

# SNÍMAČ KRÚTIACEHO MOMENTU (TORQUE SENSOR)

Miroslav MOJŽIŠ, Martin ORENDÁČ, Iveta TOMČÍKOVÁ, Jozef VOJTKO, Anna HODULÍKOVÁ  
Katedra teoretickej elektrotechniky a elektrického merania, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita  
v Košiciach, Park Komenského 3, 043 89 Košice, tel.: 055/602 2801, E-mail: Miroslav.Mojzis@tuke.sk,  
Martin.Orendac@tuke.sk, Iveta.Tomcikova@tuke.sk, Jozef.Vojtko@tuke.sk, Anna.Hodulikova@tuke.sk

## SUMMARY

The article describes principle, function, and design of elastomagnetic torque sensor realized at our department. The basic measuring apparatus and output characteristics at various input supply are analysed. The substitute circuit model of the sensor is determined from measured data of input values for all torque measured range. The substitute functions for output characteristics were stated and chosen the most linear and nonlinear characteristic taking into consideration coefficient of reliability. As well the coefficient of the power transmission from input to output of the sensor was determined depending on field current values.

**Keywords:** measurement, torque, elastomagnetic sensor, output characteristic, substitute model, coefficient of power transmission

## 1. ÚVOD

Na našom pracovisku počas viacerých rokov v rámci inštitucionálneho výskumu, aplikačných výskumných úloh, v rámci úloh financovaných grantovou agentúrou pre elektrotechniku ako aj v rámci aplikačných výskumných úloh pre prax bolo vyvinutých viacero konštrukčných variantov a veľkostí snímačov pracujúcich na princípe elastikomagnetického javu [2] [3] [4] [5]. Na dve základné konštrukčné usporiadania určené na meranie tlačnej resp. tlačnej aj ťahovej sily sme získali autorské osvedčenia, pričom v tejto oblasti pokračujeme v rámci výskumnej úlohy VEGA č. 1/8129/01. Cieľom tejto úlohy je overiť ďalšie možnosti využitia elastikomagnetického javu.

Tento článok uvádza základné poznatky z nového snímača na bezdotykové meranie krútiaceho momentu na ktorom boli vykonané experimentálne merania a ich vyhodnotenie.

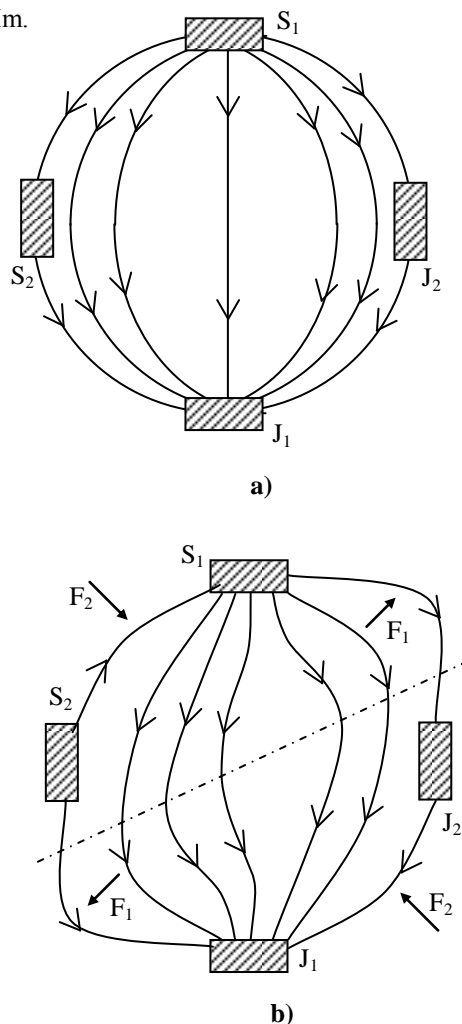
## 2. PRINCÍP FUNKCIE SNÍMAČA

Funkcia elastikomagnetických snímačov deformácie je principiálne založená na existencii Villaryho javu. Tento sa v konečnom dôsledku prejavuje zmenou permeability vyvolanou mechanickým napätím  $\sigma$  deformovaného feromagnetika. Kvantitatívne túto zmenu v striedavom magnetickom poli popisuje vzťah odvodený [4] z energetickej rovnováhy takéhoto materiálu v tvare

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

kde  $\lambda_{sa}$  je stredná hodnota koeficienta magnetostrikcie v nasýtenom stave,  $\mu$  je hodnota permeability mechanickým napätím nezaťaženej feromagnetika,  $B_{sef}$  je efektívna hodnota magnetickej indukcie feromagnetika

v nasýtenom stave nezaťaženej mechanickým napätím.



**Obr. 1** Magnetické pole snímača  
**Fig. 1** Magnetic field of the sensor

Ak k izotropnému feromagnetiku priložíme permanentný magnet alebo elektromagnet reprezentovaný severným (S<sub>1</sub>) a južným (J<sub>1</sub>) pólom,

vytvorí sa v ňom podľa osi súmerné magnetické pole (obr. 1a). Ak na takéto feromagnetikum v tvare dosky alebo pláštva valca s kladnou hodnotou koeficienta magnetostríckie pôsobí jedna dvojica síl  $F_1$  alebo  $F_2$ , pole sa zdeformuje do tvaru naznačeného na obr. 1b. Deformačný účinok na pole sa zvýši ak súčasne pôsobia obidve dvojice síl, čo predstavuje situáciu pri pôsobení krútiaceho momentu. V miestach priblíženia ( $S_2$  a  $J_2$ ) snímacieho magnetického obvodu k rúrke [kap. 3.1] sa vytvoria potom rôzne magnetické potenciály, následkom čoho prechádza sekundárnym vinutím nenulový striedavý magnetický tok. Na jeho koncoch sa tak objaví nenulové indukované napätie, ako výstupný signál zo snímača.

### 3. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

#### 3.1 Snímač krútiaceho momentu

Navrhnutý a realizovaný snímač krútiaceho momentu sa skladá z deformujúcej sa časti, ktorú tvorí oceľová rúrka, budiaceho magnetického obvodu a snímacieho magnetického obvodu. Obidva v tvare podkovy s vinutím. Konštrukčnou súčasťou snímača je jeho upevnenie k laboratórnemu stolu a upnutie k dvojzvratnému ramenu, ktoré vyvodzuje meraný krútiaci moment.

Deformujúcu sa časť snímača tvorí rúrka zo strojnej ocele radu 11 s vnútorným priemerom  $d = 44,8$  mm a vonkajším priemerom  $D = 47,2$  mm o celkovej dĺžke 120 mm. Rúrka vyhovela kontrolnému výpočtu na mechanické vlastnosti podľa [1] nasledovne:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{k\max}}{W_k} = 1,89 \text{ MPa} \quad (2)$$

Maximálne šmykové napätie je výrazne menšie ako šmykové napätie odpovedajúce medzi úmernosti  $\tau_u$ , kde  $M_{k\max}$  je maximálny meraný krútiaci moment a  $W_k$  je prierezový modul v krute, ktorý pre daný tvar je

$$W_k = \frac{\pi D^3}{16} \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right) = 9,745 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (3)$$

Maximálny uhol skrútenia rúrky je

$$\varphi = \frac{M_{k\max} l}{GJ_k} = 2,98 \cdot 10^{-2} \text{ rad} \quad (4)$$

čo odpovedá potočeniu ramena vyvodzujúceho krútiaci moment (bod na ramene dĺžky 1 m klesol o cca 3 cm),  $G$  je modul pružnosti v šmyku (pre oceľ 81 000 MPa) a  $J_k$  je modul tuhosti v krute a pre použitú rúrku je

$$J_k = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4) = 9,179 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \quad (5)$$

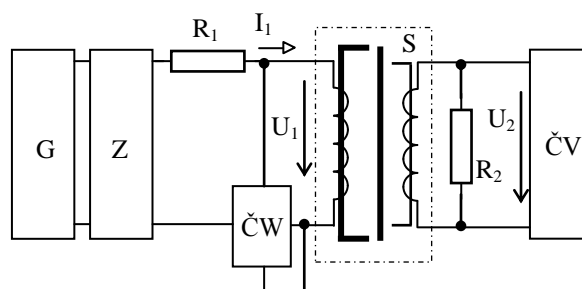
Budiaci magnetický obvod tvorí cievka (300 závitov, Cu vodič  $\Phi = 0,5$  mm) navinutá na jadre z transformátorových plechov v tvare U s prierezom  $1,2 \text{ cm}^2$ . Snímací magnetický obvod tvorí cievka (170 závitov, Cu vodič  $\Phi = 0,2$  mm) navinutá na rovnakom jadre s prierezom  $0,64 \text{ cm}^2$ . Každý pól magnetického obvodu je vzdialený od povrchu rúrky  $0,5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

#### 3.2 Meracia aparátúra

Meraciu aparátúru tvorilo dvojzvratné rameno na vyvodzovanie krútiaceho momentu, napájací a snímací elektrický obvod.

Dvojzvratné rameno bolo v osi otáčania na jednej strane upevnené v guľčikovom ložisku na druhej strane osi bolo podporené skrutkou (bodový dotyk) a s určitou vôľou v otáčaní spojené s rúrkou snímača. Na obidvoch koncoch ramena (1,712 m) boli na britových korundových ložiskách zavesené 20 l nádoby. Krútiaci moment bol vyvodzovaný prelievaním vody z jednej nádoby do druhej pomocou jednolitrovej odmerky, čím sa dosiahlo jeho monotónne zvyšovanie.

Elektrická schéma zapojenia meracej zostavy je na obr.2.



**Obr. 2** Schéma zapojenia meracej aparátúry  
**Fig. 2** Measuring equipment connection

G – generátor harmonického napätia, Z – zosilňovač, ČW – číselný wattmeter ( $R_{vw}=7 \text{ M}\Omega$ ),  $R_1$  – prispôsobujúci odpor, S – elastikomagnetický snímač krútiaceho momentu,  $R_2$  – zaťažovací odpor ( $2 \text{ k}\Omega$ ), ČV – číselný voltmeter ( $R_v=2 \text{ M}\Omega$ ).

#### 3.3 Namerané hodnoty

Vstupnú veličinu tvoril násobok definovaného objemu vody a tomu odpovedajúci krútiaci moment. Výstupná veličina bola efektívna hodnota elektrického napätia ( $U_2$ ) indukovaného v snímacom vinutí snímača. Parametrom výstupných charakteristík bola intenzita budiaceho magnetického poľa menená prostredníctvom primárneho prúdu ( $I_1$ ) a jeho frekvencia.

Okrem výstupnej charakteristiky boli namerané aj doplnujúce veličiny budiaceho obvodu (napätie  $U_1$ , činný príkon snímača  $P_1$ , jalový príkon snímača  $Q_1$ ).

Frekvencia budiaceho prúdu: 523 Hz

Por. č. charakt.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$I_1$ [A]	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	
Por.č.	$M_k$ [Nm]	$U_2$ [mV]									
1	0	6,78	9,02	11,15	13,33	15,01	17,03	19,38	21,64	24,14	25,27
2	16,8	8,97	11,80	14,41	17,05	18,74	20,25	21,52	24,13	25,43	28,53
3	33,6	12,20	15,65	18,88	22,02	24,35	25,93	27,34	29,85	30,90	32,65
4	50,4	15,56	19,58	23,70	27,47	30,75	32,31	34,16	36,98	38,18	39,03
5	67,2	18,63	23,76	28,66	32,98	36,30	38,58	41,15	44,24	45,81	46,60
6	84,0	21,63	27,74	33,41	38,28	41,72	44,93	47,95	51,59	53,79	54,84
7	100,8	24,62	31,50	37,81	43,21	47,23	51,20	54,71	58,90	61,53	63,28
8	117,6	27,50	35,15	41,98	48,03	52,62	57,02	61,22	65,86	69,08	71,19
9	134,6	30,47	38,66	46,01	52,64	57,68	62,50	67,27	72,42	76,11	78,58
10	151,2	33,29	41,99	49,72	56,95	62,52	67,75	73,00	78,34	82,62	85,53
11	168,0	35,71	44,97	53,18	61,05	66,87	72,30	77,37	82,86	88,08	91,63
12	184,8	37,11	47,85	56,35	64,76	70,54	74,64	79,62	85,56	90,89	94,36

**Tab. 1** Namerané hodnoty výstupného napätia snímača

**Tab. 1** The measured values of the sensor output voltage

Výstupné charakteristiky boli merané viacnásobne a ich priemerné hodnoty sú uvedené v tabuľke č. 1.

Nezav. vel.	Meraná veličina				
	$U_1$ [V]	$I_1$ [mA]	$P_1$ [W]	$Q_1$ [Var]	$U_2$ [mV]
V					
[l]					
0	25,77	250,4	2,09	6,10	8,83
1	25,77	250,4	2,09	6,11	11,77
2	25,78	250,1	2,08	6,10	15,56
3	25,78	250,3	2,09	6,11	19,47
4	25,76	250,4	2,09	6,11	23,63
5	25,77	250,6	2,10	6,11	27,65
6	25,77	250,8	2,10	6,11	31,38
7	25,77	250,9	2,11	6,12	35,02
8	25,77	251,1	2,11	6,12	38,58
9	25,77	251,1	2,11	6,11	42,03
10	25,76	251,1	2,11	6,11	45,10
11	25,77	251,1	2,11	6,18	47,93

**Tab. 2** Príklad nameranej charakteristiky snímača

**Tab. 2** The example of numerical values of the sensor characteristic

Poznámka: Pomerne veľký výstupný signál pri nulovom krútiacom momente je spôsobený viacerými faktormi: nepresnosťou výroby rúrky, nehomogenitou jej materiálu, nepresnosťou vzduchových medzier obidvoch magnetických obvodov (nepresnosť ich výroby a uloženia v priestore).

V tab. 2 je ako príklad uvedená nameraná jedna charakteristika (parametre  $I_1 = 0,25$  A,  $f = 523$  Hz) spolu s hodnotami harmonických napájacích veličín ( $U_1$  je napätie,  $I_1$  – prúd,  $P_1$  – činný príkon,  $Q_1$  – jalový príkon). Vstupnú nezávislú veličinu ktorou je krútiaci moment tu reprezentuje objem vody  $V$  ktorý

ho vyvodzuje. Výstupnú veličinu predstavuje napätie  $U_2$ .

#### 4. VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

##### 4.1 Výstupná charakteristika

K nameraným charakteristikám uvedeným v tab. 1 boli stanovené náhradné charakteristiky v tvare priamok. Pomocou testu spoľahlivosti, ktorého výsledok reprezentuje hodnota koeficientu  $R^2$  bola určená charakteristika, ktorá sa najviac (por. č. 2) a najmenej (por. č. 10) blížila k lineárnej (Obr. 3).

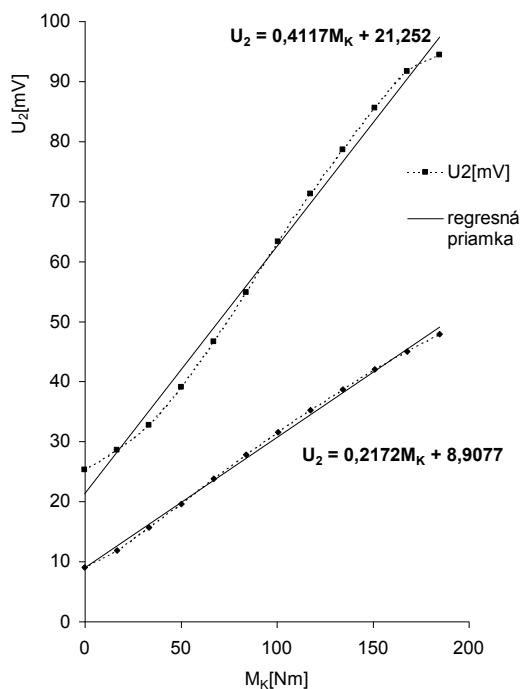
Náhradné funkcie jednotlivých výstupných charakteristík spolu s koeficientom  $R^2$  sú v nasledujúcom prehľade.

Por. č. char.	Náhradná funkcia	$R^2$
1.	$\hat{U}_{2i} = 0,1719 M_{ki} + 6,8199$	0,9966
2.	$\hat{U}_{2i} = 0,2172 M_{ki} + 8,9077$	0,9977
3.	$\hat{U}_{2i} = 0,2535 M_{ki} + 11,183$	0,9966
4.	$\hat{U}_{2i} = 0,2877 M_{ki} + 13,234$	0,9975
5.	$\hat{U}_{2i} = 0,3123 M_{ki} + 14,842$	0,9973
6.	$\hat{U}_{2i} = 0,3354 M_{ki} + 16,124$	0,9946
7.	$\hat{U}_{2i} = 0,3574 M_{ki} + 17,363$	0,9925
8.	$\hat{U}_{2i} = 0,3789 M_{ki} + 19,355$	0,9926
9.	$\hat{U}_{2i} = 0,4011 M_{ki} + 20,149$	0,9916
10.	$\hat{U}_{2i} = 0,4117 M_{ki} + 21,252$	0,9915

Koeficient  $R^2$  je daný vzťahom

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (U_{2i} - \hat{U}_{2i})^2}{\sum_{i=1}^n U_{2i}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n U_{2i} \right)^2} \quad (6)$$

kde  $U_{2i}$  sú jednotlivé namerané hodnoty výstupného napätia,  $n$  je počet nameraných bodov výstupnej charakteristiky a  $\hat{U}_{2i}$  je hodnota výstupného napätia vypočítaná z náhradnej funkcie odpovedajúca príslušnému  $i$  - tému krútiacemu momentu.



**Obr. 3** Výstupné charakteristiky č. 2 a č. 10 a ich náhradné funkcie.

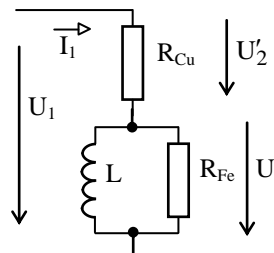
**Fig. 3** Output characteristics no. 2 and no. 10 and their substitute functions.

#### 4.2 Náhradný model snímača

Podľa prakticky konštantných hodnôt napájacích veličín v tab. 2 je zrejme, že vzájomná väzba medzi sekundárnym a primárnym magnetickým obvodom je zanedbateľná a preto pre simuláciu výkonových pomerov a vstupnej impedancie celého snímača bude postačovať náhradný model jeho budiacej časti.

Z nameraných elektrických veličín v budiacom obvode boli pre frekvenciu 523 Hz vypočítané hodnoty prvkov v náhradnom modeli na obr.4. Hodnoty prvkov boli vypočítané ku všetkým výstupným charakteristikám (č. 1 až 10) pre krajné hodnoty zaťaženia krútiacim momentom ( $M_k = 0$ ;  $M_k = M_{kmax}$ ). Jednotlivé vypočítané hodnoty pre náhradný odpor zo strát vo feromagnetiku ( $R_{Fe}$ ) sa

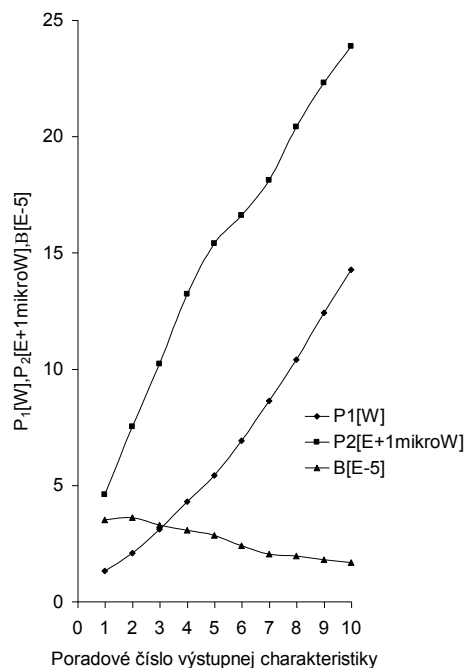
vzájomne líšili najviac o 2 %. Hodnoty náhradnej indukčnosti ( $L$ ) sa najviac líšili o 3 %. Vzhľadom na to, že sa ich zmeny vyskytovali nepravidelne usudzujeme, že sa jedná o chyby stability napájania, merania a nastavenia krútiaceho momentu. Táto skutočnosť potvrdila, že účinok vzájomnej väzby medzi snímacím a budiacim obvodom je pod hranicou uvedených chýb a náhradný model na tejto úrovni merania je preto vyhovujúci.



**Obr. 4** Schéma zapojenia náhradného modelu snímača

**Fig. 4** Substitute model connection of the sensor

Namerané a vypočítané hodnoty prvkov sú:  $R_{Cu} = (2,041 \pm 0,001) \Omega$  čo je náhradný odpor za činný odpor budiacej cievky,  $R_{Fe} = (331 \pm 3) \Omega$  a  $L = (33,0 \pm 0,5) \text{ mH}$ .



**Obr. 5** Hodnota vstupného ( $P_1$ ), výstupného ( $P_2$ ) výkonu a koeficienta  $B$  pri jednotlivých charakteristikách (1 až 10)

**Fig. 5** Input ( $P_1$ ) and output ( $P_2$ ) power and power ratio  $B$  diagrams at respective characteristics

Poradové číslo charakteristiky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_1$ [W]	1,31	2,08	3,10	4,30	5,41	6,90	8,62	10,40	12,40	14,27
$\Delta U_2$ [mV]	30,3	38,8	45,2	51,4	55,5	57,6	60,2	63,9	66,8	69,1
$P_2$ [ $\mu$ W]	0,459	0,752	1,021	1,321	1,540	1,659	1,812	2,041	2,231	2,287
$B$ [ $10^{-5}$ ]	3,50	3,61	3,29	3,07	2,84	2,40	2,03	1,91	1,80	1,67

**Tab. 3** Výkonové pomery na snímači pri nominálnom krútiacom momente

**Tab. 3** The power ratio of the sensor at nominal torque

Pre posúdenie efektívnosti prenosu vstupného činného príkonu snímača na jeho výstupný užitočný výkon sme zaviedli odpovedajúci koeficient  $B$  daný pomerom  $B = P_2 / P_1$  pričom jeho hodnoty pre maximálny krútiaci moment a príslušnú výstupnú charakteristiku sú uvedené v tab. 3 a na obr.5, kde  $\Delta U_2$  je užitočné výstupné napätie dané rozdielom  $\Delta U_2 = U_{2\max} - U_{20}$ .  $U_{2\max}$  je výstupné napätie pri nominálnom krútiacom momente,  $U_{20}$  je výstupné napätie pri nulovom krútiacom momente.

Najvyššia efektívnosť prenosu výkonu na výstup snímača bola dosiahnutá pri charakteristike č. 2.

## 5. ZÁVER

Namerali sme 50 výstupných charakteristík, ktoré potvrdili funkčnosť laboratórnej vzorky snímača krútiaceho momentu vyrobeného na našom pracovisku. Snímač meria krútiaci moment bezkontaktným spôsobom, to umožňuje merať ho aj na otáčajúcich sa hriadeľoch, čo je v praxi prevažujúci prípad prenášania krútiaceho momentu.

Meraním a následným vyhodnotením boli určené nasledovné metrologické charakteristiky snímača (charakteristika č. 2,  $I_1 = 0,25$  A,  $f = 523$  Hz); chyba linearít 2,4 %; citlivosť 0,25 mV/Nm; vlastná spotreba 2,11 W; zdanlivý príkon 6,25 VA; náhodná chyba 0,33 %; výstupný výkon na odpore 2 k $\Omega$  pri nominálnom krútiacom momente 1  $\mu$ W. Hysteréza snímača zatiaľ nebola stanovená nakoľko v sebe zahrňovala hysterézu zariadenia na vyvodzovanie krútiaceho momentu. Merania potvrdili, že vplyv frekvencie v použítom rozsahu 130 ÷ 523 Hz bol na linearitu charakteristiky zanedbateľný. Optimálnu hodnotu frekvencie napájacieho prúdu určujú požiadavky na úroveň výstupného signálu obmedzené dovoleným oteplením snímača. Snímač vykazoval konštantné impedančné vlastnosti reprezentované navrhnutým náhradným modelom, ktorý platí pre širokú škálu hodnôt napájacieho prúdu a meraného krútiaceho momentu, čo priaznivo vplyva na stabilitu jeho výstupnej charakteristiky.

## LITERATÚRA

- [1] Černoch S.: Strojně technická příručka, SNTL Praha, 1977  
 [2] Mojžiš M. at al: Elastickomagnetický čapový snímač sily, EČ 7, 1989 s. 511 ÷ 522

[3] Mojžiš M. at al: Metrological Properties of an Elastomagnetic Sensor, EČ 47/1996 č. 1 – 2, s. 46 ÷ 49

[4] Mojžiš M.: Sensor of Pressure Force, Zborník z Japonsko-česko-slovenského seminára o aplikovanom elektromagnetizme, Stará Lesná 1997, EČ (1977) 8/s s. 63 ÷ 66

[5] Mojžiš M. et al: Properties of 200 kN Force Sensor, EČ č. 3-4/1999 s. 105 ÷ 108

## BIOGRAPHY

**Miroslav Mojžiš** (doc.Ing,CSc) was born in 1942. He graduated in 1965 from the Faculty of Electrical Engineering at the University of Transport and Communications, Žilina. He received his CSc degree (PhD) in Measurement technology from Slovak Technical University, Bratislava in 1981. He is head of the Department of Theoretical Electrotechnics and Electrical Measurement. The main topics of his present research activities is measuring of forces via elastomagnetic sensors.

**Martin Orendáč** (doc, Ing, CSc) was born in 1943, received the Ing (MSc) and CSc (PhD) degrees from the Faculty of Electrical Engineering at the University of Transport and Communications, Žilina in 1965, and from the Slovak Technical University, Bratislava in 1985. Since 1988 he has been appointed Associate Professor at the Department of Theoretical Electrotechnics and Electrical Measurement, and the team leader of the Electrical Measurement group, where he is engaged in investigation of magnetic materials and also with measurement methods.

**Iveta Tomčíková** (Ing, CSc) was born in 1959. She graduated from the Faculty of Electrical Engineering, Technical University, Košice, in 1983. She received the CSc (PhD) degree in Measurement Technology from the Slovak Technical University, Bratislava, in 1995. Since 1983 she has been with the Technical University, the Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Her field of interest includes circuit theory, theory of electromagnetism and elastomagnetic sensors.

**Jozef Vojtko** (Ing) was born in Michalovce, in 1976. He graduated from Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University Košice in 1999. He works as Assistant Professor at Department of Electrotechnics and Electrical Measurement, Technical University in Košice. His interests are the errors reduction of sensors and neural networks.

**Anna Hodulíková** (Ing) was born in Prešov, in 1958. She graduated from the Faculty of Electrical Engineering, Technical University Košice in 1982. She works as an Assistant Professor at the Department of Electrotechnics and Electrical Measurement, Technical University Košice. Her current interests include circuit theory and the measurement.

