

ANALIZA PRIVIND CUPLELE DE FRECARÉ SPECIFICE SERVOVALVELOR ȘI PARTICULARITĂȚILE PROCESELOR TRIBOLOGICE ASOCIATE – partea I

ANALYSIS OF THE SERVO VALVES SPECIFIC COUPLING AND THE PARTICULARITIES OF THE ASSOCIATED TRIBOLOGICAL PROCESSES – Part I

Aristia-Ioana POPOVICI¹, Florin PETRESCU²

¹S.I. univ. dr. ing., U.T.C.B. - Facultatea de Utilaj Tehnologic
e-mail autor: arys_jo@yahoo.com

²Prof. univ. dr. ing., U.T.C.B. - Facultatea de Utilaj Tehnologic
e-mail autor: petrescu_florin21@yahoo.com

Rezumat: Articolele au ca obiectiv prezentarea principalelor aspecte privind tribologia servovalvelor, principala componentă a sistemelor hidraulice de reglare automată. Sunt identificate și caracterizate, din punct de vedere tribologic, cuplele caracteristice servovalvelor. Se prezintă formele constructive, materialele din care sunt realizate, cerințele de calitate realizate prin tratamente termice adecvate și relațiile stricte între dimensiunile funcționale de bază ale duzei și ale restrictorului privite în legătură cu fenomenele complexe care apar la curgerea lichidului hidraulic. Sunt prezentate procesele de frecare și uzare caracteristice servovalvelor, factorii de influență specifici și unele aspecte privind modelele matematice ale procesului de frecare (modelul Coulomb, modelul Stribeck, modelul Helouvry, teoria adeziunii Bowden-Tabor). Frecarea vâscoasă, proprie regimului normal de funcționare a servovalvelor, respectiv al cuplei sertar-bucșă este analizată cu legea Newton și în acest context sunt prezentate forțele de presiune și efectele acestora asupra proceselor tribologice specifice.

Cuvinte cheie: servovalva, lichid hidraulic, frecare

Abstract: The articles aim to present the main aspects of servo valves tribology, the main component of automatic hydraulic control systems. The specific coupling of servo valves are identified and characterized from tribological point of view. The constructive forms, the material from which they are built, the quality requirements achieved with adequate heat treatments and the strict relation between the basic functional dimensions of the nozzle and the restrictor are presented in relation to the complex phenomena that occur when the hydraulic fluid flows. Are presented the specific friction and wear processes characteristic of the servo valves, the specific influencing factors and some aspects regarding the mathematical models of the friction process (Coulomb model, Stribeck model, Helouvry model, Bowden-Tabor adhesion theory). Using Newton's law is analyzed the viscous friction - proper to the normal operation regime of the servo valve (of the drawer-sleeve coupling) – and are presented the pressure forces and their effects on the specific tribological processes.

Keywords: servo valve, hydraulic fluid,

1. INTRODUCERE

Sistemele hidraulice de reglare automată (SHRA) reprezintă un ansamblu de elemente interconectate care prin intermediul unui lichid hidraulic, aflat în mișcare sub presiune, asigură, în mod automat, reglarea și controlul unor mărimi de ieșire în funcție de legea de variație a

mărimii de intrare. Principala componentă a unui sistem hidraulic este servovalva.

Este cunoscut faptul că elementele servovalvelor sunt sensibile la contaminarea uleiurilor hidraulice și uzura elementelor componente. Contaminarea se referă la infestarea uleiului hidraulic cu particule solide, iar uzura la eroziunea abrazivă; aceste două procese se influențează reciproc [1][2][3].

Contaminarea și uzura pot provoca perturbații ale funcționării corecte a sistemelor, sau defecțiuni ale acestora. Defecțiunile pot fi bruște, imprevizibile și cu dezvoltare lentă, progresivă, caracteristice perioadei de funcționare. În prima categorie se înscrie ruperea arcului de reacție, colmatarea unei duze sau blocarea unei particule mari în jocul radial dintre sertar și bușă.

Cele mai frecvente „defecțiuni” progresive sunt [4]:

- răspuns mai lent al servovalvei, determinat de *contaminarea sau înfundarea* filtrului servovalvei;
- instabilitate a circuitului hidraulic datorită creșterii histerezisului în reacția servovalvei determinată de *creșterea jocului la contactul arcului de reacție cu canalul circular aferent sertarului servovalvei*;
- modificarea performanțelor servovalvei prin *creșterea forțelor de frecare vâscoase și creșterea jocului radial între sertar și bușă* datorită uzurii acestor elemente în contact;

Efectele procesului de uzare erozivă, provocate de acțiunea particulelor contaminante, se manifestă pe suprafețele active ale elementelor servovalvelor, prezentate în figura 1

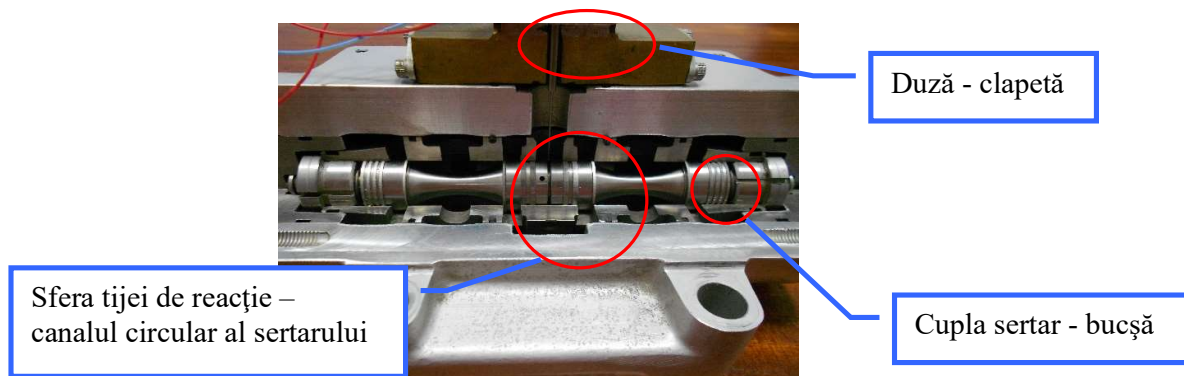


Fig. 1 Elementele servovalvelor supuse uzării

2. CUPLE TRIBOLOGICE SPECIFICE SERVOVALVELOR ȘI DISTRIBUITOARELOR PROPORȚIONALE - PARTICULARITĂȚI CONSTRUCTIVE, FUNCȚIONALE ȘI TRIBOLOGICE

Identificarea și caracterizarea cuplelor de frecare, după criterii științifice și clasificări consacrate, asigură premisele elaborării corecte a planurilor de cercetare a proceselor tribologice specifice cuplelor analizate.

Cupla tribologică (cuplă de frecare) este definită ca ansamblul format din cel puțin două elemente mecanice în contact și mișcare relativă, implicate în procesul de transmitere a forțelor și momentelor.

Contactul elementelor cuplei, uscat sau lubrifiat, este locul de manifestare a fenomenelor

de frecare și uzare.

Cuplele de frecare caracteristice servovalvelor sunt:

- a) sertar – bușă, componenta mecanică principală a amplificatorului hidraulic;
- b) sfera tijei de reacție – canalul circular al sertarului;
- c) duză – clapetă, ansamblu caracteristic preamplificatorului hidraulic.

Observație: Deși ansamblul duză – clapetă nu poate fi asimilat cuplei de frecare în sensul definiției acesteia, totuși suprafețele duzei și clapetei sunt în interacțiune cu lichidul hidraulic, consecința fiind uzarea acestora prin eroziune. Din acest punct de vedere ansamblul duză – clapetă poate fi considerat mai degrabă "cuplă de uzare" specifică servovalvelor.

2.1. Cupla sertar – bușă

Formele constructive specifice sertarului și bușei sunt prezentate în figura 2.

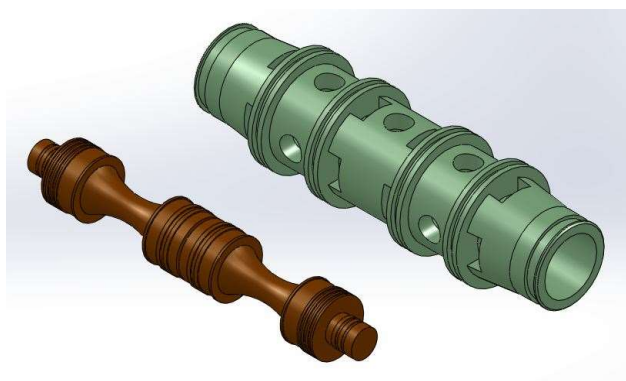


Fig. 2 Cupla sertar-bușă a servovalvelor

Materialele din care sunt realizate bușă și sertarul sunt oțeluri cu rezistență mare la uzură, cu deformări mici și stabilitate termică ridicată.

Uzual se folosesc oțelurile înalt aliate, de cementare (18M.C10, 18M.CN13, 21TMC12), de nitrurare (38MoCrAl9 – frecvența de utilizare cea mai mare) și inoxidabile martensitice (90MoCr18) [5]. Duritatea suprafețelor sertarului și bușei are valori medii de 60 HRC.

Tratamentele termice aplicate urmăresc realizarea unui strat superficial de 1-2 mm foarte dur, transformarea austenitei în martensită, eliminarea surselor de producere a fisurilor (sursă activă de oboseală mecanică superficială) etc.

Din punct de vedere tribologic, cupla sertar – bușă este descrisă mai jos, după criteriile clasificării cuplelor de frecare propusă de *Barwell* [6] și completată de *Pascovici* [7]:

- cupla face parte din clasa a III-a, cuple cu contact cilindric;
- configurația: conformă (suprafețe conjugate);
- aria nominală: $A_n > 0$;
- mișcarea relativă: alunecare;
- tipul contactului: plastic la nivelul rugozităților;
- modul de uzare: predominant – eroziune abrazivă, asociată cu abraziune, adeziune și oboseală;
- cuplu de materiale: dur / dur.

2.2. Cupla sfera tijei de reacție – canal circular sertar

Tija de reacție are două părți componente: tija tronconică și sfera de la capătul cilindric cu dimensiuni mai mici (fig. 3).

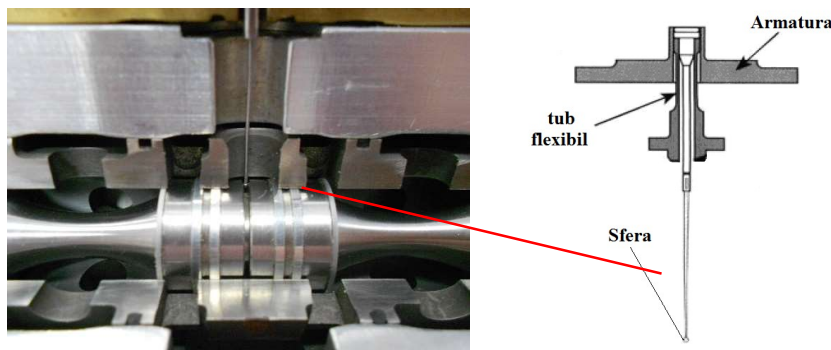


Fig. 3 Sfera tijei de reacție – canal circular al sertarului

Sfera este în contact cu canalul circular practicat pe suprafața cilindrică a sertarului.

În ceea ce privește materialul tijei de reacție, unele firme utilizează același material cu cel folosit la tuburile flexibile: aliajele de cupru – beriliu și aliaje mai complexe având diferite elemente de aliere precum: mangan, nichel, cobalt, siliciu, zirconiu, titan etc. [5]. Cerințele de calitate ale acestor materiale sunt:

- rezistența la oboseală;
- plasticitate ridicată în stare caldă;
- rezistență la frecare, uzură și fluaj;
- elasticitate adecvată;
- proprietăți mecanice superioare obținute prin TT adecvate;
- insensibilitate la producerea de scântei în timpul funcționării.

Tribologic cupla tijă de reacție – canal circular sertar are următoarele particularități:

- contact sferă – plan, punctiform, clasa I;
- configurație: neconformă (suprafețe neconjugate);
- aria nominală: $A_n = 0$;
- mișcarea relativă: alunecare;
- tipul contactului: concentrat, elastic hertzian;
- modul de uzare: preponderent abraziv;
- cuplul de materiale: dur / dur.

2.3. Cupla duză – clapetă

Problemele specifice preamplificatoarelor cu duză-clapetă sunt de importanță majoră asupra funcționării performante a servovalvelor.

Cercetările teoretice și experimentale au impus relații stricte între diametrele duzei și restrictorului, respectiv între debitele de fluid care trec prin acestea. Pentru ca preamplificatorul să nu funcționeze în saturație trebuie să se asigure un spațiu bine definit între clapetă și duză, caz în care rezistența duzei este mai puțin importantă [8][5][9]. În acest context se acordă atenție studiului experimental al influenței diametrului duzei asupra comportării dinamice a servovalvelor, rezultatele obținute fiind utile în proiectarea rațională a sistemului.

Construcția duzei este prezentată în figura 4.

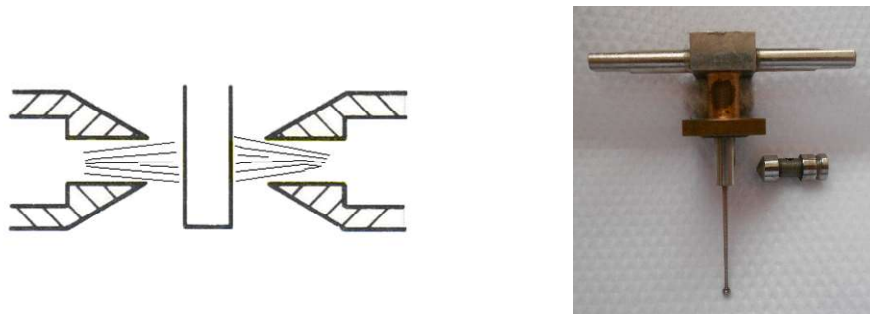


Fig. 4 Construcția duzei (ansamblul duză-clapetă)

Ajutajul duzei este realizat, ca formă și dimensiune, astfel încât să controleze fenomenele complexe care apar la curgerea lichidului hidraulic:

- precizia dimensională a diametrului duzei trebuie să asigure caracteristica de debit necesară;
- suprafața de lucru a fiecărei duze trebuie să fie perpendiculară pe axa găurii cu o precizie de 0,03 ... 0,05 mm; astfel se asigură caracteristica presiune de comandă – deplasare clapetă la care, pentru joc nul la clapetă, se obține presiunea maximă;
- conservarea formei și dimensiunilor capătului tronconic al duzei (controlul strict al uzării) pentru a se evita modificarea regiunilor de curgere specifice.

3. PROCESE DE FRECARĂ ȘI UZARE CARACTERISTICE SISTEMELOR HIDRAULICE DE REGLARE AUTOMATĂ. FACTORI DE INFLUENȚĂ

Studiul proceselor tribologice este relativ puțin dezvoltat în teoria și practica sistemelor hidraulice de reglare automată; frecarea și uzarea în diversele lor forme de manifestare, determină performanțele dinamice ale sistemelor hidraulice de reglare automată, și în special ale servovalvelor, elemente esențiale în transmiterea semnalelor între calculatorul electronic și sistemul hidraulic de execuție.

Scopul analizei tribologiei servovalvelor este de a stabili cele mai potrivite modele matematice ale frecării și uzării pentru a le utiliza în analiza efectelor acestora asupra performanțelor sistemelor hidraulice de reglare automată.

Procese de frecare, ungere și uzare specifice cuplelor sistemelor hidraulice de reglare automată sunt evidențiate în continuare.

Frecarea se manifestă sub două forme principale: **frecarea uscată** și **frecarea fluidă (vîscoasă)**.

Adeziunea, abraziunea și eroziunea însoțite de **oboseala mecanică superficială**, sunt formele de uzare specifice sistemelor analizate.

Frecarea uscată este proprie suprafețelor în contact direct, nemijlocit; fac excepție straturile de oxid și straturile adsorbite de molecule polare care se formează pe suprafețe, în cele mai frecvente situații, în mod natural. În acest caz un rol important îl au rugozitatea și proprietățile materialelor suprafețelor, coeficientul de frecare fiind esențial influențat de acestea.

Frecarea limită este frecarea prin intermediul unor straturi subțiri care împiedică parțial

contactul direct. Straturile subțiri pot fi: straturi de lubrifiant fluid, mono- sau pluri-molecular, straturi de lubrifiant solid sau straturi solide (oxizi, sulfuri, cloruri, etc.).

Alunecarea cu intermitențe (stick-slip = lipire-alunecare) este caracteristică suprafețelor cu mișcare de alunecare cu viteze mici ($0.18 \div 180$ mm/min). Alunecarea se caracterizează prin alternanța perioadelor de alunecare realizate cu viteze diferite; mișcarea are astfel un caracter sacadat, intermitent.

Frecarea (ungerea) fluidă presupune existența unui strat de lubrifiant, portant sau autoportant, care separă complet suprafețele cuplei. Frecarea vâscoasă este caracteristică acestui proces tribologic.

Factorii de influență ai proceselor tribologice specifice sistemelor hidraulice de reglare automată, respectiv servovalvelor pot fi grupați în patru clase: material, lubrifiant, parametri funcționali și parametri tehnologici (figura 5). De asemenea în figură sunt marcați factorii cu influența cea mai pronunțată asupra forței de frecare și intensității de uzare.

Materialul suprafețelor în contact este caracterizat din punct de vedere tribologic, de duritate, rugozitate, deformabilitate, proprietăți mecanice și caracteristici ale structurii metalografice.

Lubrifiantul influențează intensitatea proceselor de frecare și uzare prin vâscozitate, comportare reologică, conținut și nivel de aditivi etc. Contaminarea lubrifiantului (modificarea vâscozității și intensificarea proceselor erozive) asociată cu ceilalți factori precizați influențează performanțele dinamice ale servovalvelor.

Abaterile de formă și de poziție (parametri constructivi), precum și încărcarea, viteza și temperatura (parametri funcționali) au influență majoră asupra proceselor tribologice ale servovalvelor.

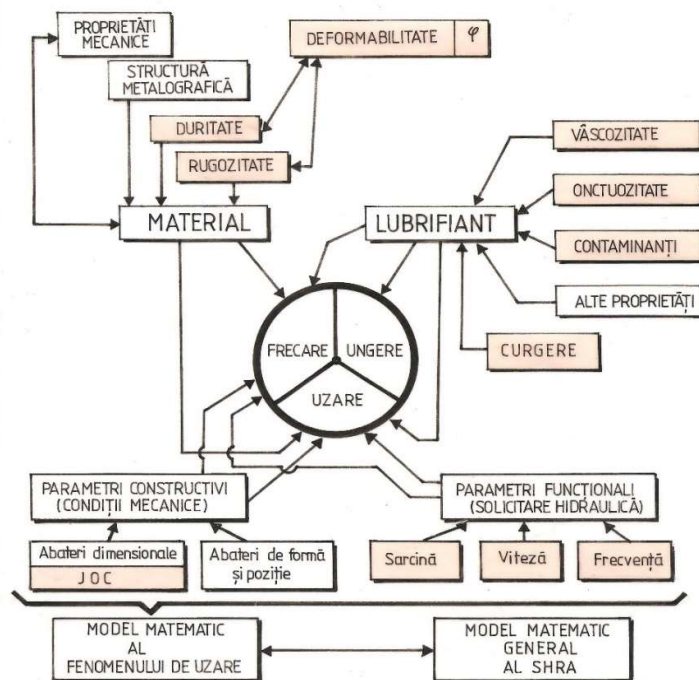


Fig. 5 Parametrii proceselor tribologice specifice servovalvelor

4. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND PROCESELE DE FRECARĂ SPECIFICĂ SERVOVALVELOR ȘI DISTRIBUITOARELOR PROPORȚIONALE

Este unanimă părerea cercetătorilor că frecarea este un proces complex, reuniune a mai multor fenomene fizice, chimice și metalurgice, influențat de o multitudine de factori, a căror interacțiune este, în numeroase cazuri, dificil de determinat experimental.

Frecarea este un proces tribologic caracteristic corpurilor în contact și mișcare relativă, cuantificat prin forța de frecare (F_f) sau momentul de frecare (M_f). Forța de frecare este generată de acțiunea forțelor normale și tangențiale aplicate corpurilor, forță care se opune mișcării relative și acționează pe aceeași direcție, în sens opus acesteia.

4.1. Clasificarea proceselor de frecare. Modelele matematice ale frecării

Regimurile de frecare sunt clasificate după mai multe criterii:

- a) după natura contactului suprafețelor (lubrifiat sau nelubrifiat):
 - frecarea vîscoasă;
 - frecarea uscată.
- b) după felul mișcării relative:
 - frecare de alunecare
 - frecarea de rostogolire [7];
 - frecarea de pivotare.
- c) în funcție de momentul în care se manifestă mișcarea:
 - frecare statică;
 - frecare cinetică (dinamică).

Frecările care apar în cuplele sistemelor mecanice și hidraulice, aflate în mișcare relativă, sunt determinate de o multitudine de factori și ca urmare cuantificarea forței de frecare este dificilă.

Singura ipoteză care permite efectuarea unui calcul relativ simplu, (dar) cu precizie satisfăcătoare, consideră forțele de frecare proporționale cu viteza [1].

Viteza este așadar un factor de influență majoră asupra procesului de uzare.

În funcție de viteza relativă a suprafețelor în contact regimurile de frecare sunt evidențiate de curba Stribeck în figura 6 [7]: regimul de frecare limită (zona I), regimul de frecare mixtă (zona II), regimul de frecare fluidă (zona III), regimul de curgere superlaminar (zona IV).

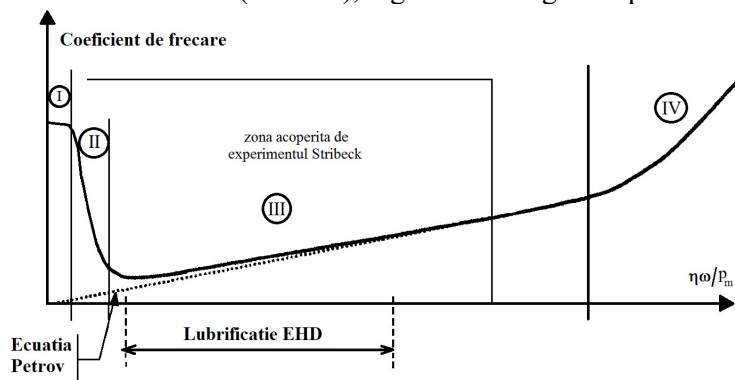


Fig. 6 Curba Stribeck [7]

Modelul Stribeck consideră variația coeficientului de frecare în raport cu parametrul complex $\eta\omega/p_m$ (cifra Hersey sau cifra Stribeck) și propune pentru calculul coeficientului de frecare convențional, relația:

$$\mu = \frac{\pi \eta \omega}{\psi p_m} \quad (1)$$

unde: ψ - jocul relativ (J/d); η - vîscozitatea; ω - viteza; p_m - presiunea medie convențională.

Frecarea statică, frecarea dinamică și frecarea vîscoasă sunt exprimate prin modele matematice distincte.

Modelul Coulomb descrie frecarea cu relația:

$$F_f = \mu \cdot N \cdot \text{sign} \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

unde: N – reprezintă forța normală la suprafața de contact;

μ – este coeficientul de frecare Coulomb.

Forța Coulomb este denumită și forța de frecare dinamică iar coeficientul de frecare Coulomb este numit și coeficient de frecare dinamică.

Forța de frecare statică se opune mișcării atunci când viteza are valoare nulă și este descrisă de relațiile:

$$F_{f \max} = \mu_s \cdot N \quad (3)$$

$$F_{f \min} = -\mu_s \cdot N \quad (4)$$

unde: μ_s – coeficientul de frecare statică.

Conceptul de frecare vîscoasă a fost introdus de *Osborne Reynolds* conform căruia forța de frecare vîscoasă se calculează cu relația:

$$F_f = \mu_v \cdot N \cdot \text{sign} \frac{dy}{dt} \quad (5)$$

unde: μ_v – coeficientul de frecare vîscoasă.

Modelul compus a celor trei componente ale frecării este prezentat în figura 7.

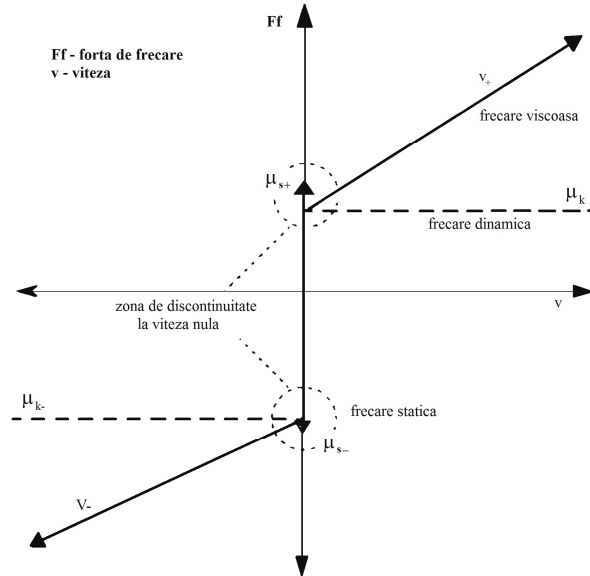


Fig. 7 Componentele forței de frecare statică, dinamică și vîscoasă [10]

Considerând și forța de frecare Stribeck componentele procesului de frecare sunt ilustrate în fig. 8.

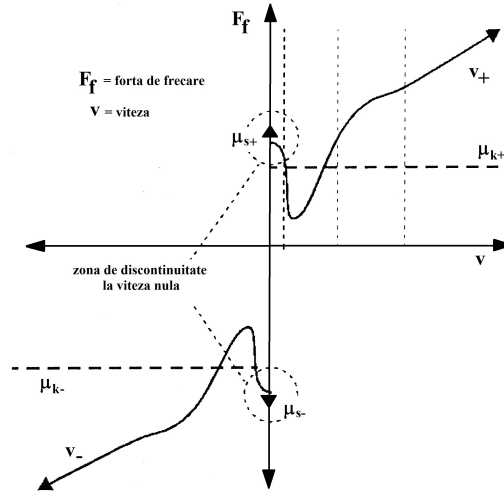


Fig. 8 Componentele forței de frecare cu considerarea componentei Stribeck [10]

Modelele de mai sus, cu toate limitele lor (nu se explică discontinuitățile din zona de viteză nulă, de exemplu) sunt frecvent utilizate în calculele ingineresti.

Modelul matematic propus de Helouvry în anul 1990 descrie frecarea Stribeck, întârzierea datorată frecării și efectul dat de frecarea statică [11][10]:

$$F(t) = F_u \cdot \text{sign}\left(\frac{dy}{dt}\right) + F_v \frac{dy}{dt} + F_s(\tau, t') \frac{1}{1 + \left(\frac{y'}{y_s'}\right)^2} \cdot \text{sign}\left(\frac{dy}{dt}\right) \quad (6)$$

unde : F_u - forța de frecare uscate [N];

F_v - forța de frecare vîscoase [N];

F_s - forța de frecare Stribeck [N];

τ - timpul caracteristic de creștere a frecării uscate [s];

t' - durata perioadei de stagnare [s];

y_s' - viteza caracteristică frecării Stribeck [m/s];

Considerând un singur sens de deplasare și prin urmare eliminând funcția, $\text{sign}\left(\frac{dy}{dt}\right)$, se obține expresia forței de frecare:

$$F(t) = F_u + F_v \frac{dy}{dt} + F_s(\tau, t') \frac{1}{1 + \left(\frac{y'}{y_s'}\right)^2} \quad (7)$$

Relațiile anterioare pot fi particularizate pentru diverse servomecanisme.

Acest model oferă o bună reprezentare a mișcării de alunecare cu viteze mici (stick-slip), și determină cu suficientă precizie efectele componentelor forței de frecare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Pătruț, P., Nicolae, I.**, - *Accionări hidraulice și automatizări – teorie, aparate, sisteme automate și aplicații industriale*, Editura “Nausicaa”, București, 1998
- [2] **Catană, I., Vasiliu, D., Vasiliu, N.**, - *Servomecanisme electrohidraulice – construcție, funcționare, modelare, simulare și proiectare asistată de calculator*, București, 1995
- [3] **Călinoiu, C., ș.a.**, - *Modelarea, simularea și identificarea experimentală a servomecanismelor hidraulice*, Editura Tehnică, București, 1998
- [4] **Borello, L., Dalla Vedova, M., Jacazio, G., Sorli, M.** - *A Prognostic Model for Electrohydraulic Servovalves*, Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009
- [5] **Ionescu, I., Mareș, C.**, - *Servovalve electrohidraulice – concepție, baze fizice, fabricație, încercări, tendințe* – Editura Lux Libris, Brașov, 1996
- [6] **Barwell, F.T.**, - *Bearing system: principles and practice*, Oxford Univ. Press, New York, 1978
- [7] **Pascovici D. Mircea, Cicone, T.**, - *Elemente de tribologie*, Editura BREN, 2001
- [8] **Catană, I.**, - *Sisteme automate electrohidraulice*, Litografiat, Universitatea Ecologică, București, 1995
- [9] <http://www.fluid-power.pub.ro/natdocs/achp.pdf>
- [10] **Tertișco, M., Stoica, P.**, - *Identificarea și estimarea parametrilor sistemelor*, Editura Academiei, București, 1980
- [11] **Helouvry, B.A., Dupont, P., Canudas de Wit, C.**, - *A survey of models analysis tools and compensation method for the control of machines with friction*, Automatica, vol. 30, no 7, pp. 1083-1138, Great Britain