$. Ak koeficient magnetostríckie zvoleného feromagnetiká bude kladný, výstupné napätie so stúpajúcim tlakom bude klesať a $\Delta u_v(t)$ (užitočný výstupný signál) bude nadobúdať záporné znamienko, preto užitočný výstupný signál (napätie) $\Delta u_v(t)$ vyjadríme ako rozdiel napätí pri pôsobení a bez pôsobenia tlakovej sily na snímač v tvare:

$$\Delta u_v(t) = \left| u_v^F(t) - u_v(t) \right| = \left| -N_2 \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_S \mathbf{B}^F(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S} \right] - \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_S \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S} \right] \right\} \right| \quad (4)$$

Magnetické pole v jadre snímača je vybudené harmonickým prúdom $i_1(t) = I_m \sin \omega t$ [A], kde I_{m1} je maximálna hodnota prúdu $i_1(t)$, $\omega = 2\pi f$ je uhlová frekvencia časových zmien napájacieho prúdu, ktorý prechádza primárnym vinutím snímača. Potom aj magnetická indukcia a výstupný signál (napätie) majú časovo premenný priebeh.

Na mieste je otázka, ktorú z hodnôt časovo premenného priebehu výstupného napätia merať. Z praktických meraní vyplynulo, že pôjde o efektívnu hodnotu výstupného napätia.

Pri vyjadrení efektívnej hodnoty výstupného napätia snímača bude vhodné vychádzať zo zjednodušujúceho predpokladu, že priebeh magnetickej indukcie snímača je tiež harmonický. a pre efektívnu hodnotu napätia U_{vef} a ΔU_{vef} napätia $u_v(t)$ platí:

$$U_{\text{vef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_v^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ -N_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_S \mathbf{B}(t) \cdot d\mathbf{S} \right] \right\}^2 dt} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{vef}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta u_v^2 dt} = \\ &= N_2 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_S \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{B}(t) - \mathbf{B}^F(t)) \cdot d\mathbf{S} \right]^2 dt} \quad (6) \end{aligned}$$

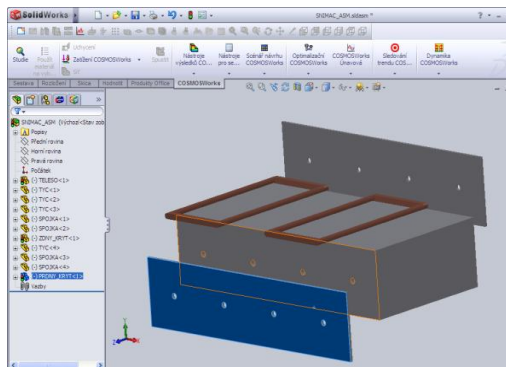
Výstupným signálom snímača je efektívna hodnota napätia meraná voltmetrom.

Zo vzťahov (5) a (6) vyplýva, že pre určenie efektívnej hodnoty výstupného signálu a výstupného užitočného signálu je potrebné poznať hodnotu magnetickej indukcie, ktorú získame riešením magnetického poľa elastomagnetického snímača.

Výstupný signál snímača je vlastne úmerný zmene permeability a tým aj deformácii magnetického poľa.

RIEŠENIE MAGNETICKÉHO POĽA V JADRE EMS

Pre riešenie stacionárneho magnetického poľa v jadre snímača, vyvolané harmonickým prúdom, bol vytvorený zjednodušený model EMS (Obr.8) z feromagnetického materiálu (jadro snímača) a primárneho vinutia cievok.

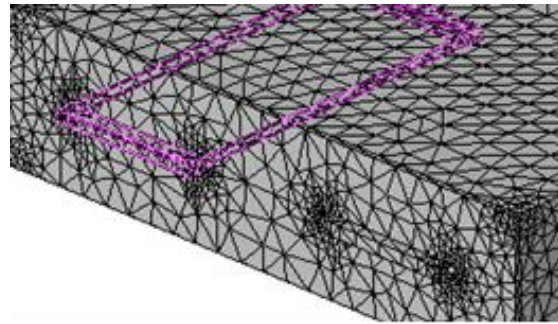


Obr.8: Zjednodušený model EMS

Riešenie nelineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc eliptického typu bolo v prostredí COSMOSEMS realizované Newton – Raphsonovou iteračnou metódou, pre ktorú je stanovené kritérium konvergencie - 0,005 a maximálny počet iterácií – 25. Pre vygenerovanú sieť s počtom uzlov 56 665 a 115 428 trojuholníkov (Obr.9) sme pri 8 iterácii docieli zvyškovú chybu $7,156815 \cdot 10^{-5}$.

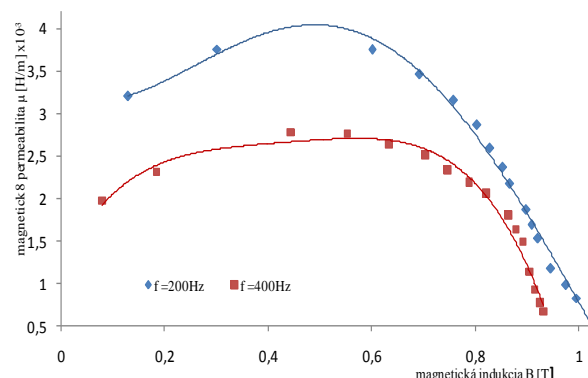
Úloha bola riešená ako magnetostatický problém pre vybranú hodnotu prúdu $I_{1max} = 1A$ v nelineárnom prostredí pre prípad, ak na snímač nepôsobí vonkajšia tlaková sila a pre prípad, že na snímač pôsobí vonkajšia tlaková sila.

Napájací harmonický prúd bol nahradený okamžitými hodnotami prúdov určenými v čase Δt_i , kde $i = k-1$, pre $k = 1,2,3,\dots,41$, ktoré kopírujú sínusový priebeh harmonického prúdu za dobu jednej periódy T.



Obr. 9: Trojuholníková sieť

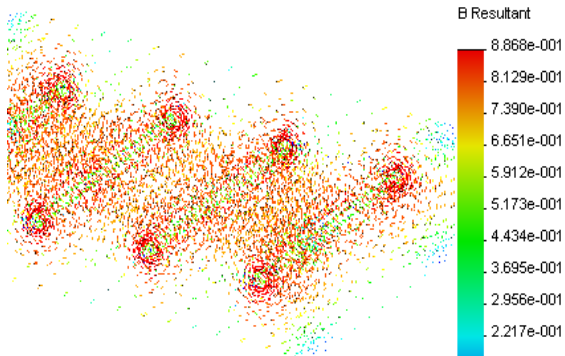
Pre potreby magnetostatickej analýzy bolo potrebné odmerať magnetizačnú krivku pre feromagnetický materiál (transformátorový plech), z ktorého sú lamely tvoriace jadro snímača zhotovené. Meranie hodnôt pre magnetizačné krivky bolo realizované Epsteinovým prístrojom pre frekvencie $f = 200$ a 400 Hz. Z nameraných a vypočítaných hodnôt sme vyhotovili grafické priebehy $\mu = f(B)$, ktoré sú na (Obr. 10).



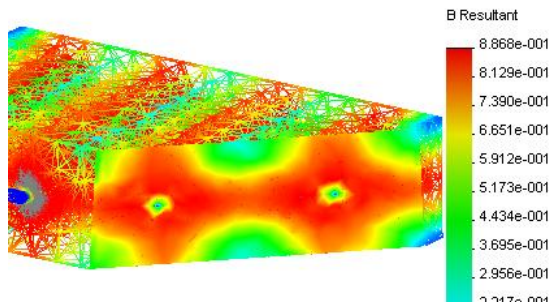
Obr.10: Grafické priebehy $\mu = f(B)$ pre $f = 200, 400$ Hz

Na Obr.11, Obr.12, Obr.13, Obr.14, Obr.15 a Obr.16 je znázornené rozloženie magnetického poľa získané jeho riešením v jadre snímača v závislosti od pôsobiacej sily pri prúdovej hustote $J_1 = 10,394$ A/mm² vo vodičoch primárneho vinutia a frekvencii napájacieho prúdu $f = 400$ Hz. Ak porovnáme farebné zobrazenie rozloženia magnetického poľa, výsledok simulácie, keď na jadro snímača nepôsobí vonkajšia tlaková sila so zobrazením pri pôsobení vonkajšej tlakovej sily, vidíme, že dochádza k farebnej zmene rozloženia poľa. Pri porovnaní farieb zobrazených polí s farebnou stupnicou hodnôt magnetickej indukcie, zisťujeme pokles hodnôt magnetickej indukcie. Z uvedených výsledkov

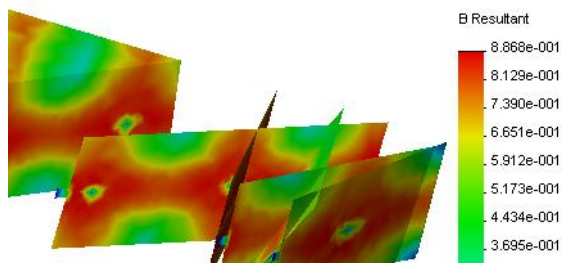
vyplýva, že s rastúcou tlakovou silou hodnota magnetickej indukcie sa výrazne znižuje, dochádza k deformácii magnetickeho poľa a teda zmene magnetických vlastností jadra, čo má za následok aj zmenu magnetickej permeability



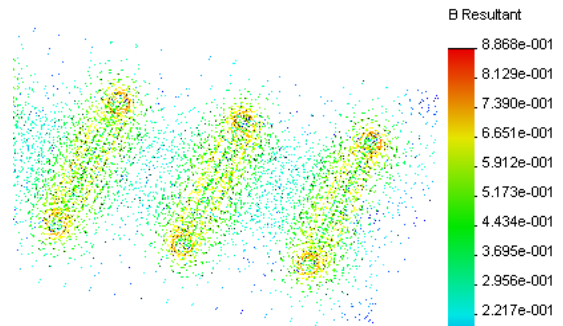
Obr.11: Rozloženie vektora magnetickej indukcie, $F = 0\text{kN}$



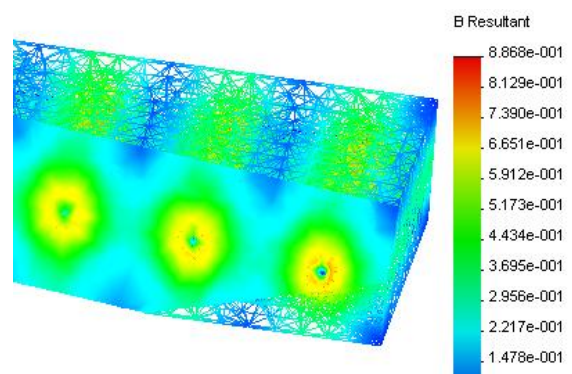
Obr.12: Rozloženie magnetickej indukcie v jadre EMS, $F = 0\text{kN}$



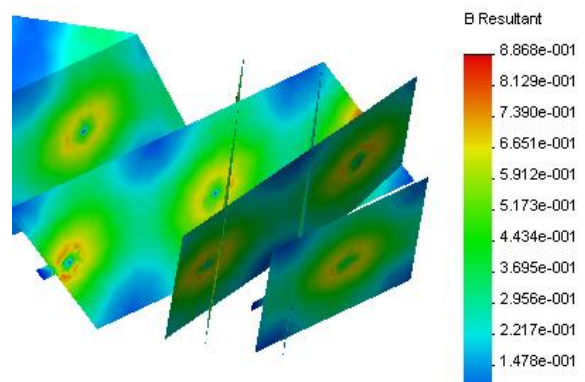
Obr.13: Rozloženie magnetickej indukcie v jadre EMS (section 6), $F = 0\text{kN}$



Obr.14: Rozloženie vektora magnetickej indukcie, $F = 120\text{kN}$

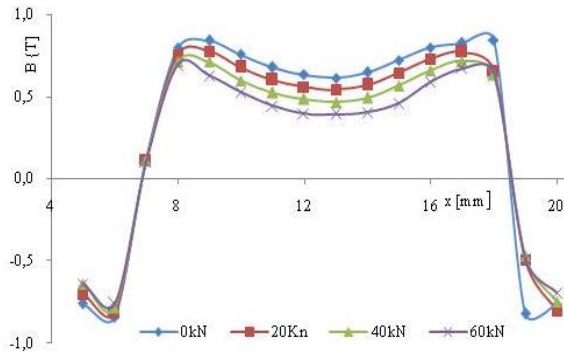


Obr.15: Rozloženie magnetickej indukcie v jadre EMS, $F = 120\text{kN}$

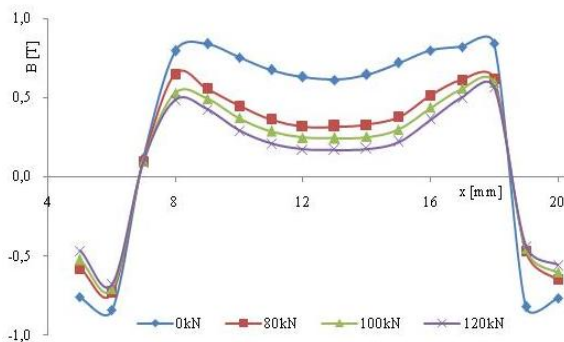


Obr.16: Rozloženie magnetickej indukcie v jadre EMS (section 6), $F = 120\text{kN}$

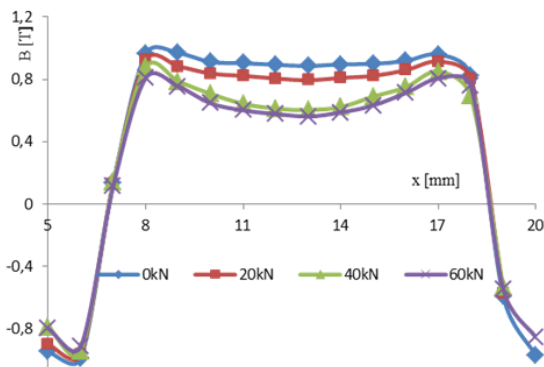
Grafy na Obr.17, Obr.18, Obr.19, Obr.20 nám potvrdzujú nielen vyššie uvedené závery, ale zároveň vidíme, že veľkosť magnetickej indukcie klesá aj s rastúcou hodnotou frekvencie .



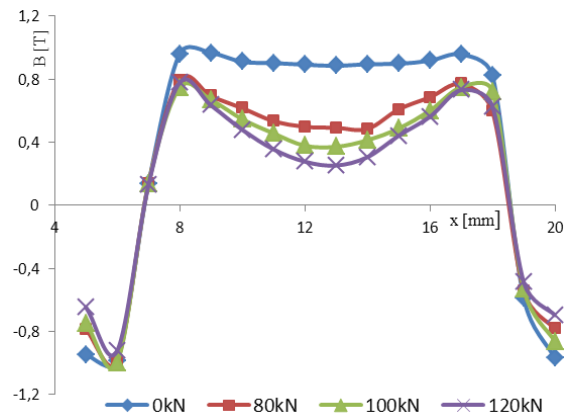
Obr. 17: Priebeh magnetickej indukcie pri pôsobení tlakovej sily $F = 0, 20, 40, 60 \text{ kN}$ pre $f = 400 \text{ Hz}$



Obr. 18: Priebeh magnetickej indukcie pri pôsobení tlakovej sily $F = 0, 80, 100, 120 \text{ kN}$ pre $f = 400 \text{ Hz}$



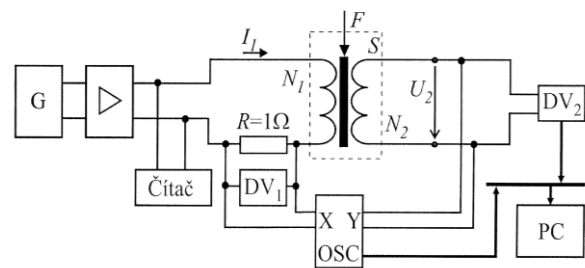
Obr. 19: Priebeh magnetickej indukcie pri pôsobení tlakovej sily $F = 0, 20, 40, 60 \text{ kN}$ pre $f = 200 \text{ Hz}$



Obr. 20: Priebeh magnetickej indukcie pri pôsobení tlakovej sily $F = 0, 80, 100, 120 \text{ kN}$ pre $f = 200 \text{ Hz}$

VERIFIKÁCIA VYPOČÍTANÝCH A EXPERIMENTÁLNYCH HODNÔT VÝSTUPNÉHO SIGNÁLU A UŽITOČNÉHO VÝSTUPNÉHO SIGNÁLU

Pre meranie efektívnej hodnoty výstupného signálu snímača bol zostavený merací systém, ktorého schéma zapojenia je na Obr.21 pozostávajúci z generátora harmonického signálu (G), zesilovača (\triangleright), digitálneho voltmetra (DV_1) merajúceho napätie U_1 na rezistore R , digitálneho voltmetra (DV_2) merajúceho napätie U_2 (U_v) na výstupe, osciloskopu (OSC), samotného snímača (S) a hydraulického lisu (F).



Obr.21: Merací systém pre meranie výstupného signálu (napätia)

Efektívne hodnoty výstupného napätia a užitočného signálu snímača, úmerné pôsobiacej sile, boli vypočítané pomocou vzťahov (5) a (6) a porovnané s experimentálnymi hodnotami. Prezentácia vypočítaných a experimentálnych hodnôt je uvedená v tabuľkovej (Tab.1, Tab.2, Tab.3 a Tab.4) a grafickej (Obr.22, Obr.23, Obr.24 a Obr.25) forme.

Tab. 1: Vypočítané a namerané hodnoty výstupného signálu snímača, $f = 400\text{Hz}$

F [kN]	U_v [mV] vypočítané	U_v [mV] experimentálne
0	1609	1620
20	1523	1540
40	1428	1435
60	1324	1304
80	1171	1172
100	1036	1046
120	928	929

Tab. 2: Vypočítané a namerané hodnoty užitočného výstupného signálu snímača, $f = 400\text{Hz}$

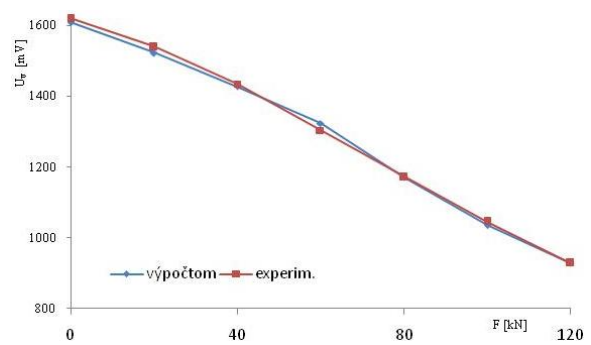
F [kN]	ΔU_v [mV] vypočítané	ΔU_v [mV] experimentálne
0	0	0
20	86	80
40	181	185
60	285	316
80	438	448
100	573	574
120	681	691

Tab. 3: Vypočítané a namerané hodnoty výstupného signálu snímača, $f = 200\text{Hz}$

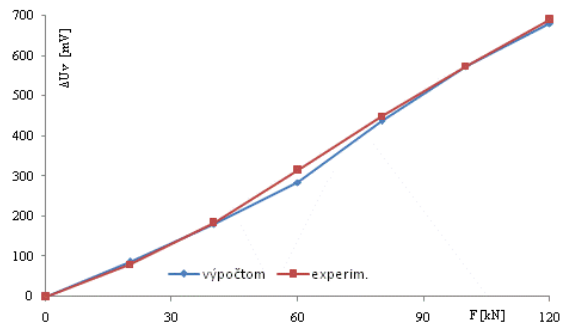
F [kN]	U_v [mV] vypočítané	U_v [mV] experimentálne
0	828	840
20	738	754
40	654	661
60	547	537
80	462	464
100	398	407
120	358	359

Tab. 4: Vypočítané a namerané hodnoty užitočného výstupného signálu snímača, $f = 200\text{Hz}$

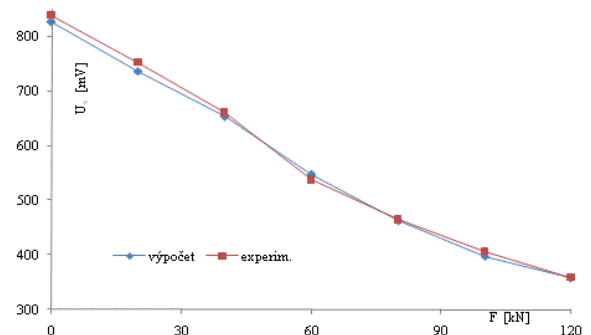
F [kN]	ΔU_v [mV] vypočítané	ΔU_v [mV] experimentálne
0	0	0
20	90	86
40	174	179
60	280	302
80	365	375
100	430	433
120	469	480



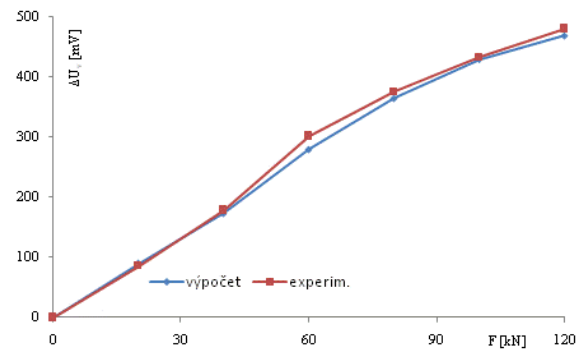
Obr. 22: Grafická závislosť hodnôt výstupného signálu od pôsobiacej sily pre $f = 400\text{Hz}$



Obr. 23: Grafická závislosť hodnôt výstupného užitočného signálu od pôsobiacej sily pre $f = 400\text{Hz}$



Obr. 24: Grafická závislosť hodnôt výstupného signálu od pôsobiacej sily pre $f = 200\text{Hz}$



Obr. 25: Grafická závislosť hodnôt výstupného užitočného signálu od pôsobiacej sily pre $f = 200\text{Hz}$

ZÁVER

V článku bol verifikovaný vzťah medzi vstupným a výstupným parametrom elastomagnetického snímača tlakovej sily 120kN. Hodnoty výstupných parametrov závisia od magnetickej indukcie, preto pre riešenie magnetického poľa v jadre snímača bol použitý model EMS v prostredí COSMOSEMS. Zo získaných hodnôt a priebehov magnetickej indukcie sa potvrdilo, že s rastúcou tlakovou silou klesá magnetická indukcia v jadre snímača, a teda aj výstupný signál (napätie) získaný výpočtom a experimentálne. Porovnaním vypočítaných a experimentálnych hodnôt boli získané rozdiely výsledkov, ktoré vznikli pri výpočte výstupných parametrov. Rozdiely sú spôsobené zavedením zjednodušujúceho predpokladu, že priebeh magnetickej indukcie v čase je harmonický a permeabilita materiálu v jadre snímača je konštantá. V skutočnosti však permeabilita závisí od magnetickej indukcie. Preto pole snímača je potrebné riešiť ako nestacionárne magnetické pole.

POĎAKOVANIE

Článok vznikol vďaka podpore slovenského grantového projektu KEGA No. 005TUKE-4/2012.

LITERATURA

- [1] A. Hodulíková, Computer simulation model of EMS of force to the PhD Thesis, Košice, 2012.
- [2] K. Zehnula, Sensors of Non-electric Quantities. Prague: SNTL, 1977.
- [3] D. Mayer, B. Ulrych, M. Škopek, Solution of electromagnetic fields using modern software products, Journal EE, vol 7, no1, 2, 2001.
- [4] D. Mayer, J. Polák, Elektrick and Magnetic Fields Solution Methods, Praha SNTL, 1983,456 p.
- [5] J. Vojtko, I. Kováčová, L. Madarása, Neural Network Linearization of Pressure Force Sensor Transfer Characteristic, Acta Polytechnica Hungarica vol. 3, no. 2, 2006, pp 5-15
- [6] I. Tomčíková, D. Kováč, I. Kováčová, Stress field distribution in magnetoelastic pressure force sensor // Communications. – 2010. – № 14. – PP. 16-19.
- [7] I. Tomčíková, D. Špaldonová, Elastomagnetic Sensor Field Determinati Using Matlab, Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 7, No. 3, 2007, pp. 74-77, ISSN 1335-8243.