

# Statický model snímača krútiaceho momentu

<sup>1</sup>Irena KOVÁČOVÁ

<sup>1</sup> Department of Theoretical and Industrial Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University of Košice, Slovak Republic

<sup>1</sup>irena.kovacova@tuke.sk

**Abstrakt** — Článok popisuje softvérovú realizáciu modelu snímača krútiaceho momentu transformátorového typu.

**Kľúčové slová** — SPICE, simulačný model, snímač

## Static Torque Sensor Model

**Abstract** — The article describes the software implementation of the torque sensor model of the transformer type..

**Keywords** — SPICE, simulation model, sensor

### I. ÚVOD

Za účelom testovania a zlepšovania vlastností snímača krútiaceho momentu je navrhnutý statický model v programe SPICE. Snímač krútiaceho momentu je elastomagnetický snímač transformátorového typu, s primárnym a sekundárnym vinutím a samotným špeciálnym jadrom, kde veľkú úlohu zohráva tvar hysteréznej slučky a magnetostrikcia. Model v programe SPICE simuluje reálnu hysteréznú slučku snímača, jeho straty, závislosť na frekvencii a samotný výstupný signál. Realizovaný je pomocou pasívnych prvkov a riadených zdrojov tak, aby sa dalo v rámci možností simulovať reálne nielen samotný výstupný signál, ale aj tvar hysteréznej slučky.

### II. VŠEOBECNÝ MODEL SNÍMAČA TRANSFORMÁTOROVÉHO TYPU

Snímač sa modeloval v programe SPICE pod operačným systémom Windows. Celý model snímača sa dá rozdeliť na dve základné časti. Prvá časť sa zaoberá napäťovým a prúdovým prevodom a zároveň magnetickými vlastnosťami a to konkrétne tvarom hysteréznej slučky a frekvenčnou závislosťou. Druhá časť je samotné napájanie snímača a odpor vinutia.

### III. NAPÄŤOVÝ A PRÚDOVÝ PREVOD

Napäťový prevod je realizovaný pomocou napätím riadeného napäťového zdroja E a prúdový prevod je realizovaný pomocou prúdom riadeného prúdového zdroja F. Odpor RP a RS sú zapojené kvôli singularite obvodu. Samotná hodnota prevodu pre napäťový, resp. prúdový zdroj sa vypočíta podľa vzťahu:

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

kde:  $U_1$  - napätie na primárnej strane,  $U_2$  - napätie na sekundárnej strane,  $I_1$  - prúd na primárnej strane,  $I_2$  - prúd na sekundárnej strane,  $N_1$  - počet závitov na primárnom vinutí,  $N_2$  - počet závitov na sekundárnej strane.

Výpis programu pre napät'ový a prúdový prenos:

```
*napät'ový a prúdový prenos
.SUBCKT XFMR 1 2 3 4
E 5 4 1 2 {k}
F 1 2 VM {k}
VM 5 6
RP 1 2 1MEG
RS 6 3 1U
.ENDS
```

#### IV. SIMULÁCIA HYSTERÉZNEJ SLUČKY

Hysterézná slučka sa simulovala pomocou prúdom riadeného prúdového zdroja F, napätím riadeného prúdového zdroja G, ktorý slúži na vytvorenie derivátora pomocou prvkov kondenzátora CB a odporu RX, napätím riadeného napät'ového zdroja E. Na simuláciu reálneho tvaru, najmä zakrivenia v hornej a dolnej časti slučky sa použili dve diódy D1, D2 a napät'ové zdroje VP pre diódu D1 a VN pre diódu D2, ktorými sa nastavuje zakrivenie slučky a zároveň pomocou definovania modelu diódy môžeme nastaviť frekvenčnú závislosť obvodu, použil sa model ktorý obsahoval CJO, čo je hodnota kapacity PN prechodu a taktiež VJ, čo je potenciál PN prechodu, ktorým sa dá čiastočne meniť hrúbka hysteréznej slučky. Frekvenčná závislosť sa môže detailnejšie simulovať paralelným zapojením kondenzátora k diódam. Prvkami CB, RB, RS môžeme čiastočne meniť tvar hysteréznej slučky a to konkrétne straty, čiže plochu hysteréznej slučky, pomocou RB a RS strmosť hysteréznej slučky. Tieto parametre sa však nedajú meniť v celom rozsahu, lebo môže nastať rozkmitanie obvodu. Výpis programu pre simuláciu hysteréznej slučky:

```
*hysterézná slučka
.SUBCKT CORE 1 2 3
F1 1 2 VMI 1
G2 2 3 1 2 1
E1 4 2 3 2 1
VMI 4 5
RX 3 2 1E9
CB 3 2 {A} IC={E}
RB 5 2 {B}
RS 5 6 {C}
VP 7 2 1.3
D1 6 7 DCLAMP
VN 2 8 1.3
D2 8 6 DCLAMP
.MODEL DCLAMP D(CJO=D VJ=F)
.ENDS
```

Konkrétne hodnoty konštant A, ... F sa vypočítajú z reálneho snímača. Kde:

$$A = 2NB_m A_c 10^{-8} \quad (2)$$

$$B = \frac{L_m}{A} \quad (3)$$

$$C = \frac{L_s}{A} \quad (4)$$

$$D = \frac{3A}{6.28I_v L_m} \quad (5)$$

$$E = \frac{C_p}{A} \quad (6)$$

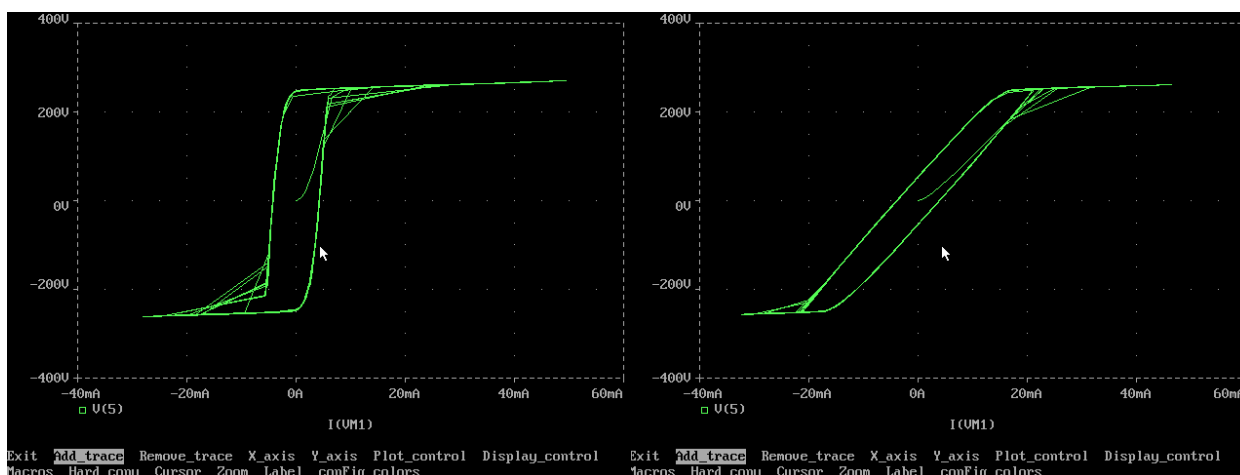
Konštantu  $F$  určíme experimentálne, približne podľa vzorca  $F = U/2$ , kde  $U$  je hodnota vstupného napätia.  $I_v$  je hodnota vírivého prúdu pri kritickej frekvencii.

$$L_m = \frac{\mu_m N^2 0,4\pi A_c 10^{-8}}{l} \quad (7)$$

$$L_s = \frac{\mu_s N^2 0,4\pi A_c 10^{-8}}{l} \quad (8)$$

kde:  $N$  - počet závitov,  $B_m$  - magnetická indukcia pri nasýtení,  $A_c$  - plocha jadra,  $C_p$  - počiatočná podmienka pre kapacitu CB,  $\mu_m$  - permeabilita,  $\mu_s$  - permeabilita pri nasýtení,  $l$  - stredná magnetická siločiar.

Pri snímači krútiaceho momentu, ktorý využíva elastomagnetický jav nastáva zmena magnetických vlastností jadra snímača, deformácia hysteréznej slučky, a tým sa mení výstupné napätie. Túto zmenu dosiahneme zmenou pomeru parametrov prvkov RB a RS. Zmena hysteréznej slučky je naznačená na obr. 1.



Obr. 1. Zmena hysteréznej slučky

## V. ELASTOMAGNETICKÝ JAV

Snímač krútiaceho momentu pracuje na princípe elastomagnetického javu. Funkcia elastomagnetických snímačov je principiálne založená na existencii Villariho javu:

$$\left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_{H,\vartheta} = \left(\frac{\partial w}{\partial H}\right)_{p,\vartheta} \quad (9)$$

kde:  $M$  - magnetizácia,  $p$  - pôsobiaci vonkajší tlak,  $w$  - deformácia,  $H$  - intenzita magnetického poľa.

Ak na izotropné feromagnetikum pôsobí vonkajšia sila, feromagnetické teleso sa deformuje, následkom toho sa zmenia vzdialenosti atómov v kryštalickej mriežke, čo vyvolá zmenu hodnoty výmenných síl v doménach daného feromagnetika. Táto skutočnosť sa navonok prejaví ako zmena magnetickej polarizácie, resp. magnetickej indukcie v smere pôsobiacej sily pri rovnakej intenzite na feromagnetikum pôsobiaceho magnetického poľa a v konečnom dôsledku zmenou permeability vyvolanou mechanickým napätím  $\sigma$  deformovaného feromagnetika. Feromagnetická látka sa stáva anizotropná. Zmenou permeability sa zmení magnetické pole snímača a tým aj výstupné napätie. Pre zmenu permeability platí:

$$\Delta\mu = \frac{2\lambda_{msstr}}{B_{sef}^2} \mu^2 \sigma \quad (10)$$

kde:  $\lambda_{msstr}$  - stredná hodnota koeficientu magnetostrikcii pri nasýtení,  $B_{sef}$  - efektívna hodnota magnetickej indukcie,  $\sigma$  - pôsobiaci vonkajší tlak.

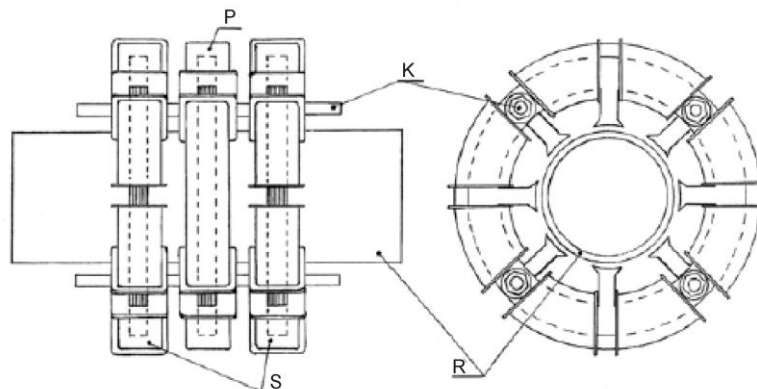
Zmena permeability spôsobí natáčanie hysteréznej slučky a samotnú zmenu výstupného napätia. Stredná hodnota koeficientu magnetostrikcie pri nasýtení je rôzna pre rôzne typy materiálov. Rozdiel je v samotnej materiálovej štruktúre. Po zjednodušení platí:

$$\lambda_v = \lambda_{100} + 3(\lambda_{111} - \lambda_{100})(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) \quad \text{resp.} \quad \lambda_s = \frac{2}{5} \lambda_{100} + \frac{3}{5} \lambda_{111} \quad (11)$$

kde:  $\lambda_{xxx}$  - koeficient magnetostrikcie vo vybranom smere,  $\alpha_x$  - uhol medzi vektorom magnetizácie a pôsobiaceho tlaku.

## VI. SNÍMAČ KRÚTIACEHO MOMENTU.

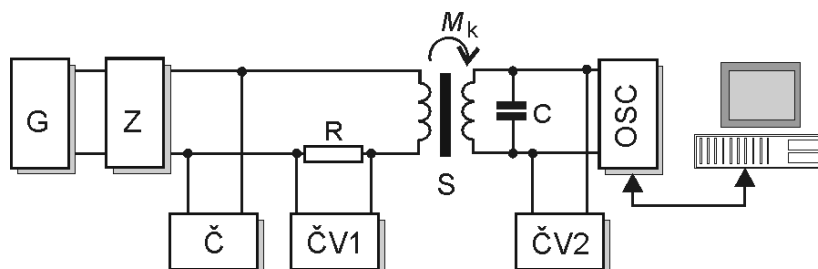
Snímač sa skladá z jedného budiaceho feromagnetického jadra P a dvoch snímacích feromagnetických jadier S a feromagnetickú rúrku R. Primárne vinutie obsahuje 2000 závitov a sekundárne vinutie 6000 závitov. Snímač je na obr.2.



Obr. 2. Snímač krútiaceho momentu

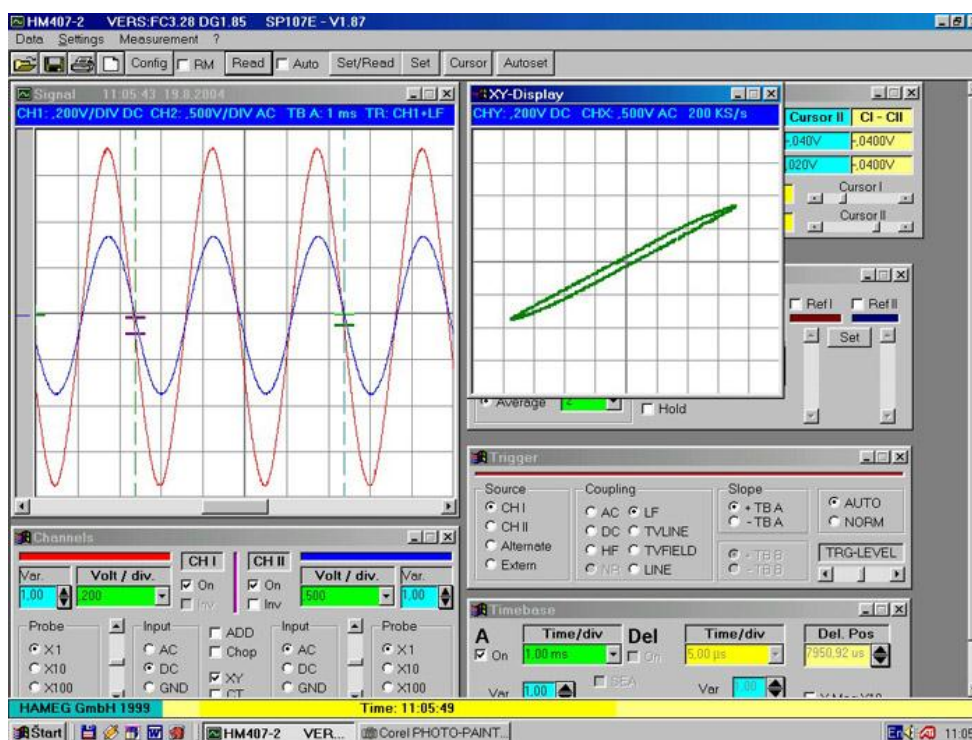
Po zaťažení rúrky krútiacim momentom sa magnetické pole v nej deformuje. Medzi pólmi snímacieho vinutia vzniká magnetické napätie. Následkom neho preteká snímacím jadrom striedavý magnetický tok, ktorý v cievkach snímacieho vinutia vybudí striedavé elektrické napätie. Zmena napätia je úmerná zmene veľkosti krútiaceho momentu.

## VII. SCHÉMA ZAPOJENIA MERACEJ APARATÚRY.



Obr. 3. Schéma zapojenia meracej aparatury

Generátor G napája zosilňovač Z a ten budiace vinutie snímača s počtom závitov  $N_1$  a odpor  $R=1\Omega$ . Úbytok napätia na ňom meraný voltmetrom ČV1 sa rovná napájaciemu prúdu. Neharmonické výstupné napätie zo snímača je čiastočne vyhladené na harmonické napätie kondenzátorom C a merané voltmetrom ČV2. Frekvenciu napájacieho prúdu meria čítač Č. Časový priebeh výstupného napätia sa zobrazí na osciloskope OSC a uloží do pamäte počítača PC. Tvar hysteréznej slučky a vstupného a výstupného napätie je na obr. 4.



Obr. 4. Výstupné parametre osciloskopu

## VIII. MODEL SNÍMAČA KRÚTIACEHO MOMENTU.

Z konštrukčných parametrov snímača a pomocou rovníc (1) až (8) sa vypočítali konštanty A až F a zostrojil sa statický model snímača krútiaceho momentu v programe SPICE. Simulácia prebiehala v operačnom systéme DOS. Výpis programu modelu snímača krútiaceho momentu v program SPICE:

STATICKY MODEL SNIMACA

.SUBCKT XFMR 1 2 3 4

E 5 4 1 2 {2}

F 1 2 VM {0.5}

VM 5 6

1)RP 1 2 1MEG

RS 6 3 1U

.ENDS

.SUBCKT CORE 1 2 3

F1 1 2 VM1 1

G2 2 3 1 2 1

E1 4 2 3 2 1

VM1 4 5

RX 3 2 1E9

CB 3 2 {200U} IC={-1U}

RB 5 2 {150}

RS 5 6 {50}

VP 7 2 1.3

D1 6 7 DCLAMP

VN 2 8 1.3

D2 8 6 DCLAMP

.MODEL DCLAMP D(CJO=0.5 VJ=0.5)

.ENDS

.OPTIONS LIMITS=3000

.TRAN .1U 10MS

.PLOT TRAN V(3) V(5) I(VM1) V(4)

.PRINT TRAN V(3) V(5) I(VM1) V(4)

R1 4 2 100

R2 3 0 50

X1 1 0 5 CORE

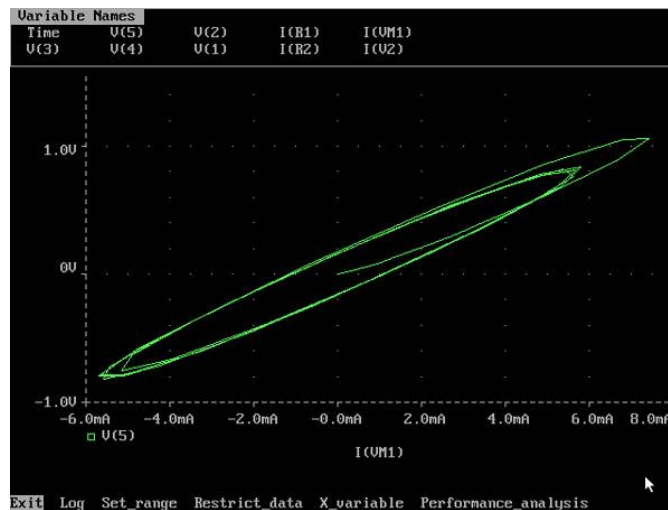
X2 2 0 3 0 XFMR

VM1 2 1

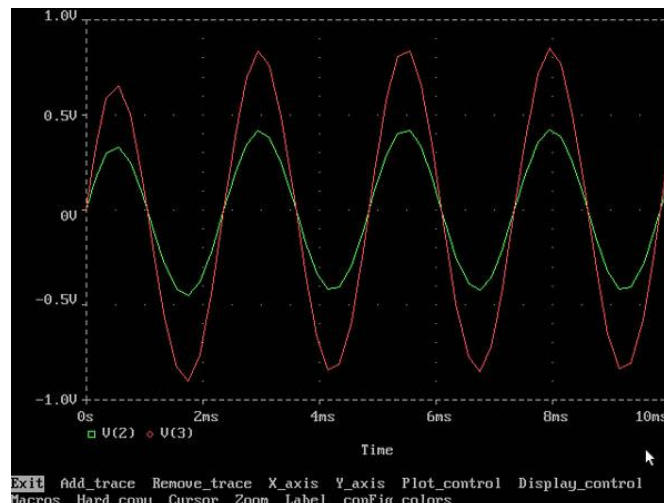
V2 4 0 SIN 0 1.5 400

.END

Na obr. 5. je zobrazený priebeh hysteréznej slučky modelu snímača a na obr. 6. je zobrazený jeho priebeh vstupného a výstupného napätia.



Obr. 5. Hysterézna slučka modelu snímača



Obr. 6. Priebehy výstupného a vstupného napätia

#### IX. ZÁVER

Porovnaním nameraných výsledkov z výsledkami simulačného modelu, model snímača krútiaceho momentu v programe SPICE poskytuje orientačné výsledky, podľa ktorých sa môže predikovať správanie sa snímača pri rôznych podmienkach. Model snímača bol navrhnutý tak, aby boli dodržané základné fyzikálne vlastnosti snímačov transformátorového typu. Zmena výstupného napätia pri nezmenenom napájaní je závislá od zmeny tvaru hysteréznej slučky, ktorej zmenu určuje tlak pôsobiaci na materiál. Zavedením dynamickej zmeny permeability z rovnice (10) do rovníc (7) a (8) dosiahneme zo statického modelu, model dynamický. Problémom ostáva singularita modelu, ktorý ma tendenciu pri výraznejších zmenách konštánt A až F sa rozkmitať.

#### LITERATÚRA

- [1] Žalud, V.: Moderní radioelektronika. 1. vydanie, Praha: *BEN – technická literatúra*, 2000, 653 str., ISBN 80-86056-47-3.
- [2] Lee, E. W.: Magnetostriction and magneto-mechanical effects. *Department of Physics, The university Nottingham*
- [3] Moses, A.J.: Problems in modeling the magnetization process for theoretical and experimental studies. *Proceeding on the first Japanese – Czechoslovak joint seminar on applied electromagnetic in materials*, 1992, Piešťany, Slovakia
- [4] Potocký, L.-Hajko, V. – Zentko, A.: Magnetizačné procesy. *ALFA*, Košice, 1982
- [5] Mojžiš, M.: Metrological properties of elastomagnetic sensor; *IEEE*, Vol. 48, 1996, No. 1-2, pp. 46-49
- [6] <http://www.ecircuitcenter.com/index.htm>