

Identifikácia vlastností potrubného stroja založeného na zotrvačnom krokovacom princípe

Michal Kelemen, Tatiana Maťašová

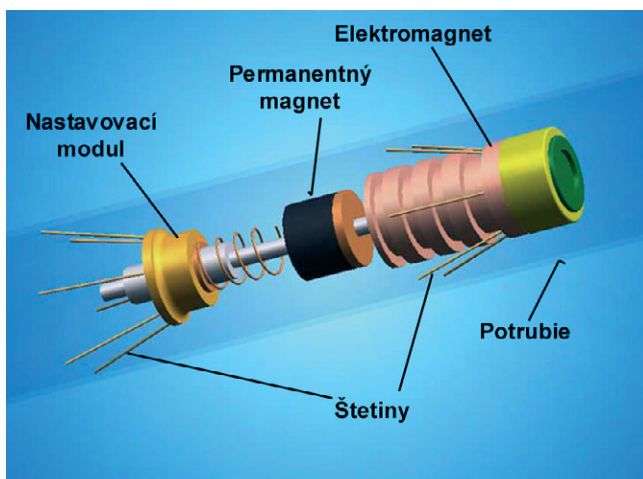
Úvod

Článok sa zaoberá problematikou identifikácie vlastností potrubného stroja Karolína (obr. 1). Pohybuje sa na zotrvačnom krokovacom princípe v potrubí s vnútorným priemerom 11 mm. Využíva energiu uvoľnenú počas zrážky dvoch telies, pričom jedno z telies je hnacie (permanentný magnet) a druhé hnané (elektromagnet) [1], [2], [3].

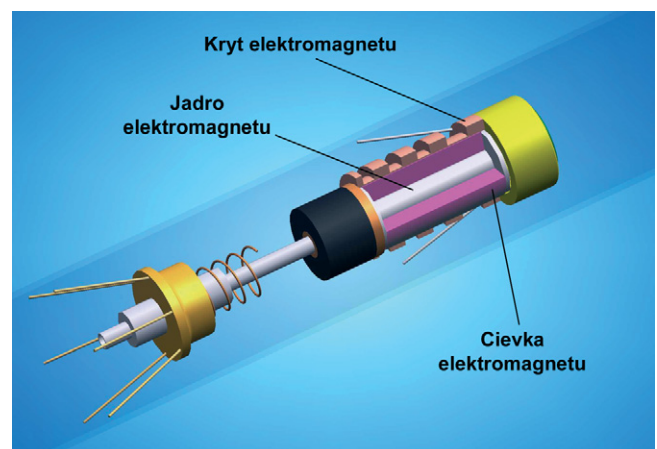
Elektromagnet je aktivovaný privedením prúdového pulzu, čím sa vytvorí v okolí elektromagnetu magnetické pole s opačnou polaritou, ako má permanentný magnet. Tým vznikne odpudivá sila medzi magnetom a elektromagnetom. V dôsledku pôsobenia tejto sily dôjde k pohybu magnetu smerom k pružine a k nasledovnému stlačeniu tejto pružiny.

Po ukončení trvania prúdového pulzu prestane pôsobiť odpudivá sila. V tomto okamihu na magnet pôsobí sila pružiny a príťažlivá sila medzi permanentným magnetom a jadrom deaktivovaného elektromagnetu (obr. 2). Permanentný magnet sa teda začne pohybovať smerom k nárazovej ploche elektromagnetu a spôsobí zrážku s elektromagnetom. Nárazová sila, ktorá tým vznikne, je väčšia ako trecia sila medzi štetinami a stenou potrubia, a teda mikrostroj sa začne pohybovať. Opakovaním tohto pohybového cyklu dôjde k celkovému pohybu mikrostroja vzhľadom na potrubie dopredu.

Cieľom tohto článku je opísať identifikáciu neznámych parametrov a závislosti, ktoré sú potrebné na kompletizáciu simulačného modelu. Takto doplnený simulačný model potom možno použiť na štúdium vlastností tohto potrubného stroja.



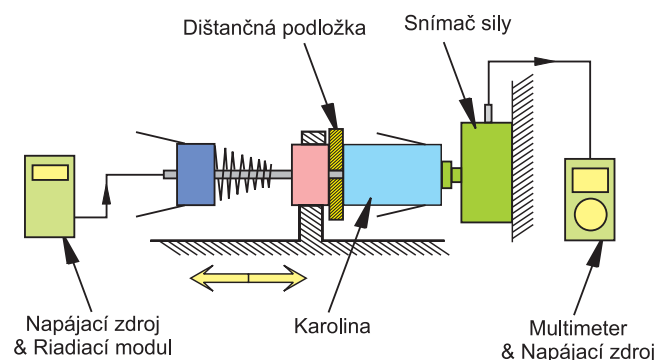
Obr.1 Potrubný stroj Karolína



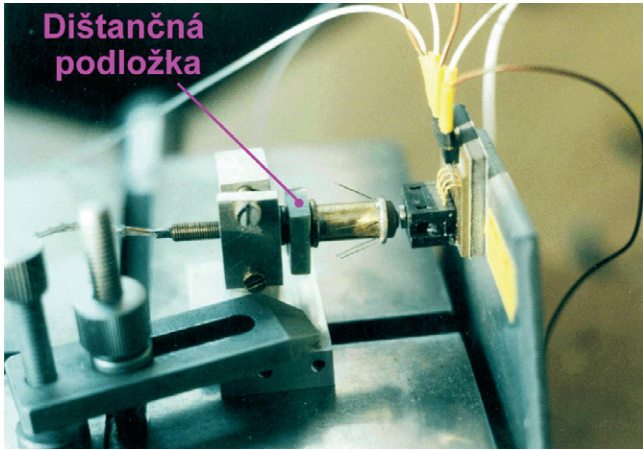
Obr.2 Konštrukcia elektromagnetu mikrostroja

1. Experimentálne určenie závislosti odpudivej sily elektromagnetu od permanentného magnetu na ich vzájomnej polohe

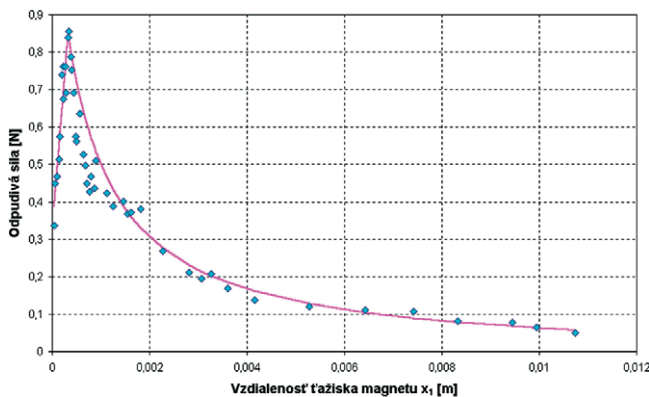
Na určenie tejto závislosti sa použila meracia sústava podľa obr. 3. Na snímanie odpudivej sily sa použil snímač sily s analógovým výstupom [4] a na nastavovanie vzdialenosti medzi magnetom a elektromagnetom sa použila sada dištančných podložiek (z neferomagnetických materiálov) s rôznymi hrúbkami (obr. 4). Permanentný magnet mikrostroja bol prichytený v stojančeku. Pred každým meraním boli vložené vhodne zostavené dištančné podložky a posuvom stolíka so stojančekom, v ktorom bol prichytený permanentný magnet, bol nastavený dotyk mikrostroja so snímačom sily. Pri meraní bola cievka elektromagnetu buďená kon-



Obr.3 Meracia sústava na meranie odpudivej sily magnetu od elektromagnetu



Obr.4 Detail prichytenia mikrostroja s vloženou dištančnou podložkou – meranie odpudivej sily elektromagnetu (pri vzdialenosti 4,16 mm magnetu od nárazovej plochy cievky)



Obr.5 Závislosť odpudivej sily magnetu od elektromagnetu v závislosti od ich vzájomnej vzdialenosti (polohy)

štantným prúdom (s hodnotou $1,6 \text{ A} \pm 0,1 \text{ A}$). Jednotlivými meraniami bola takto určená statická charakteristika odpudivej sily v závislosti od vzdialenosti magnetu od elektromagnetu (obr. 5). Praktická realizácia týchto meraní je dokumentovaná aj na obr. 4.

Na obr. 5 je zobrazená experimentálne určená závislosť odpudivej sily magnetu od elektromagnetu v závislosti od ich vzájomnej vzdialenosti. Maximálna hodnota (0,86 N) odpudivej sily je pri vzdialenosti 0,34 mm.

V oblasti $0 < x_1 < 0,34 \text{ mm}$ bola závislosť vyjadrená priamkou

$$F_O = 1578,8 \cdot x_1 + 0,3257 \quad (1)$$

V oblasti $x_1 > 0,34 \text{ mm}$ bol zvolený model odpudivej sily:

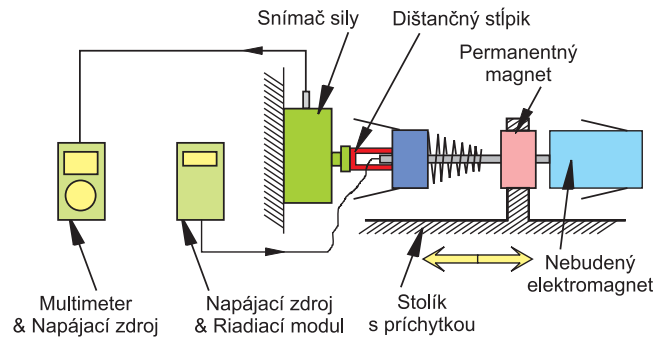
$$F_O = \frac{J_{OD}}{x_1^2 + 2 \cdot K_{OD} \cdot x_1 + L_{OD}} \quad r^2 = 0,97 \quad (2)$$

Neznáme koeficienty určené metódou najmenších štvorcov sú:

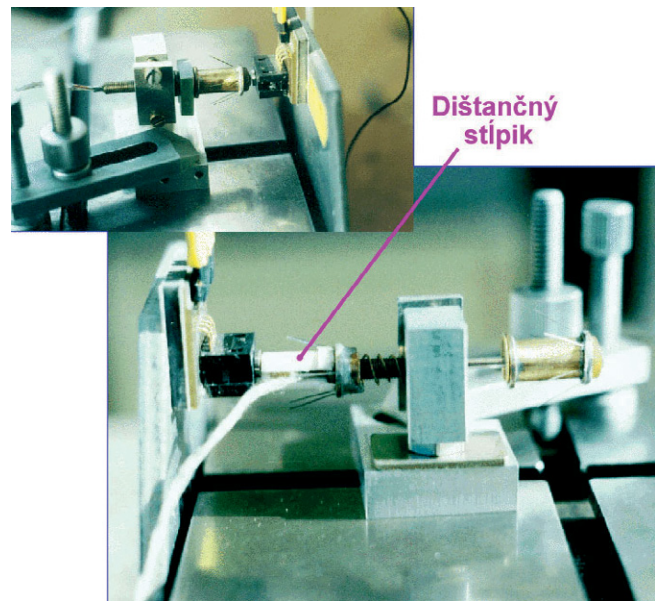
$$J_{OD} = 298 \cdot 10^{-7} \quad K_{OD} = 174 \cdot 10^{-4} \quad L_{OD} = 235 \cdot 10^{-7}$$

2. Experimentálne určenie závislosti príťažlivej sily medzi magnetom a jadrom cievky elektromagnetu od ich vzájomnej polohy

Na obr. 6 a obr. 7 je zobrazená meracia sústava na meranie príťažlivej sily medzi magnetom a nebudeným elektromagnetom (resp. jadrom elektromagnetu). Permanentný magnet mikrostroja bol prichytený v príchytke na dvojsúradnicovom meracom stolíku. Hnané teleso bolo prostredníctvom dištančného stĺpika opreté o snímač sily [4]. Nastavovanie vzdialenosti medzi magnetom a elektromagnetom sa realizovalo pomocou mikrometrického posuvu dvojsúradnicového meracieho X-Y stolíka, pričom sa súčasne snímala príťažlivá sila pomocou uvedeného snímača sily.



Obr.6 Meracia sústava na meranie príťažlivej sily medzi magnetom a nebudeným elektromagnetom



Obr.7 Detail prichytenia magnetu mikrostroja s opretím pomocou dištančného stĺpika – meranie príťažlivej sily medzi magnetom a jadrom nebudeného elektromagnetu

Obr. 8 zobrazuje nameranú charakteristiku, pričom maximálna hodnota príťažlivej sily (0,65 N) je pri vzdialenosti magnetu od jadra cievky s hodnotou 0,12 mm. Závislosť bola aproximovaná pre oblasť $0 < x_{1P} \leq 0,34$:

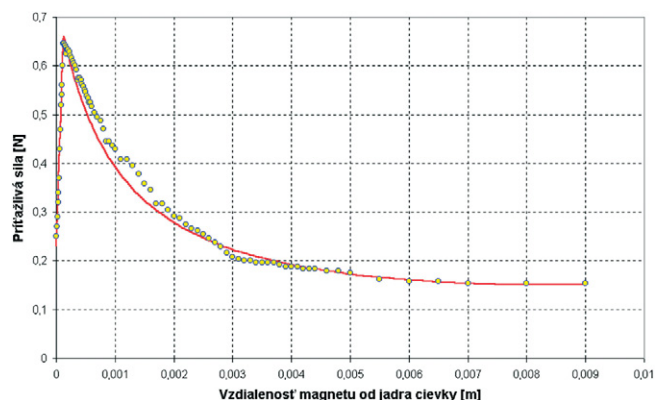
$$F_p = 3420,33 \cdot x_{1P} + 0,33 \quad (3)$$

a pre oblasť $x_{1P} > 0,12$ bol použitý rovnaký model ako pre odpudivú silu:

$$F_p = \frac{G_{PR}}{x_1^2 + 2 \cdot H_{PR} \cdot x_1 + I_{PR}} \quad (4)$$

kde

$$G_{PR} = -133 \cdot 10^{-7} \quad H_{PR} = -84 \cdot 10^{-4} \quad I_{PR} = -179 \cdot 10^{-7}$$



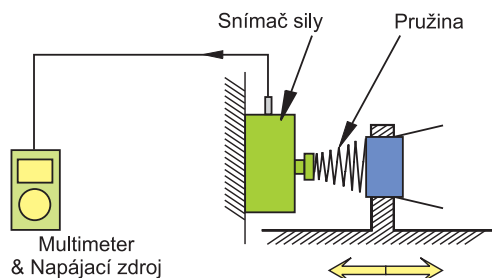
Obr.8 Závislosti príťažlivej sily magnetu od elektromagnetu od ich vzájomnej polohy

3. Meranie tuhosti pružiny nastavovacieho modulu

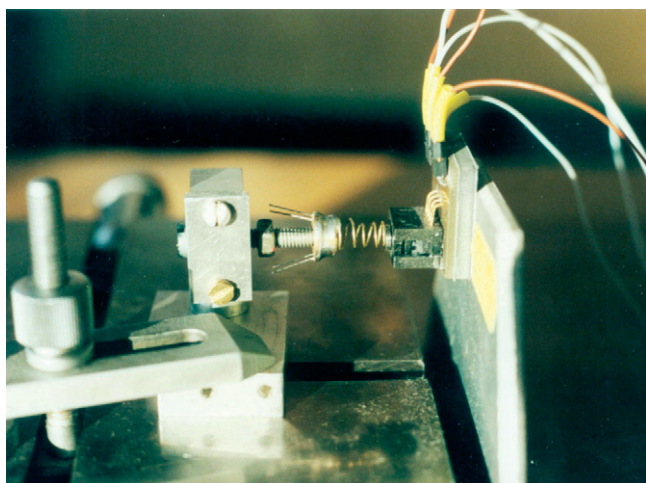
Na meranie tuhosti pružiny nastavovacieho modulu sa použil ten istý prípravok so snímačom sily [4] (obr. 9 a 10). Deformácia pružiny bola vyvodzovaná pomocou dvojsúradnicového meracieho stolíka, na ktorom bol prichytený nastavovací modul s pružinou opretou o snímač sily.

Meraním sa získala závislosť sily pružiny od jej deformácií (obr. 11). Táto závislosť bola aproximovaná polynómom druhého stupňa:

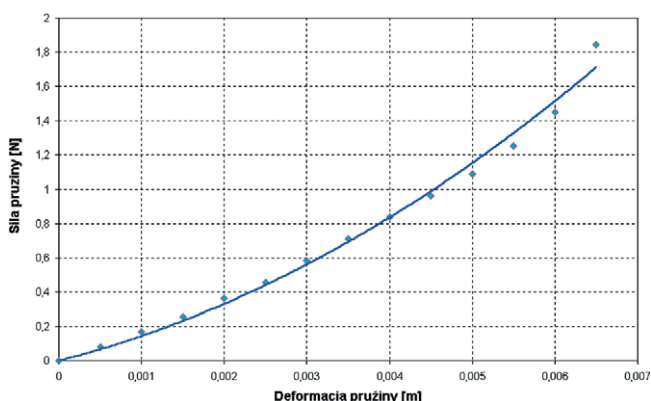
$$F_{PRUŽINY} = 21838 \cdot x_{PRUŽINY}^2 + 121,25 \cdot x_{PRUŽINY} \quad (5)$$



Obr.9 Meranie tuhosti pružiny nastavovacieho modulu



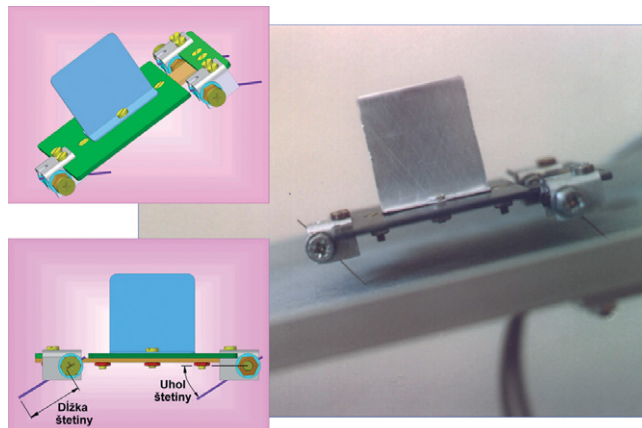
Obr.10 Detail prichytenia nastavovacieho modulu s pružinou



Obr.11 Závislosť sily pružiny od jej deformácií

4. Stanovenie trecej sily štetín voči stene potrubia

Riešený potrubný mikrostroj má na zabezpečenie silovej väzby so stenou potrubia sústavu štetín zloženú z dvoch skupín (predná – umiestnená na kryte cievky a zadná – umiestnená na nastavovacom module). Zo skúseností s použitím štetín [5] vyplýva, že trecia sila medzi koncom štetiny a stenou potrubia závisí od zmyslu okamžitej rýchlosti pohybu mikrostroja, t. j. pri pohybe dopredu je táto trecia sila menšia než pri pohybe dozadu.



Obr.12 Zjednodušený model mikrostroja so štetinami kruhového prierezu

Je prirodzenou snahou, aby bola trecia sila pri pohybe dopredu čo najmenšia a pri pohybe dozadu čo najväčšia. Podmienkou funkčnosti mikrostroja je, aby trecia sila medzi koncom štetín a stenou potrubia F_2 pri pohybe dopredu nepresahovala hnaciu silu F_h [3].

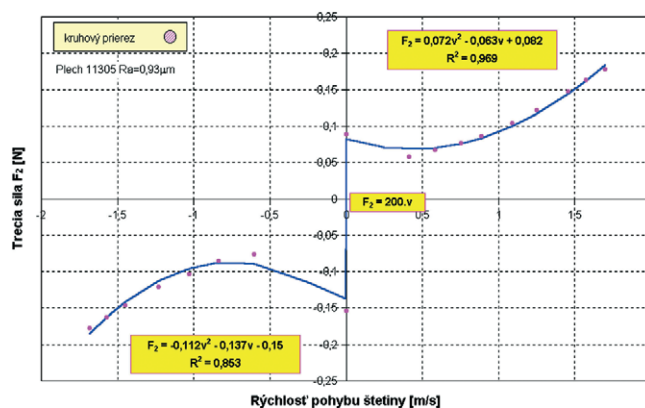
Na meranie adhézneho zložky je známy princíp sklonného (angl. declinable tribometer) tribometra [5], [6]. Toto zariadenie je tvorené naklonenou rovinou, ktorej plocha je z materiálu z materiálovej dvojice skúmaných materiálov. Teleso, ktoré sa po nej môže pohybovať, má svoju spodnú plochu tvorenú druhým materiálom zo skúmanej materiálovej dvojice.

Na stanovenie trecej sily medzi koncami štetín a stenou potrubia sa využil zjednodušený model mikrostroja s nastaviteľnými štetinami (obr. 12). Metodika identifikácie trecej sily bola bližšie opísaná v [5], [6].

Model (obr. 12) je tvorený montážnou doskou, ku ktorej sú zo spodnej strany pripevnené tri šikmé štetiny. Tento model možno použiť na meranie závislosti trecej sily od rýchlosti pohybu telesa a zmyslu pohybu na sklonnom tribometri. Model (obr. 12) má z hľadiska merania trecej sily nesporné výhody oproti samotnému potrubnému mikrostroju:

- Eliminuje vplyv geometrických odchýlok na zmenu predpätia štetín (t. j. nedochádza k zmene normálovej sily).
- Zaťaženie na jednotlivých štetinách je rovnaké (prídavné závažie je umiestnené v ťažisku modelu).
- Na zjednodušený model možno umiestniť prídavné závažie (do ťažiska modelu) a meniť tak normálovú silu.
- Je univerzálnym podvozkom s možnosťou prichytenia rôznych typov štetín s možným nastavením ich dĺžky a montážneho uhla.
- Meranie času, za ktorý model prejde danú dráhu, je pomerne jednoduché.

Jedným z problémov však je najsť adekvátny povrch pre naklonenú rovinu tribometra, ktorý je svojimi vlastnosťami povrchu ekvi-



Obr.13 Závislosť trecej sily od rýchlosti pohybu modelu mikrostroja so štetinami s kruhovým prierezom

valentom vlastnostiam povrchu vnútornej steny potrubia. Pre povrch meracej roviny sklonného tribometra je najvhodnejším materiálom oceľový plech [5]. Pri tomto meraní bolo snahou priblížiť sa podmienkam, ktoré sú na vnútornej ploche potrubia.

Výsledok meraní možno uviesť vo forme závislosti trecej sily od rýchlosti pohybu štetiny vzhľadom na steny potrubia (obr. 13). Na simuláciu s matematickým modelom boli závislosti aproximované polynómom a tie zodpovedajú Stribeckovmu modelu trenia [5], [6].

Z obr. 13 vyplýva, že trecia sila pri pohybe štetiny dozadu je väčšia než pri pohybe dopredu. Vhodnou voľbou parametrov štetiny možno výrazne ovplyvniť tento rozdiel trecích síl.

Zo skúsenosti pri riešení práce [5] vyplýva, že takéto vyjadrenie trecej sily pri nulovej rýchlosti pohybu štetiny spôsobuje výpočtové problémy pri simulácii v prostredí Matlab/Simulink. Preto je vhodnejšie prechod zo zápornej do kladnej oblasti rýchlosti realizovať pomocou krátkého lineárneho úseku v blízkosti nulovej rýchlosti pohybu.

Treciu silu medzi štetinami a stenou potrubia teda možno opísať nasledujúcimi vzťahmi:

- pre $v_2 < -0,000688$:

$$F_2 = -0,112 \cdot v_2^2 - 0,137 \cdot v_2 - 0,15 \quad (6)$$

- pre $-0,00068 \leq v_2 \leq 0,00041$:

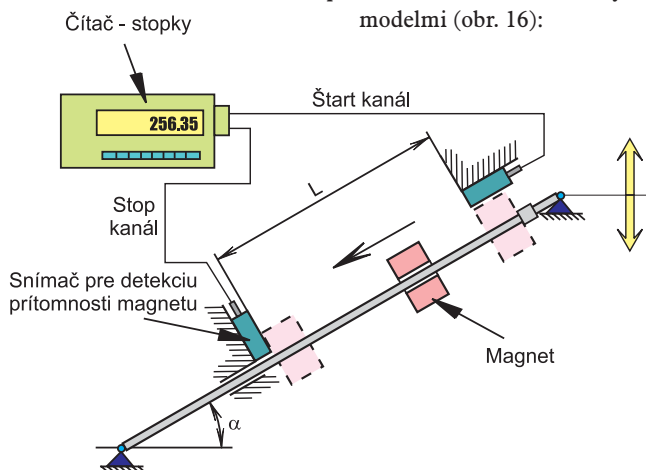
$$F_2 = 0,072 \cdot v_2^2 - 0,063 \cdot v_2 + 0,082 \quad (7)$$

5. Identifikácia trenia medzi puzdrom magnetu a klzným vedením

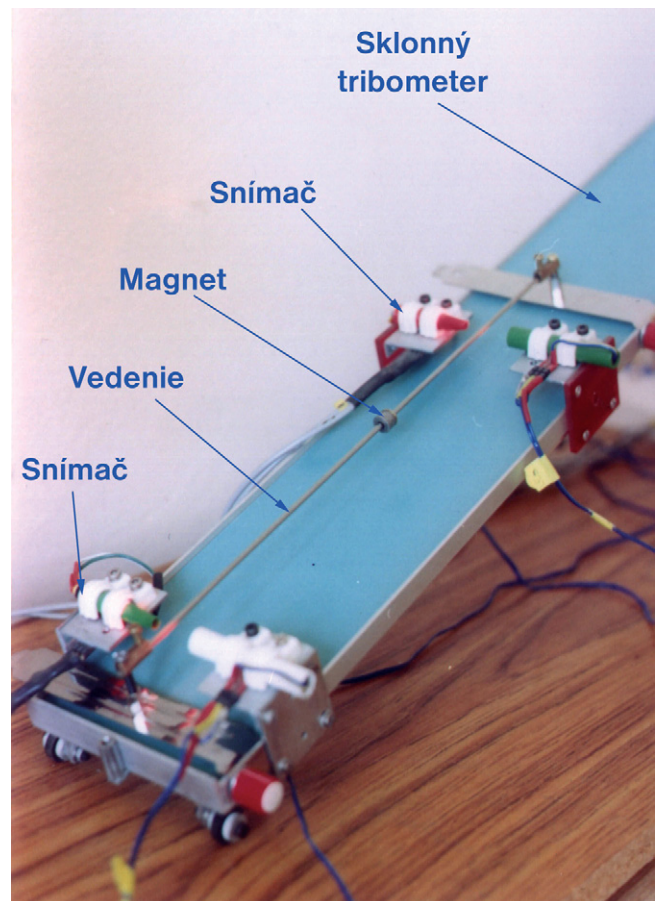
Identifikáciu trenia medzi vedením a puzdrom magnetu (hnacieho telesa) možno realizovať analogicky ako pri trení medzi koncom štetiny a stenou potrubia. Pomocou upraveného sklonného tribometra (obr. 14 a 15) teda možno identifikovať treciu charakteristiku medzi vedením hnaného telesa a hnacím telesom (magnetom).

Pomocou prípravku (obr. 15) je na sklonnom tribometri prichytená rúrka, resp. vedenie (s dĺžkou L), z ktorej bolo vyrobené aj vedenie mikrostroja. Snahou bolo na tomto „predĺženom vedení“ vytvoriť podmienky, ktoré by sa približovali špecifickým podmienkam v potrubnom mikrostroji. Pomocou tribometra je teda určená adhézna aj viskózna zložka trenia medzi vedením a puzdrom magnetu.

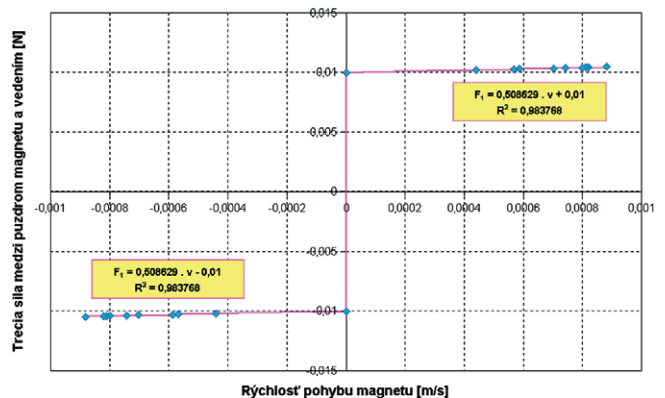
Výsledky meraní sú zhrnuté na obr. 16. V intervale rýchlosti $(-0,00044; 0)$ a $(0; 0,00044)$ sa magnet pohyboval trhavým pohybom alebo meranú dráhu neprešiel celú. Nameraná závislosť bola aproximovaná dvoma lineárnymi modelmi (obr. 16):



Obr.14 Schéma merania na identifikáciu trecej sily medzi puzdrom magnetu a vedením



Obr.15 Sklonný tribometer s prípravkom na prichytenie vedenia s permanentným magnetom



Obr.16 Trecia sila medzi puzdrom magnetu a vedením mikrostroja

Pre $v_1 < 0$:

$$F_1 = 0,5 \cdot v_1 + 0,01 \quad (8)$$

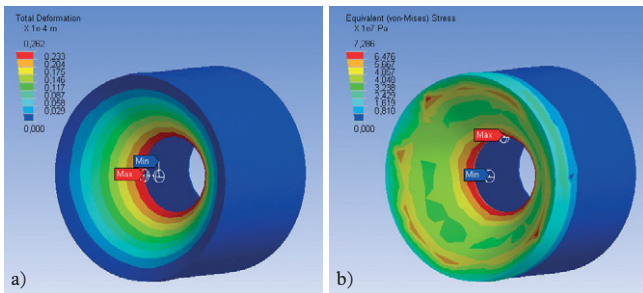
Pre $v_1 > 0$:

$$F_1 = 0,5 \cdot v_1 - 0,01 \quad (9)$$

6. Identifikácia ekvivalentnej tuhosti sústavy počas zrážky hnacieho a hnaného telesa

Ekvivalentná tuhosť ke reprezentuje deformáciu hnaného a hnacieho telesa počas zrážky na aktívnej ploche. Na určenie tejto tuhosti je účelné vytvoriť virtuálny 3D model (obr. 1) a tento model pomocou metódy konečných prvkov zaťažovať rôznymi hodnotami zaťaženia. Z určených deformácií potom možno určiť hľadanú ekvivalentnú tuhosť.

Najnižšiu tuhosť v sústave mikrostroja mal permanentný magnet. Priebeh von-Misesovho napätia a deformácií permanentného



Obr.17 Deformácie (a) a napätia (b) v magnetě (zaťaženie 4,3 N)

magnetu sú zobrazené na obr. 17. Z hodnôt zaťaženia a určených deformácií potom možno určiť tuhosť jednotlivých súčiastok a z nich ekvivalentnú tuhosť danej sústavy počas zrážky.

Zo zistených hodnôt tuhosti jednotlivých súčiastok bola určená ekvivalentná tuhosť sústavy pri zrážke $k_e = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Nm}^{-1}$.

Záver

V úvodnej časti je opísaný potrubný mikrostroj KAROLÍNA založený na princípe zrážky dvoch telies. Na doplnenie modelu mikrostroja a štúdium jeho vlastností treba identifikovať niektoré jeho vlastnosti. Tomuto problému sa venuje aj tento článok, pričom sú využité experimentálne metódy a metóda konečných prvkov.

Podakovanie

Autori týmto ďakujú Slovenskej grantovej agentúre pre vedu GU VEGA 1/2188/05 „Výskum princípov lokomócie potrubného stroja v potrubí za účelom ťahania káblov do existujúcich potrubných sietí“ za čiastkovú podporu tejto práce.

Literatúra

[1] DOVICA, M., GMITERKO, A., HOMIŠIN, J. and JURČO, M. (1998): Základná štúdia mobilného minimechanizmu pre pohyb v potrubíach s malým priemerom. Strojnícky časopis č. 2, ročník 49, 1998, s. 124 – 140. ISSN 0039-2472

[2] GMITERKO, A. and KELEMEN, M. (2004): Miniaturne potrubné stroje. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. TU-SjF. 2004. Emilena Tlačiareň. ISBN 80-8073-213-2

[3] KELEMEN, M.: Simulačný model potrubného stroja založeného na zotrvačnom krokovacom princípe. AT&P journal 12/2005. ISSN 1335-2237

[4] FORCE SENSOR – Micro Switch Force Sensor FS series – Product datasheet. Honeywell, 1997.

[5] KELEMEN, M. (2002): Mechatronické aspekty optimalizácie pohybu štetinového potrubného mikrostroja. Doktorandská dizertačná práca. SjF TU v Košiciach. Košice 2002

[6] MAŤAŠOVSKÁ, T., KELEMEN, M.: Trenie v potrubných mikrostrojoch (1). AT&P Journal 9/2003. s. 45 – 46. ISSN 1335-2237

Michal Kelemen

Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Ústav špeciálnych technických vied
Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky
Letná 9, 042 00 Košice
e-mail: michal.kelemen@tuke.sk

Tatiana Maťašovská

Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Ústav špeciálnych technických vied
Katedra prístrojového a biomedicínskeho inžinierstva
Letná 9, 042 00 Košice
e-mail: tatiana.matasovska@tuke.sk