

TRADUCTOARE MAGNETOELASTICE DE CUPLU FĂRĂ CONTACT PENTRU ELECTRO-MOBILITATE. PROGRESE RECENTE

Andrei MARINESCU

Academia de Științe Tehnice, Filiala din Craiova

andrei.marinescu@ieee.org

Abstract. The study of magnetoelastic effects remains a topic of constant interest, on the one hand because it allows for a deeper understanding of magnetization processes in ferromagnets, and on the other hand because new scientific and technical applications of these effects are constantly emerging.

Magnetoelastic strain gauging allows the original shaft of the force transducer to be used as the sensing element (without the need to install a special measuring device in series). This paper presents the principles of measuring mechanical torque based on changes in the magnetic properties of the shaft itself.

1. INTRODUCERE

Traductoarele de cuplu magnetoelastice reprezintă un progres în tehnologia de măsurare a cuplului fără contact, oferind adesea o sensibilitate, o precizie și o integrare îmbunătățite pentru aplicații moderne cum sunt: vehiculele electrice și hibride (care necesită o monitorizare precisă a cuplului pentru gestionarea bateriei, optimizarea transmisiei și sistemele de frânare regenerativă), motorsportul (Formula 1, Formula E), instalațiile eoliene, avionică, robotică etc.

Principalele efecte magnetoelastice sau magnetostrictive au fost descoperite în secolul XIX: Joule (1842-efectul magnetostrictiv direct), Matteucci (1847-efectul Wiedemann invers), Villari (1865-efectul magnetoelastic sau efectul magnetostrictiv invers) și Wiedemann (1865-efectul cuplului indus de anizotropia elicoidală) pe a căror bază s-au realizat numeroase publicații și brevete de invenție. [1,2].

În România, problemele de magnetoelasticitate au făcut obiectul unor preocupări intense la Timișoara și Craiova în care un rol important l-au avut efectele magnetoelastice legate de solicitarea la torsiune [3,4].

În prezent, principalii competitori ai traductoarelor magnetoelastice de cuplu (TME-T) unde deformația modifică orientarea magnetizării spontane prezentă în materialele feromagnetice sunt:

- Traductoarele cu mărci tensometrice rezistive (MTR) lipite pe arborele rotativ pentru a măsura deformația locală, care la rândul său este transferată wireless. Metoda este foarte precisă și este folosită pentru etaloane în metrologia aplicată [5];
- Traductoarele cu unde acustice de suprafață (SAW) care utilizează senzori montați la o anumită distanță pe arborele rotativ, care măsoară timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice între acestea. Timpul de propagare depinde de solicitare și prin urmare, de cuplu [6].

Măsurarea cuplului mecanic este o piață mondială de traductoare care depășește 7 Bln USD în 2024 cu o creștere CAGR=5.77% până în 2032 [7] din care traductoarele magnetoelastice reprezintă aproape 30%.

În lucrarea [8] se face o prezentare detaliată a numeroaselor posibilități oferite de tensometria magnetoelastica în tehnica modernă: presiuni, forțe, mase, protecție la suprasarcini și cupluri mecanice.

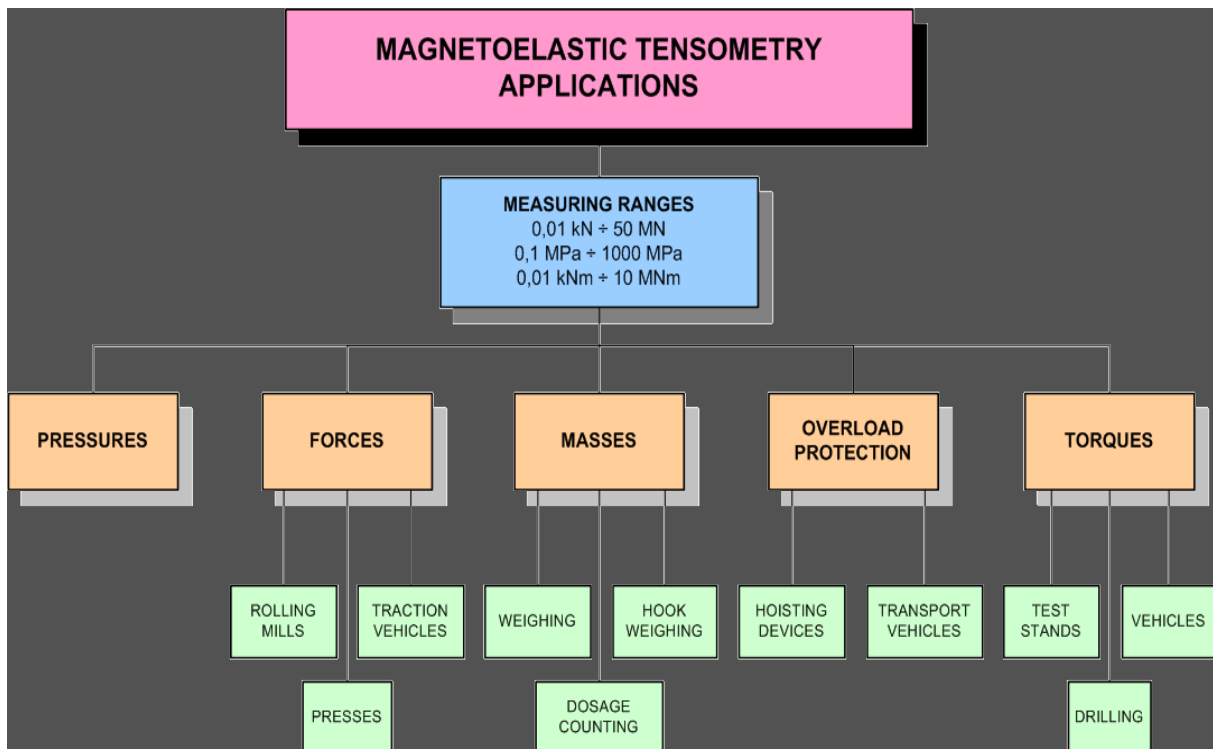


Fig.1 – Aplicațiile tensometriei magnetoelastice.[8]

În continuare se prezintă două tipuri de traductoare magnetoelastice, realizarea practică și simularea unui traductor axial, solenoidal și aplicarea acestuia în electro-mobilitate.

2. PRINCIPALELE TIPURI INDUSTRIALE DE TRADUCTOARE MAGNETOELASTICE DE CUPLU

Descrierea acestora este prezentată pe larg de Fleming [9,10] și Sasada [11]. De precizat aici că în numeroase publicații se folosește termenul impropriu de traductor “magnetostrictiv” în loc de termenul corect traductor “magnetoelastic”. Ele sunt identice numai că denumirea completă este traductor “magnetostrictiv invers”.

La torsiune, în secțiunile transversale ale arborelui, apar eforturi tangențiale orientate, în fiecare punct, perpendicular pe raza care unește punctul cu centrul secțiunii. Mărimea efortului tangențial este direct proporțională cu distanța față de centru, astfel că la suprafața arborelui, aceste eforturi vor fi maxime:

$$\tau = \frac{T}{W_p} \cdot r \quad (1)$$

unde T este momentul de torsiune, iar r este modulul de rezistență polar al secțiunii transversale a arborelui cu diametrul D.

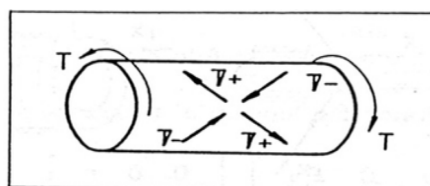


Fig. 2 – Arbore solicitat la torsiune unde $\pm\sigma=16T/\pi D^3$.

Construcția oricărui TME-T trebuie să țină seama că direcția de acțiune a valorilor maxime și minime ale eforturilor normale (eforturi principale) și deci direcția variațiilor relative maxime ale permeabilității magnetice este dispusă sub un unghi de $\pm 45^\circ$ față de axa arborelui în orice porțiune a arborelui, pe direcția de acțiune a eforturilor principale de întindere la materialele cu magnetostricțiune pozitivă are loc o creștere de permeabilitate iar pe direcția de acțiune a eforturilor principale de compresiune are loc o scădere a permeabilității.

2.1 Traductorul magnetoelastic de cuplu inelar cu capete magnetice

Reprezintă prima realizare industrială de măsurare magnetoelastică a cuplului mecanic [12] realizată de Dr. Orvar Dahle la ASEA/ABB în 1958 cu denumirea comercială "Torductor". Utilizarea sa este legată de construcția navelor maritime la care torsiunea arborelui cilindric original de acționare al elicei cu motoare Diesel este măsurată fără contact de un sistem multipolar de capete magnetice (Fig. 3).

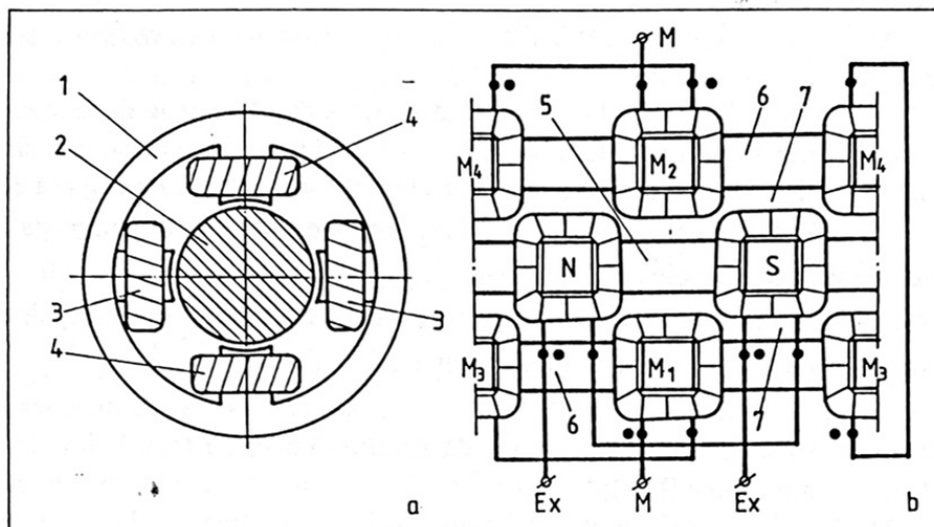


Fig. 3 – Principiul constructiv al traductorului inelar [4]
a - vedere frontală b - vedere desfășurată.

În Fig. 4 se prezintă o reprezentare teoretică a spectrului câmpului magnetic creat de sistemul polar la suprafața arborelui.

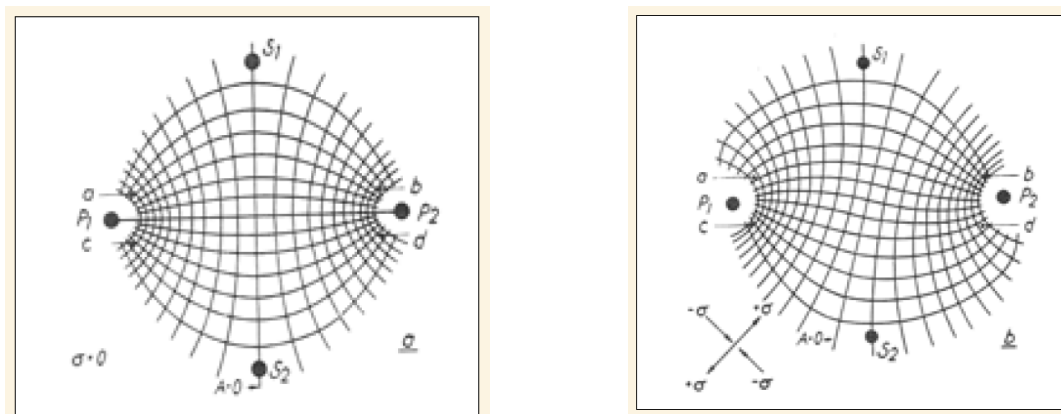


Fig. 4 – Spectrul câmpului magnetic la suprafața arborelui a - $T = 0$ b - $T \neq 0$.

Traductorul este format din trei inele ștanțate din tole de dinam, decalate radial cu 90° (în general cu jumătate de pas polar), care înconjoară arborele 2, realizat din material feromagnetic magnetoelastic. Inelul polar median 5 servește pentru crearea câmpului magnetic la suprafața arborelui, iar inelele polare laterale 6 poartă înfășurările de sondare (măsurare) a

distorsiunii câmpului magnetic la suprafața arborelui. Înfășurările de excitație 3 sunt legate în serie astfel încât să formeze poli alternați și sunt alimentate de la o sursă de curent alternativ, iar înfășurările de măsurare 4 sunt legate în serie diferențial astfel că, la $T = 0$, semnalul de ieșire să fie zero. Inelele polare sunt separate de inelele izolante 7 iar ansamblul stator, astfel realizat, prevăzut cu scuturi și rulmenți capătă o poziție definită față de arbore. În afară de problemele constructive (dimensiunile arborelui, dimensiunile de gabarit ale ansamblului), există probleme legate de caracteristicile sistemului electromagnetic (regimul de alimentare, solenația, dimensiunile polilor de excitație și de măsurare etc).

Cea mai mare dificultate o creează aprecierea proprietăților magnetice ale materialului arborelui, care depinde de șarja de material și de tensiunile interne rezultate în precesul de prelucrare și finisare a suprafeței acestuia.

Cele mai bune rezultate, atât în ceea ce privește reproductibilitatea caracteristicilor cât și sensibilitatea magnetoelastică și liniaritatea, se obțin folosind oțeluri aliate cu Cr, Ni, Mo [13].

Un alt parametru constructiv important al TME-T îl reprezintă mărimea întrefierului. Pentru a reduce influența excentricității arborelui, întrefierul de 0.5 mm se consideră o soluție de compromis.

La realizarea traductoarelor pentru momente de torsiune mari, odată cu creșterea diametrului arborelui, numărul de poli se mărește corespunzător așa cum se vede în fig. 5 în cazul unui arbore cu diametrul de 500 mm.



Fig. 5 – Traductor magnetoelastic inelar multipolar ASEA [13].

Frecvența curentului de excitație este limitată la 330Hz, ea reprezentând un compromis acceptabil între sensibilitate și viteza de răspuns a TME-T; în orice caz, ea trebuie să fie mare în raport cu variațiile de moment și de viteză ale arborelui.

Trebuie ținut seama, în mod special, de eroarea de măsurare determinată de eventuale modificări ale vitezei de rotație a arborelui. Dependența de viteză a semnalului de ieșire este rezultatul faptului că, la suprafața arborelui, câmpul magnetic variază datorită unui fenomen similar reacției indusului la mașinile electrice. Curenții turbionari de pe suprafața arborelui produc un câmp magnetic de reacție care distorsionează spectrul inițial al câmpului. Cu cât este mai mare viteza de rotație, cu atât mai mare este distorsiunea câmpului. Se apreciază că la frecvența de excitație de 330Hz, un TME-T poate funcționa până la 3000 rotații pe minut, cu erori de viteză neglijabile.

Departat de a fi numai un fenomen perturbator, câmpul magnetic rezultat poate fi utilizat și pentru generarea unui semnal indicator de turație.

Modularea semnalului de ieșire, datorită anizotropiei materialului arborelui, cât și dependența de viteză a indicației pot fi reduse, dar nu pot fi total eliminate, astfel că, atunci când se dorește realizarea unei precizii intrinseci ridicate, este necesar să se apeleze la alte principii constructive.

În concluzie, după zeci de ani de la inventarea sa, traductorul inelar de cuplu se utilizează pe scară largă la sistemele de propulsie ale navelor maritime cu motoare de mare putere și implicit cu consum mare de combustibil. Scopul principal este optimizarea eficienței motorului și a consumului de combustibil în sectorul maritim.

Organizația Maritimă Internațională, în special planul de gestionare a eficienței energetice a navei (SEEMP), oferă armatorilor o imagine clară și cuantificabilă asupra performanțelor motorului navei, precum puterea de propulsie, consumul specific de combustibil (SFOC), numărul total de rotații ale arborelui și cantitatea totală de energie generată în timpul unei călătorii.

2.2 Traductorul magnetoelastic de cuplu de tip solenoid coaxial cu arborele

Cea mai importantă caracteristică a traductorului de cuplu de tip solenoid este structura sa simetrică din punct de vedere rotativ, derivată din simetria rotativă a bobinei de detectare de tip solenoid.

În principiu, traductorul nu sesizează rotația arborelui. Dar, pentru a distinge direcțiile pozitive și negative ale cuplului, este necesar să se introducă o structură diferențială pe partea arborelui (Fig.6) cât și pe partea solenoidului de măsurare fix.

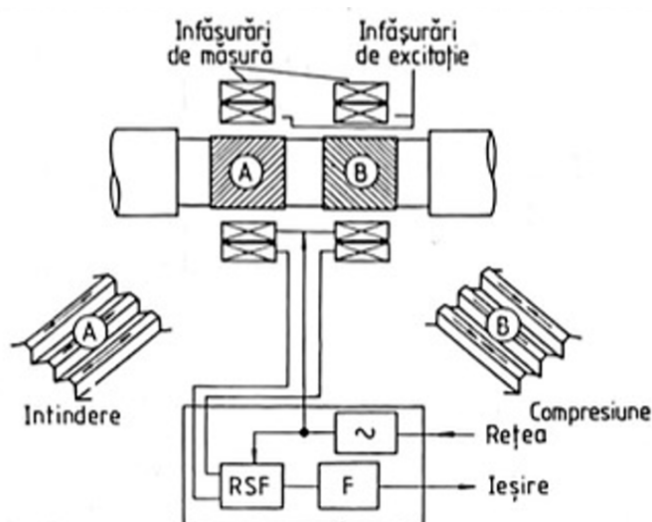


Fig. 6 – Schema constructivă a traductorului de cuplu realizat (partea mecanică și partea electrică).

Există mai multe variante de realizare a sistemului de măsurare [14,15,16]. La soluția practică în lucrare, pentru a masca anizotropia naturală dată de proprietățile magnetoelastice ale arborelui, s-au practicat șanțuri paralele uniform distanțate, care fac unghiuri de $+45^\circ$ și -45° față de o generatoare a suprafeței arborelui, șanțuri care au fost taiate în două zone inelare paralele (A, B) amplasate la o anumită distanță una de alta. Aceasta conduce la o formă de orientare magnetică (anizotropie artificială) pe direcția șanțurilor care maschează neomogenitățile și/sau tensiunile remanente ale arborelui netratat. Adâncimea șanțurilor triunghiulare este de 1 mm iar cele două zone A și B au 20 mm fiecare. În total, lungimea părții active a traductorului este de 50-60 mm.

Statorul este alcătuit din două bobine primare de excitație conectate în serie adițional alimentate de la rețea printr-o sursă de frecvență mărită sinusoidală și două bobine secundare de măsurare legate în serie diferențial. Prelucrarea semnalului de ieșire se face cu un redresor sincron sensibil la fază (RSF) urmat de un filtru trece jos.

RSF produce o tensiune redresată a carei amplitudine și polaritate depind de faza tensiunii de măsurat (nesinusoidală) în raport cu o tensiune de referință de aceeași frecvență (în cazul de față o tensiune sinusoidală de excitație).

Caracteristica de transfer a traductorului realizat este prezentată în Fig.7 odată cu caracteristica calculată prin element finit cu programul [17].

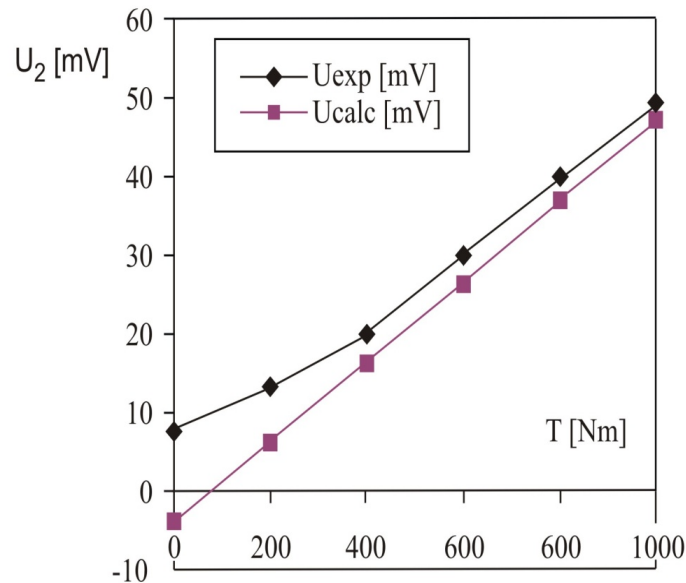


Fig. 7 – Caracteristica de transfer a traductorului $U_2(T)$.

Schema bloc a procesului de rezolvare folosind metoda elementelor finite (FEM) din programul MSC/EMAG [17] este dată în Fig.8.

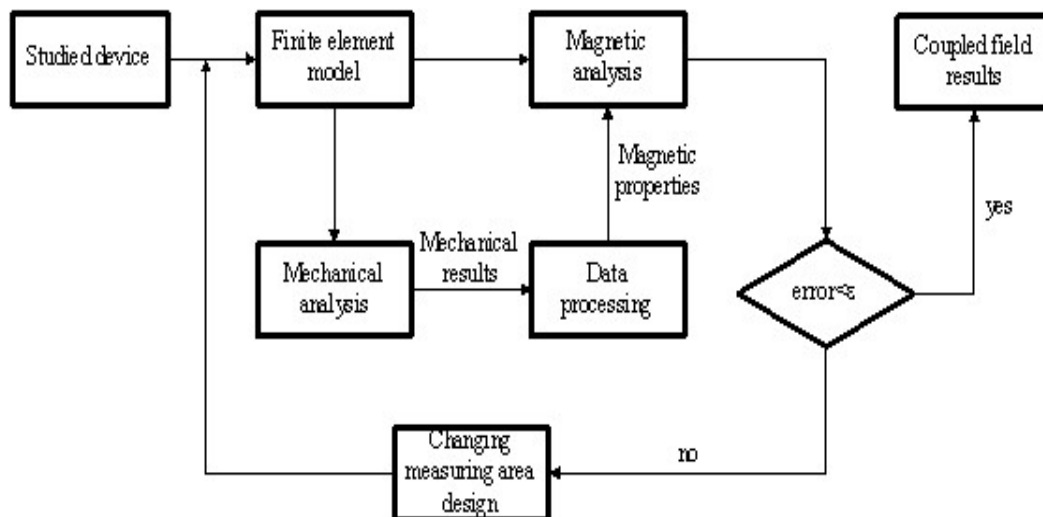


Fig. 8 – Schema bloc a procesului de calcul folosind metoda elementelor finite (FEM) cu programul MSC/EMAG.

Arborele folosit în acest experiment este un arbore real în care zona de lucru are un diametru mai mic cu scopul de a mări sensibilitatea traductorului în dauna liniarității care este de ~1% FS (cap de scală). Dacă anizotropia naturala a arborelui este greu de mascat de către șanțurile practicate la $\pm 45^\circ$, se poate practica montarea prin fretare a unui tub laminat cu magnetoelasticitate controlată pe arbore cu care (teoretic) se pot obtine erori de liniaritate ~0.1% [18].

Dacă liniarizarea acestui tip de traductor poate fi astfel controlată, rămâne problema erorii de temperatură.

Bozorth [19] arată că permeabilitatea relativă μ_r a suprafeței unui arbore în construcția de mașini crește în funcție de temperatură cu $0.5\%/0C$ care conduce la erori de măsurare a cuplului de $1\div 2.5\%$ FS. O reducere a erorii de temperatură se poate obține printr-o modificare constructivă a zonei de măsurare, de la cea folosită în experiment (Fig. 9a) la cea din Fig. 9b cu trei zone de măsurare.



Fig. 9 – Variante constructive ale arborelui de măsurare:
a – două zone, b – trei zone de măsurare.

În varianta cu trei zone, eroarea de temperatură scade sub 0.5% FS, se îmbunătățește liniaritatea și histereza, dar zona de măsurare are o lungime de doua ori mai mare.

O altă îmbunătățire majoră se obține cu structura Chevron *) din Fig.10 [20] realizată prin alăturarea celor trei zone din Fig. 9b.



Fig. 10 Structura Chevron

În acest fel, zona de măsurare este mai scurtă și eroarea de temperatură scade la $\sim 0.1\%$ FS.

Structura Chevron în diferite variante constructive, compensează efectele temperaturii globale și gradientului de temperatură, oferă un răspuns rapid, un raport semnal-zgomot de 60 dB și îndeplinește cerințele implementării la VE și Formula1.

În Fig. 11 se prezintă abaterile performanțelor unui traductor magnetoelastic montat pe un VE după o distanță parcursă de 500.000 mile [21].

*) denumirea "Chevron" provine din limba franceză și a fost folosită de André Citroën ca siglă la automobilele sale create în anii 1920-1930 ca amintire a inventării de către acesta a angrenajului cu dinți în V.

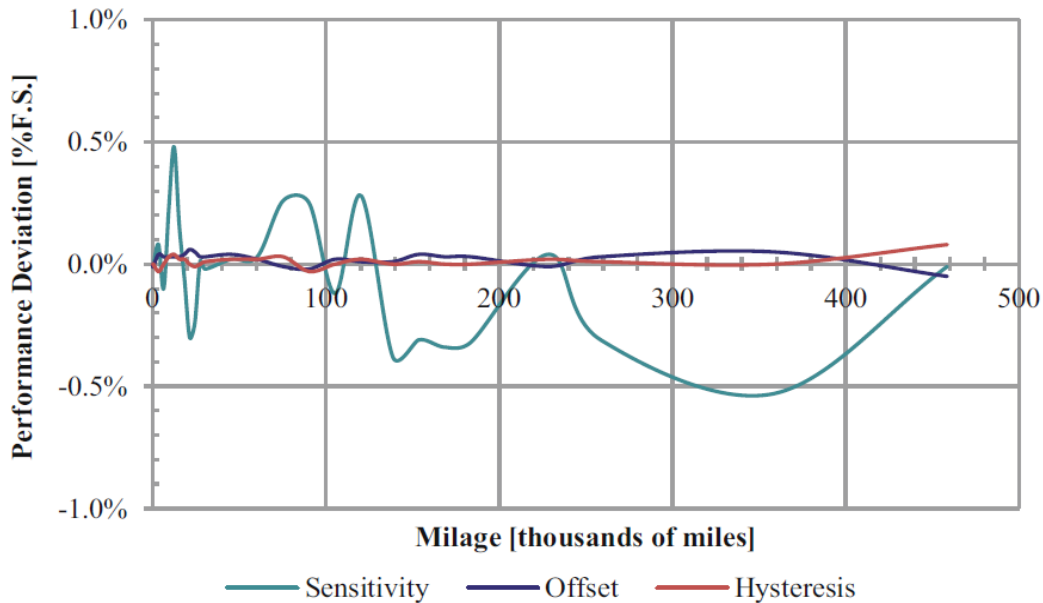


Fig. 11 – Variația sensibilității, offset-ului și histerezei unui TME-T tipic [21].

3. TRADUCTOARELE DE CUPLU DE BANDĂ LARGĂ

Traductoarele de cuplu sunt esențiale în cercetare, dezvoltare și testarea componentelor electromecanice pentru energetica industrială (motoare, generatoare, sisteme eoliene) precum și în domeniul automotive.

Ele trebuie să fie capabile să măsoare atât cupluri statice cât și dinamice.

Un exemplu îl reprezintă măsurarea dinamică a cuplului la motoare primare: măsurarea cuplului instantaneu, încercarea dinamică în sarcină, determinarea formei de undă a fluctuației cuplului (cogging torque) pentru motoarele electrice PMSM, modificarea stilului de comandă electronic al motorului (de exemplu tranziția de la modulație PWM la modulație în 6 trepte) [22,23].

Prin bandă largă la un traductor de cuplu magnetoelastic se înțelege o bandă de frecvență de maximum 10 kHz. Banda de frecvență uzuală este de 2 pana la 6 kHz (-3 dB) care acoperă necesitățile aplicațiilor arătate mai sus [24].

Traductorul descris în paragraful 2.2 din lucrare cotat ca un proptotip unicat poate determina cuplul static și dinamic cu o bandă de frecvență de cca 2 kHz.

În prezent, progresele care au loc fac ca valorile prezentate mai sus să poată fi îmbunătățite în funcție de materialele [25] și tehnologia disponibilă în corelare cu nivelul erorilor de liniaritate și temperatură.

4. TRADUCTOARELE DE CUPLU INTREGRATE ÎN MOTOARELE PRIMARE

Motoarele cu aprindere prin scânteie (ICE) și motoarele Diesel sunt utilizate în cele mai diferite domenii ale tehnicii, începând cu motoarele pentru automobile, autocamioane și tractoare și terminând cu motoarele pentru grupurile electrogene, mobile și staționare. Unul din parametrii folosiți pentru analiza condițiilor de funcționare a acestora îl reprezintă momentul motor transmis sarcinii.

La motoarele pentru mijloace de transport auto, măsurarea continuă a cuplului motor s-a răspândit foarte mult fiindcă, în acest fel, este posibil să se optimizeze sistemul de aprindere în corelare cu sistemul de injecție de carburant și, în cazul cutiilor de viteze automate, să se asigure raportul de transmisie optim economic din punct de vedere al consumului de carburant

și al parametrilor de mers [26]. Se folosesc în exclusivitate traductoare TME-T încă din 2013 de către firma Ford datorită sensibilității ridicate și a rezistenței mecanice în medii dificile la montarea la intrarea cutiei de viteze automată sau pe arborii planetari.

Soluția modernă pentru aceste dispozitive constă în alegerea unui punct de măsurare cât mai puțin afectat de vibrațiile de torsiune tipice pentru toate aplicațiile automotivă și, în același timp, suficient de accesibil.

4.1 Monitorizarea unei mașini de Formula 1 pe baza măsurării directe a cuplului

La mașinile de F1 s-a generalizat folosirea aplicațiilor de telemetrie în timp real pentru optimizarea, controlul și/sau reglarea în timpul cursei a parametrilor motorului și suspensiei. Senzorul folosit este în exclusivitate realizat cu un traductor TME-T, de tipul descris în paragraful 2.2, amplasat de obicei pe arborele de intrare al cutiei de viteze, tehnică descrisă pe larg în [27,28]. Astfel, conducerea unei curse de Formula 1 transformă inginerii din stand în participanți activi la succesul piloților. Acest lucru permite maparea directă a puterii și cuplului motorului, analiza schimbării vitezelor, diagnosticarea defectelor și eventuala remediere a unor defecțiuni. Generalizarea tehnicii de măsurare directă a cuplului a avut loc începând din anul 2000 [29], ajungând ca în momentul de față un TME-T să fie capabil să funcționeze la temperaturi medii de +200°C cu erori de măsurare globale sub 2% [30].

O altă perfecționare bazată pe măsurarea directă a cuplului este metoda KERS (Kinetic Energy Recovery System) [31], adică sistemul de recuperare a energiei cinetice pentru a măsura cu precizie absorbția și eliberarea energiei de frânare stocând-o pentru a fi folosită ulterior la accelerare.

Acesta transformă energia termică a frânării în energie electrică, îmbunătățind performanța și eficiența. Ca urmare, vehiculele de F1, începând din 2014, au devenit vehicule hibride.

Toată puterea mașinilor de F1 provine în continuare 100% de la motorul cu ardere internă (ICE) și carburantul său sustenabil. Nu există nicio intrare electrică externă. În schimb, toată energia electrică este generată din energia cinetică recuperată, de la frânare. O baterie pentru F1 are în jur de 4 MJ (1,1 kWh). Mașinile de F1 au voie să regenereze de peste două ori capacitatea bateriei pe parcursul unui tur. Acest lucru este posibil datorită încărcării și descărcării bateriei care are loc într-un tur: sistemul electric are o putere maximă limitată la 120 kW, iar cuplul maxim este, de asemenea, controlat și limitat la 200 Nm. Puterea maximă a mașinilor va fi în continuare de cca 400 kW pentru ICE cu un plus de 120 kW care se adaugă printr-un motor electric la accelerarea de la ieșirea din curba precedentă.

5. CONCLUZII

- Lucrarea este o introducere în magnetoelasticitatea aplicată la construcția și aplicațiile traductoarelor de moment de torsiune;
- Traductoarele TME-T sunt azi în producție industrială de serie deoarece au performanțe ridicate, costuri reduse, liniaritate $\leq 1\%$, integrare ușoară;
- Dintre diversele metode de detectare a cuplului, tehnologiile de măsurare magnetoelastică a cuplului sunt cele mai promițătoare pentru aplicațiile de electro-mobilitate (vehicule electrice, hibride și Formula 1) datorită performanțelor superioare și costurilor competitive;
- Experimentele și simulările efectuate demonstrează posibilitatea realizării practice a unor prototipuri de tipul arborilor de măsurare de tipul descris în paragraful 2.2;
- Într-o lucrare ulterioară se va prezenta utilizarea materialelor amorfe și nano-magnetice la construcția traductoarelor de cuplu.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. G. Hinz, H. Voigt, *Magnetoelastic Sensors*, In: R. Boll and K.J. Overshott, Sensors (eds), Ch. 4, VCH Verlag GmbH, 1989.
2. T. Aoki, *Application of Magnetism to Automobiles*, In: K. Fujisaki, (eds) Magnetic Material for Motor Drive Systems. Engineering Materials. Springer, Singapore, 2019.
3. A. Cișman, B.F. Rothenstein, A. Policec, *Fenomenene fizice in metale feromagnetice solicitate*, Editura Academiei, 150 pag., 1968.
4. E. Marinescu, A. Marinescu, *Introducere în magnetoelasticitate*, Editura ICPE, pag. 245, 1997.
5. ***https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/torque#!ref_hbm.com.
6. ****Comparison of Torque Sensor Technologies*, <https://www.transense.com/>
7. ***<https://www.verifiedmarketresearch.com/product/torque-sensor-market/>
8. A. Marinescu, Ecaterina Marinescu, *Magnetoelastic Tensometry in Modern Sensorics*, Mmde Conference, Paper M3-6, Bucharest, 2006.
9. W.J. Fleming, , *Magnetostrictive Torque Sensors - Comparison of Branch, Cross, and Solenoidal Designs*, SAE Technical Paper 900264, 1990.
10. W.J. Fleming, *Magnetostrictive Torque Sensors - Derivation of Transducer Model*, SAE Paper 890482, International Congress Detroit, MI February 27 March 3 1989.
11. I. Sasada, *Recent development of magnetostrictive torque sensors*, Transactions of IEE Japan, **114**, 3, pp. 277–281, 1994.
12. O. Dahle, *Measuring Means for Measuring a Torsional Stress in a shaft of Magnetostrictive Material*, US Patent 3,011,340.
13. O. Dahle, *The Ring Torductor - A Torque-Gauge Without Slip Rings, for Industrial Measurement and Control*, ASEA Journal 33 3 23 32 1960.
14. K. Blomkvist, J.O. Nordvall, *Magnetoelastic Torque Transducer*, US Patent 4,556,554.
15. J R Sobel, *Magnetoelastic Torque Transducer*, US Patent 4,873,874.
16. I. Garshelis, *Magnetoelastic Torque Transducer*, US Patent 5,052,232.
17. ***MSC Software Corporation (Actual hexagon.com) MSC/EMAG.
18. Ishino R. McConnell R., *A Noncontact Torque Sensor*, Conference Proceedings, Paper 109C Sensors Expo International Cleveland, OH September 12, 1989.
19. R.M. Bozorth, *Ferromagnetism*, Ch. 13, pp.968, Van Nostrand, 1951.
20. Sasada I. et al. *Characteristics of Chevron-Type Amorphous Torque Sensors Constructed By Explosion Bonding*, IEEE Trans. on Magnetics MAG-23 5 2188 2190 September 1987.
21. J. Beck, *Torque Sensors for High Volume Production Applications*, CTI Conference, 2019.
22. ***M. Marks, Measurement of instantaneous torque ripple, transient torque, and electric machine characteristics.
23. I. Sasada, T. Tanaka, M. Baba, & K. Harada, *Detection of Instantaneous Torque Using Magnetostrictive Effect in a Practical Ferromagnetic Shaft*, IEEE Trans. Magn., 24, 6, p 2886-2888 (1988).
24. ***Terms and expressions for specifying torque transducers.
25. *** Magnetostrictive Materials Market Size & Share 2025 – 2034.
26. G. Pietron, Y. Fujii, J. Kucharski, D. Yanakiev, D. et al., *Development of Magneto-Elastic Torque Sensor for Automatic Transmission Applications*, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. **6**, 2, pp. 529-534, 2013.
27. S. Bitar, J.S.Probst, I. Garshelis, *Development of Magnetoelastic Torque Sensor for Formula 1 and CHAMP Car Racing Application*, SAE Technical Series, 2000.
28. Chr. Wallin, L.Gustavsson, *Non-Contact Magnetostrictive Torque Sensor - Opportunities and Realisation*, In: Krueger, S., Gessner, W. (eds) Advanced Microsystems for Automotive Applications Yearbook. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.
29. Chr. Wallin et al, *Engine Monitoring of a Formula 1 Racing Car Based on Direct Torque Measurement*, SAE World Congress Detroit, Michigan March 4-7, 2002.
30. ***ABB Torductor®-S *Get the competitive edge using Direct Torque Measurement*.
31. ****La tecnología KERS: la clave del éxito en la Fórmula 1*, Revista Española de Electrónica, <https://www.redeweb.com>.