

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris

CZU: 004.9/621.891

POȘTARU ANDREI

**MODELE ȘI ALGORITMI DE IDENTIFICARE ȘI
MONITORIZARE A EVOLUȚIEI DINAMICE ÎN
TRIBOSISTEME CU ALUNECARE**

232.02 – TEHNOLOGII, PRODUSE ȘI SISTEME INFORMAȚIONALE

REZUMATUL TEZEI DE DOCTOR ÎN ȘTIINȚE INGINEREȘTI

CHIȘINĂU, 2025

Teza a fost elaborată în cadrul Departamentului Ingineria Software și Automatică, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Conducători științifici:

Beșliu Victor	Doctor în informatică, profesor universitar, UTM.
Stoicev Petru	Doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, UTM.

Referenți Oficiali:

Manta Vasile Ion	Doctor inginer, profesor universitar, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi”, Iași, Facultatea de Automatică și Calculatoare.
Cerempei Valerian	Doctor habilitat în științe tehnice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Componența nominală a Consiliului Științific Specializat

Bostan Viorel	Președinte , doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.
Fiodorov Ion	Secretar științific , doctor în informatică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.
Bolun Ion	Doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.
Costaș Ilie	Doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, Academia de Studii Economice din Moldova.
Ciorbă Dumitru	Doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.
Sudacevschi Viorica	Doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.
Ceban Victor	Doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Susținerea va avea loc la 27.06.2025, ora 15⁰⁰, în Ședința Consiliului Științific Specializat **D 232.02-25-35** din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, pe adresa: str. Studenților 9/7, blocul de studii nr.3, aud. 208, MD 2045, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctor și rezumatul științific pot fi consultate la Biblioteca tehnico-științifică a Universității Tehnice a Moldovei și pagina web ANACEC (<https://www.anacec.md / www.cnaa.md/>).

Rezumatul științific a fost expediat la _____

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,

Dr. în informatică, conf. univ.	_____	Fiodorov Ion
---------------------------------	-------	---------------------

Conducători științifici

Dr. în informatică, prof. univ.	_____	Beșliu Victor
---------------------------------	-------	----------------------

Dr. hab. în științe tehnice, prof. univ.	_____	Stoicev Petru
--	-------	----------------------

Autor	_____	Poștaru Andrei
-------	-------	-----------------------

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI.....	7
1. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL IDENTIFICĂRII ȘI MONITORIZĂRII EVOLUȚIEI DINAMICE ÎN TRIBOSISTEME CU ALUNECARE	7
2. MODELUL MATEMATIC AL INTERACȚIUNII SISTEMULUI MECANIC CU TRIBOSISTEMUL DE ALUNECARE.....	9
3. MODELUL EXPERIMENTAL AL TRIBOSISTEMULUI DE ALUNECARE CU MIȘCĂRI RELATIVE VARIABLE	15
4. SISTEM INFORMATIC PENTRU ANALIZA COMPORTAMENTULUI DINAMIC AL TRIBOSISTEMULUI.....	17
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	27
BIBLIOGRAFIE	29
LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE LA TEMA TEZEI.....	31
ADNOTARE	33
ANNOTATION.....	34
АННОТАЦИЯ	35

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei de cercetare. Procesul de frecare, fiind unul complex, cuprinde o serie de fenomene și efecte de natură mecanică, termică, chimică, electrică și altele. Procesele mecanice, având un impact semnificativ, produc fluctuații ale forțelor de frecare care provoacă regimuri dinamice în funcționarea tribosistemelor și implicit a sistemelor mecanice [1, 2]. Fluctuațiile forței de frecare sunt cauzate de o multitudine de factori: structura discretă a ariei reale de contact; deformațiile elastice și plastice în zona de contact; variațiile coeficientului de frecare în funcție de viteza relativă; diferențele dintre caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor triboelementelor; influența diferită a temperaturii și a gradientului de temperatură asupra caracteristicilor materialelor triboelementelor și ale lubrifiantului. Aceste fluctuații, în anumite situații, conduc la generarea în elementele sistemului mecanic a unor zgomote sub formă de oscilații (numite *autooscilații de fricțiune*). Structura spectrului, amplitudinea și forma oscilațiilor sunt influențate de regimul de frecare, de parametrii de încărcare, de starea și proprietățile materialelor triboelementelor și ale lubrifiantului, precum și de originea și intensitatea proceselor ce au loc în zona de contact [3, 4, 5].

Autooscilațiile de fricțiune și îndeosebi cele de tip stick-slip, influențează direct atât caracteristicile de siguranță și fiabilitate ale sistemelor mecanice, cât și cele funcționale (de transmitere a mișcării, de precizie a poziționării organului de lucru ș.a.). Cunoașterea condițiilor de realizare și de susținere a autooscilațiilor de fricțiune și a predisunerii materialelor triboelementelor de a genera fluctuații locale ale forței de frecare, precum și cunoașterea legilor de variație a forței de frecare în condiții dinamice de funcționare a sistemului mecanic sunt probleme-cheie ridicate la proiectarea tribosistemelor.

Mijloacele tehnice moderne de cercetare, cu utilizarea *sistemele informatice* de achiziție și prelucrare a datelor experimentale au creat noi posibilități pentru studiul mai aprofundat al comportamentului tribosistemului cu alunecare în condiții dinamice de funcționare, inclusiv și în regim de generare al autooscilațiilor de fricțiune.

Prezenta lucrare este elaborată în cadrul Centrului „Precesia” al UTM. Tema este racordată la Programul National de Cercetare – Dezvoltare, Prioritatea strategică „Tehnologii inovative, energie sustenabilă, digitalizare”.

Scopul lucrării: Identificarea legilor și a modelelor de frecare specifice tribosistemelor cu alunecare în condiții dinamice de funcționare, prin intermediul modelărilor experimentale, utilizând sisteme informatice avansate de achiziție și prelucrare a datelor. Acest scop este atins prin realizarea **următoarelor obiective:**

- Dezvoltarea unui model matematic care să descrie influența reciprocă dintre sistemul oscilant (oscilatorul armonic) și tribosistem;
- Stabilirea relațiilor de echivalență energetică între tribosistem și oscilator pentru regimurile de alunecare și stick-slip;
- Elaborarea tribomodelului experimental al tribosistemului de alunecare, cu mișcare ciclică de translație;
- Proiectarea unui sistem informatic de achiziție și prelucrare a datelor experimentale;
- Adaptarea instalației de testare tribologică pentru tribomodel și echiparea acesteia cu transductori și senzori necesari sistemului informatic;
- Dezvoltarea unei aplicații software pentru achiziția și stocarea datelor experimentale în cadrul sistemului informatic;
- Dezvoltarea unor aplicații pentru prelucrarea datelor experimentale care să permită analiza regimului de alunecare și a regimului stick-slip, în cadrul sistemului informatic.

Ipoteza de cercetare presupune echivalența dintre nivelul stării energetice a tribosistemului și cel al sistemului oscilant (oscilatorul mecanic armonic) la interacțiunea acestora. Astfel, sub acțiunea tribosistemului, lucrul mecanic produs de forțele de frecare se transformă în cantități echivalente de variație a energiei oscilatorului. Variația de energie a oscilatorului se transmite către tribosistem, unde se disipează în zona de contact și se transformă în căldură. În acest mod, stabilirea stării tribosistemului este posibilă prin determinarea experimentală a variației energiei oscilatorului.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor alese pentru cercetare. Pentru realizarea cercetărilor s-au utilizat metode de modelare matematică și experimentală bazate pe teoria sistemelor. Un rol esențial a fost atribuit aplicării metodelor de achiziție și prelucrare a datelor experimentale utilizate în sisteme informatice adaptate la instalații tribometrice care funcționează în regim dinamic.

Noutatea științifică: A fost dezvoltat un sistem informatic inovativ, realizat în mediul LabVIEW integrat cu o instalație specializată pentru cercetări tribometrice. Acest sistem a permis realizarea unor investigații avansate privind comportamentul tribosistemului de alunecare în condiții dinamice de funcționare, contribuind astfel la analiza detaliată a parametrilor tribologici și la optimizarea metodologiilor de cercetare.

Problema științifică soluționată constă în stabilirea comportamentului tribologic al elementelor tribosistemului de alunecare în condiții dinamice de funcționare. Aceasta s-a realizat prin dezvoltarea unor mijloace noi de cercetare, ceea ce a permis evaluarea caracteristicilor de

frecare în regimuri variabile de încărcare și a facilitat optimizarea performanței tribosistemelor în aplicațiile industriale.

Valoarea aplicativă a lucrării: Sistemul informatic, propus în cadrul tezei, oferă posibilitatea stabilirii legilor de frecare în condițiile realizării autooscilațiilor de fricțiune. Acesta permite efectuarea experimentelor necesare pentru alegerea materialelor cuplelor de frecare și a lubrifianților, în vederea utilizării acestora în sisteme mecanice specifice. O altă aplicație practică importantă este compensarea influenței forței de frecare asupra stabilității și preciziei mișcărilor în sisteme mecanice, precum cele din domeniul roboticii și utilajelor tehnologice.

Implementarea rezultatelor științifice. Sistemul informatic elaborat este implementat în cadrul Centrului Precesia al UTM, proiecte de cercetare: Program de Stat (2020-2023), nr. 160 – PS (cifra proiectului 20.80009.5007.24, din 31.01.2020) ”Majorarea competitivității transmisiilor precesionale prin elaborarea și valorificarea angrenajului cu contact conform al dinților și extinderea ariei lor de aplicație”; Subprogramul de cercetare în cadrul programului instituțional de cercetare al organizației (2024-2027) "Dezvoltarea performanțelor mecanismelor de acționare a mașinilor în baza transmisiilor precesionale, sisteme mecanice și transmisii magnetice” (Codul subprogramului 02.06.01). Coordonator proiect, academician Ion Bostan. Astfel, tema și textul tezei sunt corelate cu direcțiile prioritare de cercetare-dezvoltare ale Republicii Moldova și cu tendințele științei mondiale. Toate cercetările efectuate în teză, precum și rezultatele științifice obținute, se încadrează în Prioritatea Strategică V. Tehnologii inovative, energie sustenabilă, digitalizare.

Rezultatele științifice înaintate spre susținere:

- Modelul matematic al tribosistemului de alunecare la mișcare relativă de translație cu viteză variabilă;
- Modelul experimental al tribosistemului pentru implementarea modelului matematic propus;
- Aplicația de achiziție și stocare a datelor experimentale ale sistemului informatic;
- Aplicația de prelucrare a datelor experimentale ale sistemului informatic pentru determinarea legilor de frecare ale tribosistemului în regim de alunecare;
- Aplicația de prelucrare a datelor experimentale ale sistemului informatic pentru determinarea legilor de frecare ale tribosistemului în regim stick-slip.

Aprobarea rezultatelor cercetărilor. Conceptul, metodele și rezultatele principale prezentate în lucrare au fost publicate în reviste internaționale și naționale, precum și în lucrările conferințelor naționale și internaționale:

- The 11th International Conference on Tribology ROTRIB'10, IAȘI, ROMANIA, November 4 - 6, 2010;
- ModTech International Conference - New face of TMCR, Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27th May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova;
- The 2nd International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems DIPRE'12, 31 mai – 01 iunie 2012 Galați, Romania;
- Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 16 – 18 noiembrie 2017, Chișinău, Republica Moldova;
- ModTech 2023 International Conference, Modern Technologies in Industrial Engineering, June 14-17, 2023, Bucharest, Romania;
- Postaru, A.G. Experimental Method and Software Instruments for Sliding Tribosystem Dynamic Behavior Research. Surface Engineering and Applied Electrochemistry 60, 706–716 (2024). <https://doi.org/10.3103/S1068375524700297>.

Publicații la tema tezei. La tema tezei au fost publicate 12 lucrări științifice: 8 articole în reviste (5 în reviste internaționale), dintre care 2 de unic autor și 4 articole în culegeri științifice, dintre care 1 de unic autor.

Structura și volumul lucrării. Teza este structurată în introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie (114 titluri) și două anexe. Conținutul principal al tezei este expus pe 128 pagini, incluzând 90 figuri și un tabel.

Cuvinte-cheie: forță de frecare, tribosistem, tribomodel, modelare, energie, disipare, LabVIEW, sistem informatic.

CONȚINUTUL TEZEI

În *Introducere* se argumentează și se prezintă actualitatea cercetării referitoare la comportamentul tribosistemelor de alunecare în condiții dinamice de funcționare. Se accentuează necesitatea stabilirii legii de frecare în contextul autooscilațiilor de frecțiune, un fenomen complex care influențează performanțele tribosistemelor în regimuri dinamice de funcționare.

1. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL IDENTIFICĂRII ȘI MONITORIZĂRII EVOLUȚIEI DINAMICE ÎN TRIBOSISTEME CU ALUNECARE

În *Capitolul 1* este efectuată analiza fenomenului de frecare, care apare în contact la interacțiunea a două corpuri și se manifestă prin opunerea de rezistență la mișcare relativă.

Procesul de frecare este unul complicat care decurge în mod diferit pentru diverse situații datorită influenței mai multor factori dintre care: forma și dimensiunile contactului; tipul mișcării relative; originea și proprietățile materialelor corpurilor aflate în contact; procesele care decurg în zona contactului la mișcarea relativă a suprafețelor; condițiile de lucru și regimurile de funcționare. Aici se specifică o serie de efecte cum ar fi cele identificate de Stribeck și Dahl, inclusiv histerezisul la nivel de microdeplasări în zona contactului în stare de pre-alunecare și în stare de alunecare cu viteză variabilă după valoare și sens. Efectele menționate se caracterizează prin variație în timp și după coordonată a forței de frecare, care în rezultat influențează dinamica procesului de frecare. În acest context, pentru studierea procesului de frecare și uzură din diferite aspecte a fost instituită o nouă direcție multidisciplinară științifico-inginerească, denumită *tribologie*. Obiectele de studiu ai tribologiei sunt *tribosistemele* care, din punct de vedere structural, sunt compuse din două triboelemente solide aflate în mișcare relativă, lubrifiant și mediul de lucru. Triboelementele sunt caracterizate de proprietăți și acțiuni reciproce.

În rezultatul variației forței de frecare tribosistemele generează în elementele sistemului mecanic oscilații sub formă de vibrații și zgomote, numite în domeniul tribologiei *autooscilații de fricțiune*. După formă autooscilațiile variază de la cvasiarmonice până la stick-slip. În această situație, pentru cercetarea comportamentului dinamic al sistemelor mecanice sub acțiunea tribosistemelor, au fost formulate mai multe modele ale legilor forței de frecare. În structura acestor legi se regăsesc, în calitate de factori, diferite modele ale efectelor frecării (Stribeck, Dahl, de histerezis) exprimate prin funcții neliniare. O serie dintre aceste modele ale legilor de frecare sunt analizate în lucrarea [6]. Cercetările date au fost efectuate prin modelări matematice și experimentale. În cadrul acestor modelări în calitate de element sensibil la variațiile forței de frecare a fost acceptat oscilatorul armonic cu elemente elastice [5, 7, 8].

Modelele matematice pentru studierea comportamentului dinamic al sistemului mecanic la interacțiune cu tribosistemul sunt stabilite în baza ecuațiilor fundamentale (de mișcare) ale mecanicii. În rezultatul rezolvării ecuațiilor de mișcare prin metode numerice au fost determinate unele condiții care conduc la generarea autooscilațiilor de fricțiune. Acestea se referă în primul rând la prezența în structura modelului legii forței de frecare a termenilor neliniari de ordin superior în raport cu viteza de alunecare. Alte condiții se referă la starea contactului, caracterizată de deformarea rugozităților pe direcție tangențială și normală mișcării. Tipul autooscilațiilor (cvasiarmonice sau stick-slip) depinde de nivelul factorilor de neliniaritate [7, 8].

Studiul comportamentului dinamic al sistemului mecanic prin metode matematice în condiții de generare a autooscilațiilor de fricțiune s-a dovedit a fi complicat din cauza complexității și diversității modelelor pentru legile forțelor de frecare. O abordare mai sigură pentru stabilirea

legilor de frecare în condiții dinamice este cea experimentală. Însă și în cazul cercetărilor experimentale apar dificultăți legate de necesitatea unor utilaje specializate de testare, precizie și flux mare de date experimentale. În acest sens, tehnologiile informatice sunt indispensabile, iar pentru achiziția datelor se folosesc canale de măsurare a parametrilor tribosistemului care includ traductori, dispozitive de condiționare a semnalelor, convertori de semnal și calculatoare. Integrarea tehnologiilor digitale în tribologie [9, 10] oferă oportunități semnificative pentru îmbunătățirea preciziei și eficienței măsurărilor, dar și pentru reducerea timpului de procesare și analiză a datelor experimentale.

2. MODELUL MATEMATIC AL INTERACȚIUNII SISTEMULUI MECANIC CU TRIBOSISTEMUL DE ALUNECARE

În *Capitolul 2* se examinează principiile de modelare matematică a interacțiunii sistem mecanic-tribosistem cu alunecare în condiții dinamice de funcționare și în special la generarea autooscilațiilor de fricțiune. La modelare se pune problema stabilirii legii forței de frecare pentru condiții concrete de lucru al sistemului mecanic. Această problemă este deosebit de dificilă, din care cauză modelările trebuie formalizate și executate în cadrul ecuațiilor fundamentale ale dinamicii, alcătuite în baza formalismului Newtonian sau a celui Lagrangian [11, 12].

Modelul matematic a fost realizat în baza ecuației Lagrange

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q_n, \quad (1)$$

unde: q , $\dot{q}$ – coordonata și viteza generalizată în spațiul configurațiilor; $(L = T - \Pi)$ – funcția Lagrange; T , Π – energia cinetică și potențială; Q_n – forța generalizată neconservativă.

Sensul fizic și modelul matematic al forței generalizate neconservative Q_n depinde de regimul de mișcare relativă a suprafețelor în contact (valoarea vitezei relative v_r) care poate fi cu alunecare – *slip* (pentru $v_r \neq 0$) sau *lipire – stick* (pentru $v_r = 0$).

$$Q_n = \begin{cases} Q_d(q, \dot{q}, v_r), & v_r \neq 0 \\ Q_s(q, \dot{q}), & v_r = 0 \end{cases} \quad (2)$$

În cadrul formalismului Lagrangian forța generalizată Q_d rezultă dintr-o funcție disipativă [12, 13] de tip Rayleigh. Funcția disipativă reprezintă intensitatea de disipare a energiei și se află într-o proporționalitate directă cu puterea P_d a forțelor disipative (de frecare).

Modelarea sistemului mecanic se efectuează în baza oscilatorului armonic cu elemente elastice [14] care interacționează cu tribosistemul. Modelul tribosistemului constă din două triboelemente, dintre care cel superior este fixat de blocul oscilatorului, iar cel inferior se fixează pe o platformă care efectuează mișcare de translație cu viteza V . În rezultat, se obține un sistem

complex numit „oscilator-tribosistem”. Pentru oscilatorul cu un grad de libertate, coordonata generalizată se substituie cu coordonata carteziană ($q = X$) a poziției centrului maselor blocului în raport cu punctul de echilibru stabil, iar viteza din relația (1) devine corespunzător $\dot{q} = \dot{X}$. Funcția Lagrange exprimată în caracteristicile de stare ale oscilatorului X și $\dot{X}$ capătă forma, $L = m \frac{\dot{X}^2}{2} - c \frac{X^2}{2}$ unde: m – masa blocului oscilatorului; c – rigiditatea elementelor elastice. Caracteristica de bază a oscilatorului este frecvența ciclică naturală $\omega = \sqrt{c/m}$.

Pentru analiza stării oscilatorului, rezultată din acțiunea forței de frecare, soluțiile ecuației Lagrange se prezintă în planul fazelor cu coordonate fazice X și $Y = \dot{X}/\omega$. Variabilele de stare X și Y se determina prin metode experimentale.

Comportamentul dinamic al sistemului oscilator-tribosistem se examinează în baza ipotezei de echivalență dintre starea energetică a tribosistemului și a oscilatorului [15, 16], caracterizată de:

- lucrul mecanic al forței de frecare W și puterea P_f de disipare a energiei (pentru tribosistem);
- energia E și variația ei în timp dE/dt (pentru oscilator).

În baza analizei stării oscilatorului se stabilește legea forței de frecare pentru condiții dinamice de funcționare a tribosistemului.

Mișcarea oscilatorie în regim cu alunecare

În cazul mișcării cu alunecare blocul, sub acțiunea forței de frecare, se deplasează într-un punct O^* de echilibru instabil cu coordonata X^* . În raport cu acest punct oscilatorul se află într-o stare cvasistaționară. La producerea autooscilațiilor de fricțiune, coordonata X_i , viteza $\dot{X}_i$ și viteza relativă în contact v_r^i în limitele ciclului i de oscilație se determină conform relației

$$\begin{cases} X_i = X_i^* + x_i \\ \dot{X}_i = \dot{x}_i \\ v_r^i = \dot{x}_i - V_i \end{cases} \quad (3)$$

Portretul fazic al autooscilațiilor de fricțiune pentru două cicluri consecutive i și $i + 1$ este prezentat în (Fig. 1).

În conformitate cu portretul fazic (Fig. 1) expresia energiei totale E_i a oscilatorului pe perioada ciclului i capătă forma:

$$E_i = \frac{1}{2} c \left[(X_i^* + x_i)^2 + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} c (X_i^*)^2 + c X_i^* x_i + \frac{1}{2} c \left[x_i^2 + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

În relația (4) apar trei factori:

1. $\frac{1}{2} c (X_i^*)^2$ - factorul energetic cvasistaționar;

$$P_f = P_c^* + P_d. \quad (7)$$

Valoarea componentei P_c^* se determină în raport cu viteza V a platformei

$$P_c^* = F_c^* \cdot V = cX^* \cdot V. \quad (8)$$

Componenta dinamică $F_{din}(v_r)$ a forței de frecare depinde de nivelul de variație a stării energetice a oscilatorului și a tribosistemului și se determină în corespundere cu variația factorilor 2 și 3 din relația (4).

$$\begin{cases} P_d = \frac{dW}{dt} = F_{din} v_r = \frac{dE}{dt} \\ \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}(cX^*x) + \frac{d}{dt}\left\{\frac{1}{2}c\left[x^2 + \left(\frac{\dot{x}}{\omega}\right)^2\right]\right\} \end{cases} \quad (9)$$

În rezultatul analizei modelului matematic al interacțiunii dintre tribosistem și oscilatorul armonic au fost stabilite relațiile de calcul ale componentelor forței de frecare în condiții de generare a autooscilațiilor de fricțiune

$$\begin{cases} F_c = cX^* \\ F_{din}^{X^*x}(v_r) = \frac{d}{dt}(cX^*x)/v_r \\ F_{din}^x(v_r) = \frac{d}{dt}\left\{\frac{1}{2}c\left[x^2 + \left(\frac{\dot{x}}{\omega}\right)^2\right]\right\}/v_r \end{cases}. \quad (10)$$

Componentele forței de frecare (10) reprezintă:

- F_c , componenta cinetică cvasistaționară (de tip Coulomb) care determină nivelul de disipare a energiei în zona contactului la mișcarea relativă a suprafețelor;
- $F_{din}^x(v_r)$, componenta variabilă neliniară a forței de frecare definită de efectele dinamice din zona contactului;
- $F_{din}^{X^*x}(v_r)$, componenta forței de frecare de influență reciprocă dintre componenta cvasistaționară și cea variabilă.

Relațiile de calcul obținute în conformitate cu modelul matematic se folosesc pentru a stabili legile forței de frecare cu ajutorul sistemului informatic propus. Pentru implementare a fost ales mediul de programare LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) [17, 18, 19] care utilizează limbajul „G”. Acest limbaj grafic de programare este bazat pe reprezentări grafice și oferă numeroase avantaje în domeniul automatizării și procesării de date.

Deoarece G folosește un model de programare *bazat pe flux de date*, aceasta îl face mai intuitiv și mai accesibil pentru implementări ale modelelor matematice. Programatorii creează *diagrame bloc* care definesc logica de implementare, eliminând necesitatea de a scrie cod, ceea ce reduce posibilitatea apariției erorilor de sintaxă.

Drept exemplu de aplicație în LabVIEW (Fig. 2) este prezentat calculul puterii de disipare și a forțelor de frecare. Modelul de calcul al componentelor variabile ale puterii este prezentat în

relația (9), iar pentru puterea forțelor de frecare cvasistaționare pe ciclu – în relația (8). Modelul de calcul al forței de frecare este prezentat în relația (10).

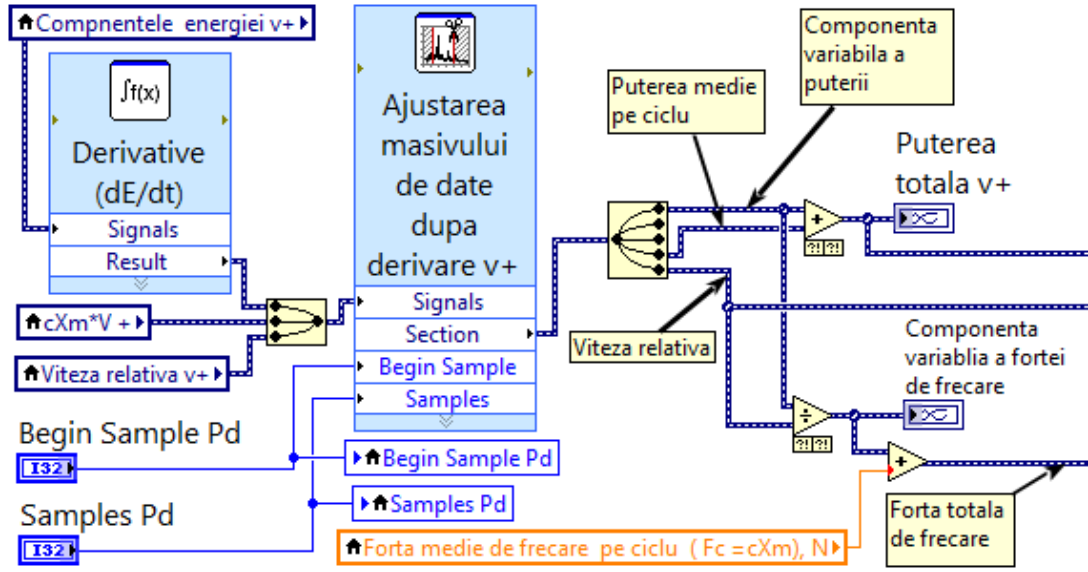


Fig. 2. Calculul puterii de disipare și al forțelor de frecare

Mișcarea în regim stick-slip

Ciclul de mișcare stick-slip se produce în două faze separate, 1- lipire (*stick*) și 2-alunecare (*slip*), care se succed periodic. Perioada ciclului i de mișcare se apreciază din relația

$$T_i = t_1^i + t_2^i, \quad (11)$$

unde: t_1^i – durata fazei *stick*; t_2^i – durata fazei *slip*.

Mișcarea pe faza stick. Pe faza stick viteza relativă $v_r = 0$, iar forța generalizată Q_n din ecuația (1) se substituie cu forța $Q_s(q, \dot{q})$. În coordonate carteziene, forța generalizată Q_s este reprezentată de forța de frecare în contact F_{fs} pe faza stick care variază în limitele

$$F_{fs}^{min} \leq F_{fs} \leq F_{fs}^{max}. \quad (12)$$

Valoare maximală a acestei forțe $F_{fs}^{max} = F_s$ reprezintă forța statică de frecare în momentul ruperii contactului la tranziție pe faza slip.

Pentru determinarea forței de frecare, în baza soluțiilor ecuației (1), prezentate în planul fazelor, se determină energia totală a oscilatorului

$$E_i = \frac{1}{2} c \left[X_i^2 + \left(\frac{\dot{X}_i}{\omega} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

La o variație elementară a energiei oscilatorului δE_i în limitele fazei *stick* se produce o cantitate elementară echivalentă δW_i de lucru mecanic al forței de frecare F_{fs}

$$\delta E_i = \delta \left\{ \frac{1}{2} c \left[X_i^2 + \left(\frac{\dot{X}_i}{\omega} \right)^2 \right] \right\} = \delta W_i = F_{fs} \delta X_i, \quad (14)$$

unde: δX_i - variația elementară (diferență finită) a coordonatei fazice (deplasării oscilatorului).

Conform expresiei (14) valoarea instantanee a forței de frecare F_{fs} la fiecare variație elementară (diferență finită) a energiei se stabilește cu relația

$$F_{fs} = \delta E_i / \delta X_i. \quad (15)$$

Mișcarea pe faza slip. În momentul tranziției pe faza slip, forța generalizată Q_n din ecuația (1) devine dependentă de viteza relativă v_r și se substituie cu componenta dinamică $F_v^i(v_r^i)$ a forței de frecare. Pentru determinarea acestei componente se stabilesc variațiile elementare (diferențele finite) ale deplasărilor locale ale contactului pe calea de frecare l .

$$\delta l = v_r^i dt \quad (16)$$

Componenta variabilă (dinamică) a forței de frecare pe faza slip a ciclului i se stabilește conform relației

$$F_v^i(v_r^i) = (\delta E_i / \delta l) = \delta \left\{ \frac{1}{2} c \left[X_i^2 + \left(\frac{\dot{X}_i}{\omega} \right)^2 \right] \right\} / \delta l. \quad (17)$$

Forța de frecare pe faza slip se determină în raport cu valoarea reper reprezentată de forța de frecare statică F_s . Rezultanta forței de frecare pe faza slip se determină conform relației

$$F_f = F_s + F_v(v_r). \quad (18)$$

În calitate de exemplu (Fig. 3) sunt prezentate calculele valorilor în diferențe finite a energiei δE_i , a deplasării oscilatorului δX_i și a căii de frecare δl .

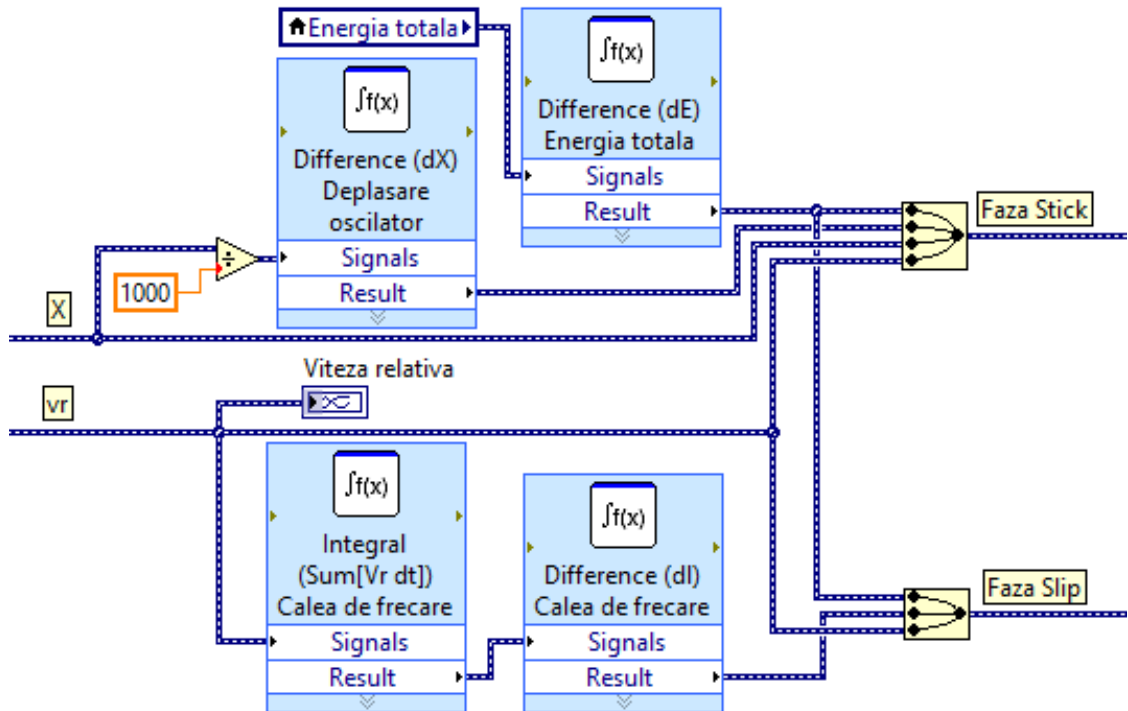


Fig. 3. Stabilirea valorilor în diferențe finite a energiei E , a deplasării oscilatorului X și a căii de frecare l

3. MODELUL EXPERIMENTAL AL TRIBOSISTEMULUI DE ALUNECARE CU MIȘCĂRI RELATIVE VARIABLE

Capitolul 3 se referă la modelarea experimentală a tribosistemelor de alunecare la mișcări cu viteză relativă variabilă. La elaborarea tribomodelului se impune o serie de cerințe legate de: măsurarea forțelor de frecare în condiții dinamice de funcționare; asigurarea tipului de mișcare relativă și a regimurilor de lucru apropiate de cele ale tribosistemelor reale; reproducerea pe tribomodel a proceselor dinamice din zona contactului.

În acest context, un model mai adecvat se obține utilizând conceptul de tribosistem-tribomodel elaborat de profesorul Ioan Crudu [20]. Conform acestui concept, procesele tribologice de frecare și uzură se produc într-un strat, numit tribostrat, care cuprinde suprafețele de contact ale triboelementelor și un element intermediar interpus în zona de contact. Sub influența parametrilor de comandă (încărcare și viteză relativă), starea tribostratului se modifică continuu în funcție de timp și de coordonate. Modificarea de stare este evaluată în baza caracteristicilor microgeometrice (rugozităților) ale suprafețelor de contact și ale caracteristicilor mecanice ale materialelor (duritate, microduritate) în zona straturilor superficiale ale triboelementelor. Controlul evoluției dinamice a tribostratului se efectuează cu forța de frecare, zgomotele produse la fluctuațiile forței de frecare; puterea de disipare a energiei în zona contactului; lucrul mecanic al forțelor de frecare; temperatura în zona contactului generată din procesul de frecare.

În cadrul lucrării a fost elaborat tribomodelul unui tribosistem de alunecare cu mișcare ciclică de translație, în care se realizează regimul dinamic de funcționare caracterizat prin viteză relativă variabilă pe cursă cu schimbare de sens a mișcării în zonele punctelor de întoarcere. Acest regim de mișcare creează condiții pentru generarea autooscilațiilor de fricțiune.

Din punct de vedere constructiv, tribomodelul trebuie să asigure, în raport natural sau prin similitudine, condițiile de contact ale suprafețelor conjugate ale tribosistemului luat în studiu. Aceasta se obține prin alegerea corespunzătoare a formei și dimensiunilor suprafețelor de contact ale triboelementelor-model. La executarea triboelementelor este necesar să se țină cont de condițiile tehnologice și de metodele de obținere a tribomaterialelor.

Cercetările experimentale pe tribomodele cu mișcare ciclică de translație se efectuează utilizând instalația pentru cercetări tribometrice din dotarea laboratorului de tribologie din cadrul centrului „Precesia” al UTM. Pentru reproducerea experimentală a regimurilor dinamice de funcționare a sistemului mecanic la interacțiune cu tribosistemul, inclusiv și cel cu autooscilații de fricțiune, a fost elaborată o construcție originală a camerei de testare a instalației. În calitate de organ sensibil la fluctuațiile forțelor de frecare s-a utilizat oscilatorul armonic cu elemente

elastice. Schema cinematică a instalației de testare în varianta constructivă originală [21] este prezentată în (Fig. 4).

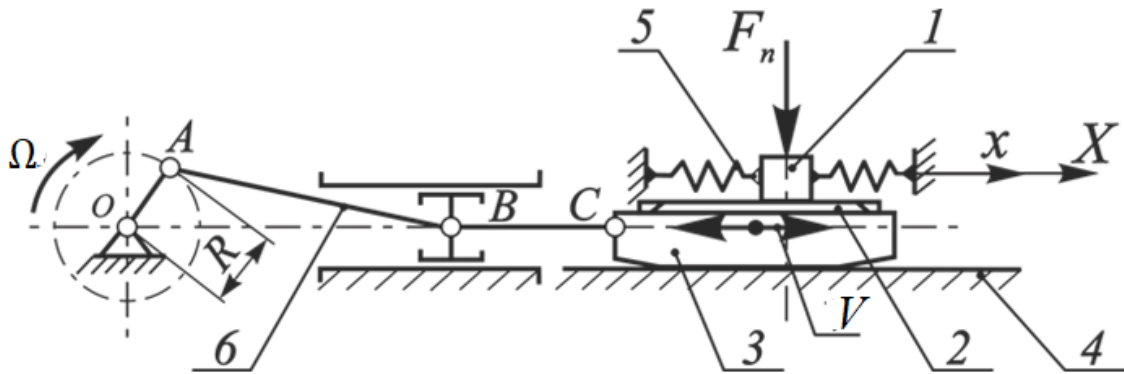


Fig. 4. Schema cinematică a instalației de testare [21]

Structural, camera de testare constă din blocul 1 (pe care se fixează triboelementul superior), legat de carcasa instalației prin intermediul elementelor elastice 5 (sub formă de arcuri-spirală) și platforma 3 pe care se fixează triboelementul inferior 2. Blocul constituie partea oscilantă a camerei de testare. Platforma 3, fiind pusă în mișcare de un mecanism de acționare, prin intermediul articulațiilor sferice B și C , efectuează mișcări ciclice de translație pe ghidajul 4 cu viteza variabilă V . Construcția oscilatorului (cu triboelementul superior) și a platformei (cu triboelementul inferior) sunt prezentate în (Fig. 5)

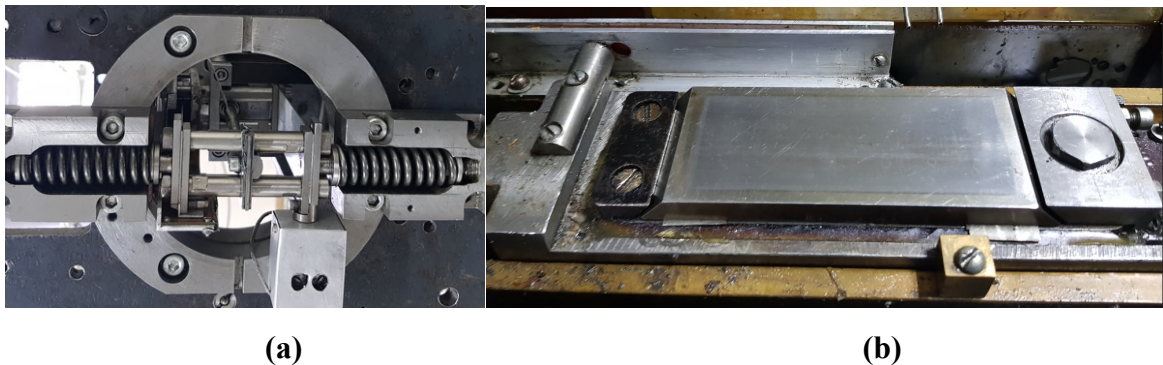


Fig. 5. Vedere generală a oscilatorului cu triboelementul superior (a) și a platformei cu triboelementul inferior (b)

Regimul de funcționare [15, 16] a tribomodelului se stabilește cu parametrii de comandă. În cazul tribomodelului de alunecare cu mișcare ciclică importanți sunt parametrii: 1 - forță normală F_n de încărcare a contactului; 2 - frecvența ciclică n_c de mișcare a platformei; 3 - legea vitezei V de translație a platformei. Comanda cu parametrii F_n și n_c poate fi efectuată în regim manual sau automat, de la calculator.

Controlul stării tribologice instantanee a contactului se efectuează indirect, prin intermediul caracteristicilor de stare a oscilatorului. Starea mecanică a oscilatorului se stabilește cu: 1 -

deplasarea X (mm) a centrului maselor blocului în raport cu punctul de echilibru stabil al oscilatorului; 2 - viteza liniară instantanee $v = \dot{X}$ (m/s) a centrului maselor blocului.

În rezultatul disipării energiei se modifică starea termică a contactului, caracterizată de nivelul temperaturii generată din procesul de frecare. Monitorizarea temperaturii în zona de contact pe perioade relativ mari de timp, conduce la stabilirea evoluției dinamice a tribosistemului la nivel global.

Examinarea în complex a stării globale și locale [22], care se influențează reciproc, completează tabloul comportamentului dinamic al tribosistemului pe traiectoria de evoluție (caracterizată de intensitate și trend) cu comportamentul la nivel de ciclu (caracterizat de procesele care se realizează instantaneu în zona contactului).

4. SISTEM INFORMATIC PENTRU ANALIZA COMPORTAMENTULUI DINAMIC AL TRIBOSISTEMULUI

În *Capitolul 4* este descris sistemul informatic elaborat în cadrul tezei și utilizat pentru aprecierea caracteristicilor tribosistemelor de alunecare (legii forței de frecare și puterii de disipare) în condiții dinamice de funcționare și, în mod special, pentru cazul autooscilațiilor de fricțiune. Sistemul informatic este compus din două componente: hardware și software. Componenta hardware include canalele de măsurare a mărimilor fizice de stare ale tribosistemului și oscilatorului, compuse din traductori, module de condiționare a semnalelor, plăci de achiziție DAQ și calculator (Fig. 6).

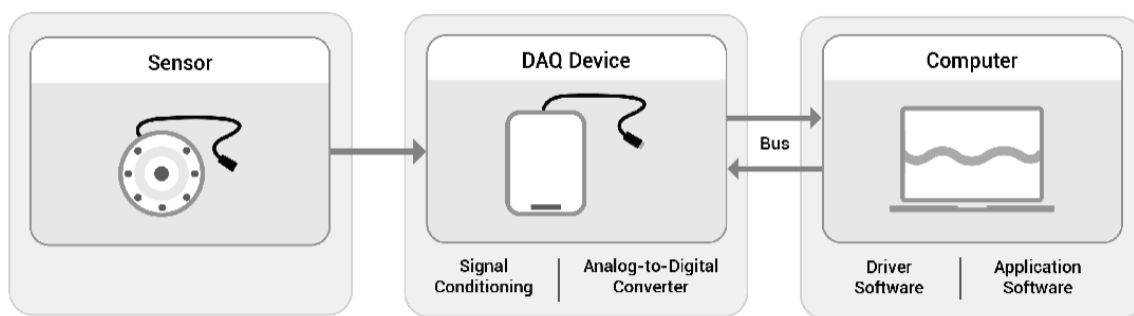


Fig. 6. Componentele hardware ale sistemului de achiziție de date [23]

Sistemul software implementat în Centrul Precesia al UTM folosește LabVIEW și kit-ul de instrumente pentru configurarea și gestionarea canalelor de achiziție și comandă.

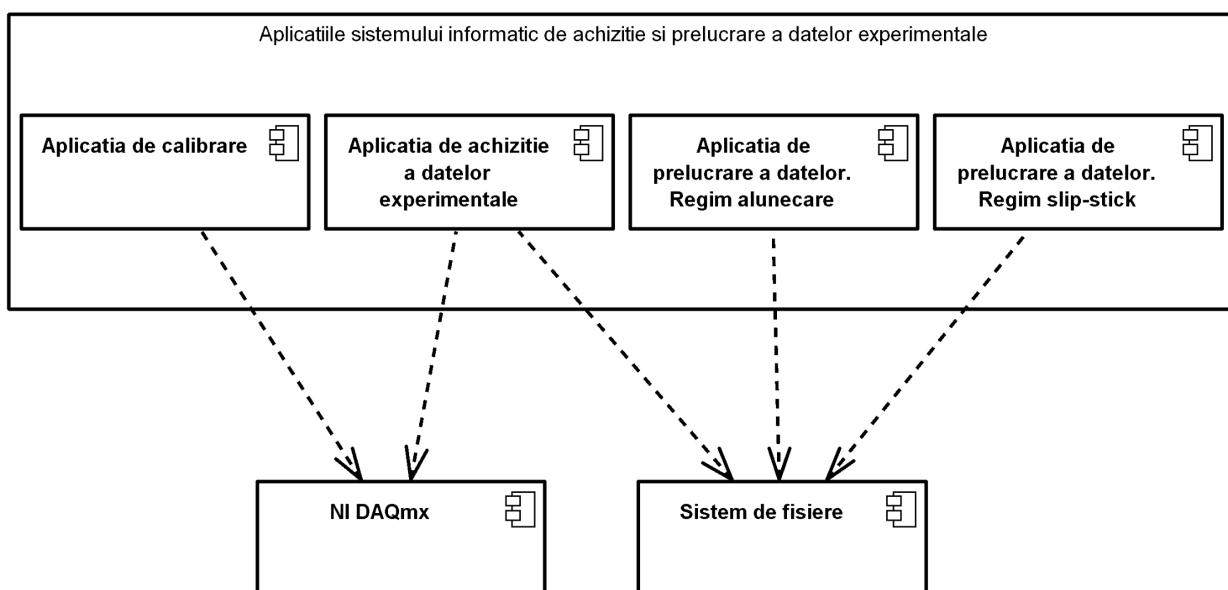


Fig. 7. Arhitectura sistemului de achiziție și prelucrare a datelor experimentale

Sarcinile de bază ale sistemului informatic dezvoltat pentru cercetări tribologice sunt: achiziția datelor; calibrarea canalelor de citire a datelor experimentale; vizualizarea datelor brute și a celor prelucrate; secționarea fluxurilor de date pentru analiză; aproximarea legii de frecare pe secțiuni cu o funcție polinomială. O diagramă (UML) generală a arhitecturii sistemului este prezentată în Fig. 7.

Achiziția datelor experimentale

Pe parcursul experimentelor se supun monitorizării și înregistrării în timp real următoarele mărimi fizice de stare ale tribomodelului și a oscilatorului:

1. Forța normală F_n de încărcare a contactului, viteza V a platformei, temperatura T în zona contactului (pentru tribomodel);
2. Deplasarea X și viteza $v = \dot{X}$ a centrului maselor blocului (pentru oscilator).

Pentru achiziții de date experimentale a fost realizat sistemul hardware, utilizând plăci **NI PCI DAQ 6024E** și module de condiționare a semnalelor de tip **SCC** și **5b** din dotarea Centrului Precesia din cadrul UTM. Pentru fiecare mărime de stare s-au creat canale fizice, în componența cărora intră: traductorul (care realizează transferul valorii mărimii supuse măsurării în semnal electric), modulul de condiționare a semnalului, canalul corespunzător din DAQ.

În cadrul procesului de pregătire a sistemului pentru efectuarea experimentelor sunt necesari următorii pași:

1. Calibrarea canalelor de măsurare;
2. Stabilirea frecvenței naturale (oscilațiilor proprii) a oscilatorului;

3. Stabilirea coeficientului de rigiditate a oscilatorului.

Calibrarea se efectuează prin acționarea asupra oscilatorului și corespunzător, a traductorului de semnal electric al canalului mărimii fizice măsurate, cu măsuri de precizie aplicate succesiv în limitele diapazonului de variație. Citirea semnalelor de calibrare se efectuează cu canalele virtuale în **NI MAX** și instrumente virtuale utilizând **NI-DAQmx**.

Algoritmul de achiziție a datelor experimentale se efectuează conform următorilor pași:

1. Crearea **canalelor virtuale** și **TASK**-urilor pentru canalele fizice cu ajutorul **NI MAX** (Measurement and Automation Explorer) și **NI-DAQmx**;
2. Configurarea canalelor de citire a semnalelor din dispozitivele hardware pentru a fi consumate de aplicațiile LabVIEW;
3. Calibrarea canalelor mărimilor fizice;
4. Citirea în LabVIEW a semnalelor din fiecare canal și transferul în unități de mărimi fizice reale;
5. Pregătirea informației conținută în semnalele mărimilor fizice de stare pentru stocarea în fișiere;
6. Stocarea informației în fișiere.

Aplicația de achiziție a datelor captează și stochează datele brute generate pe parcursul experimentelor tribologice. Informația despre fiecare mărime de stare a tribosistemului exprimată în valori reale cu unitățile de măsură corespunzătoare se afișează și se monitorizează pe parcursul experimentului cu ajutorul indicatoarelor de tip „osciloscop” și „numeric”, plasate pe interfața grafică (Fig. 8).

Prelucrarea datelor experimentale

Tribosistemele de alunecare pot provoca în sistemele mecanice două tipuri de autooscilații de fricțiune:

1. Autooscilații susținute de forțele de frecare în regim de alunecare, care pot varia ca formă, de la cvasiarmonice (la disipare redusă a energiei în zona contactului) până la forme mai specifice, dependente de regimul de frecare și de intensitatea de disipare a energiei. La regimuri cu disipare intensă a energiei, oscilațiile pot trece în regim aperiodic;
2. Autooscilații cu relaxare, numite și autooscilații de tip stick-slip (lipire-alunecare).

Aceste două tipuri de comportament impun abordări diferite asupra modului de prelucrare a datelor experimentale brute stocate în fișiere TDMS. În rezultatul prelucrării datelor se stabilesc legi experimentale de comportament al forței de frecare, pentru configurații concrete ale tribosistemului. În configurația examinată a tribosistemului au fost utilizate materialele:

triboelementul superior – oțel 40 Cr (GOST4543-71); triboelementul inferior – oțel 40 Cr (GOST4543-71); lubrifiant - ulei pentru transmisii TRANS GEAR SAE 75W90.

Pentru simplificarea utilizării datelor experimentale, legile de frecare stabilite pe cale experimentală se aproximează cu diverse modele sub formă de funcții algebrice (de exemplu cea polinomială).

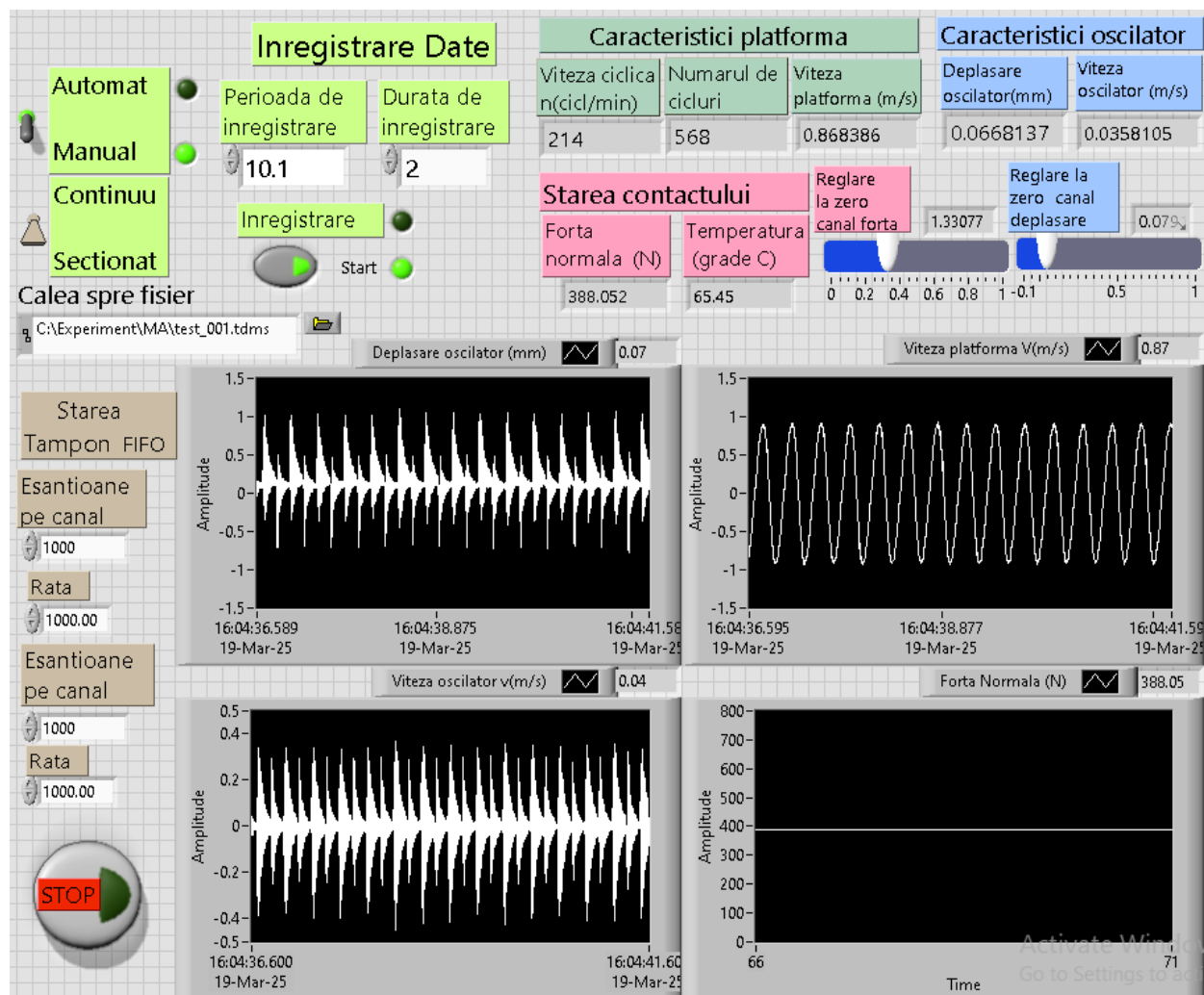


Fig. 8. Interfața aplicației pentru achiziția și salvarea datelor primare

Prelucrarea datelor experimentale. Regimul de autooscilare la frecare de alunecare

Algoritmul de prelucrare a datelor experimentale brute se realizează conform următorilor pași:

1. Accesarea datelor experimentale brute stocate în fișiere;
2. Căutarea unei secvențe de date din masivul total al experimentului, pentru analiza ulterioară;
3. Stabilirea, din secvența aleasă, a datelor unui ciclu a platformei, care prezintă interes pentru prelucrare;

4. Alegerea ciclului oscilatorului, din secvența ciclului platformei stabilit în p.3, pentru a fi supus prelucrării;
5. Împărțirea ciclului ales pe semiperioade (1 – cu creșterea valorii vitezei relative de alunecare de la minim la maxim; 2 – descreșterea vitezei relative de la maxim la minim);
6. Descompunerea mărimilor de stare a oscilatorului (deplasarea și viteza) în componente ale ciclului – media pe ciclu (cvasistaționară) și componenta variabilă (dinamică);
7. Stabilirea stării energetice a oscilatorului în raport cu componentele ciclului;
8. Stabilirea stării energetice totale a oscilatorului;
9. Stabilirea stării de variație a energiei oscilatorului și implicit a intensității (puterii) de disipare a energiei în zona contactului;
10. Stabilirea legii forței de frecare în raport cu variația vitezei relative de alunecare pentru nivelul dat al sarcinii normale de încărcare a contactului;
11. Aproximarea legii de frecare stabilită în baza datelor experimentale, cu un model matematic.

Primul pas se referă la accesarea datelor experimentale brute (neprelucrate), stocate în fișiere TDMS. Accesarea se face folosind canalul de citire, care reprezintă baza primului modul (Fig. 9). În acest modul sunt utilizate următoarele VI-uri: „TDMS Open”; „TDMS Read”; „TDMS Close”.

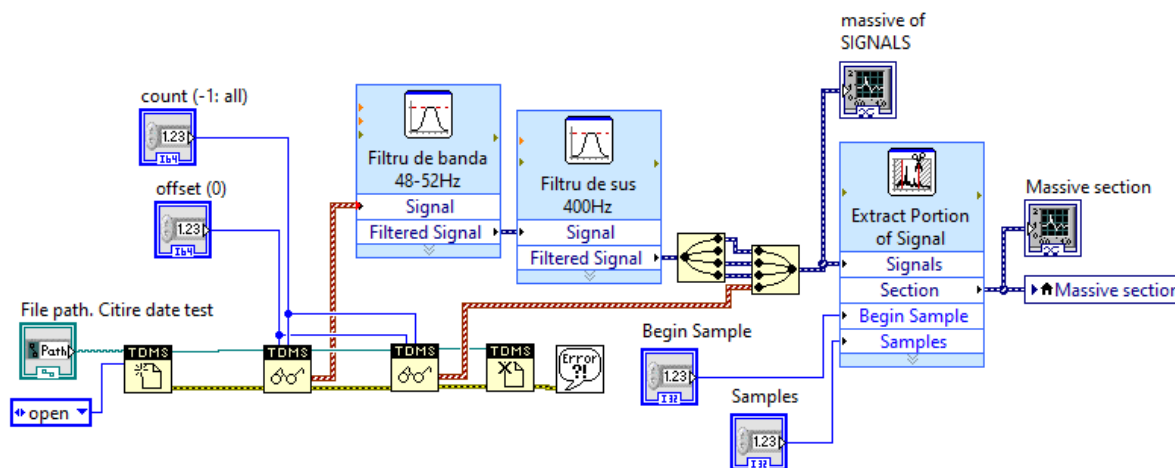


Fig. 9. Citirea datelor experimentale din fișiere TDMS

Datele returnate de VI-ul „TDMS Read” pot fi secționare pe porțiuni stabilite de utilizator în timpul căutărilor. Căutările se pot face pe două nivele: global și local. La nivel global se analizează date experimentale obținute pe perioade relativ mari de timp. Aici se caută locațiile cu comportament deosebit (Fig. 10), care prezintă interes pentru analiză.

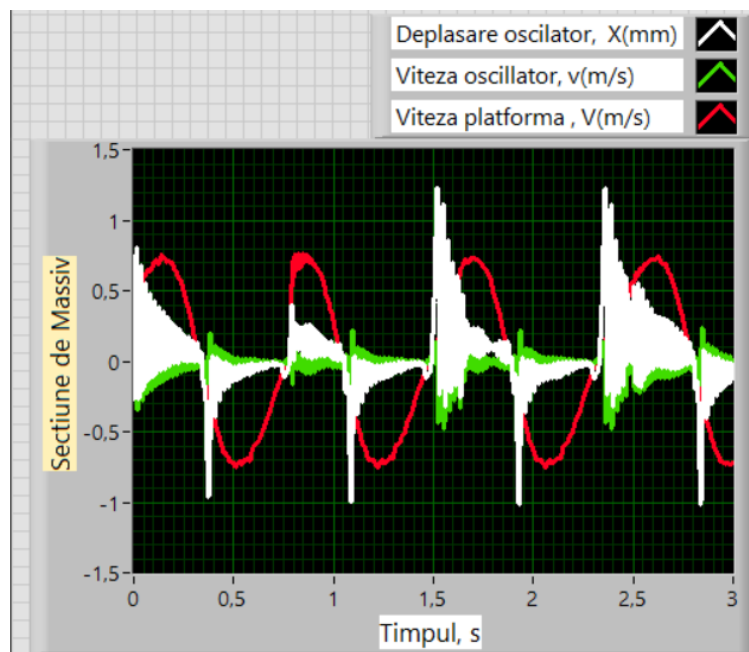


Fig. 10. Interfața secțiunii de masiv a datelor stocate în fișierul TDMS

Pentru studiul comportamentului dinamic al tribosistemului, prelucrarea datelor experimentale se efectuează la nivel local, pe interiorul curselor fiecărui ciclu ales al platformei. Datele reprezentate de variația mărimilor de stare (deplasării și vitezei oscilatorului, și a vitezei platformei) în limitele unei curse pe ciclul ales al platformei (extrase din porțiunea de date afișate în Fig. 10) sunt prezentate în Fig. 11a. Masivul de date a ciclului extras pentru prelucrare, se afișează în indicatorul corespunzător de pe Front Panel (Fig. 11b).

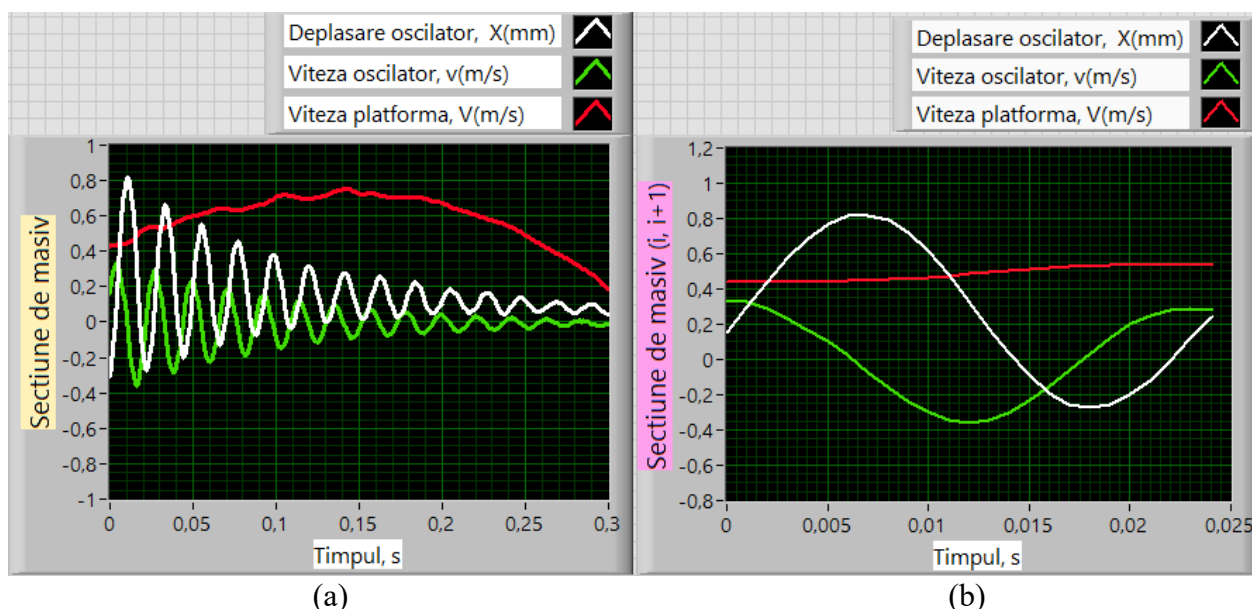


Fig. 11. Interfața secțiunii de masiv de date în limite: a – unei curse a platformei ; b - a unui ciclu al oscilatorului

Datele rezultate se afișează (Fig. 12) utilizând o componentă grafică de tip osciloscop și se transmit ulterior pentru prelucrare. După cum se vede în această figură, rezultatele obținute pe

tribomodelul de alunecare cu mișcare relativă variabilă, demonstrează comportament diferit al oscilatorului (implicit al tribosistemului) pe fiecare fază de mișcare a contactului, atât după formă, cât și după nivel.

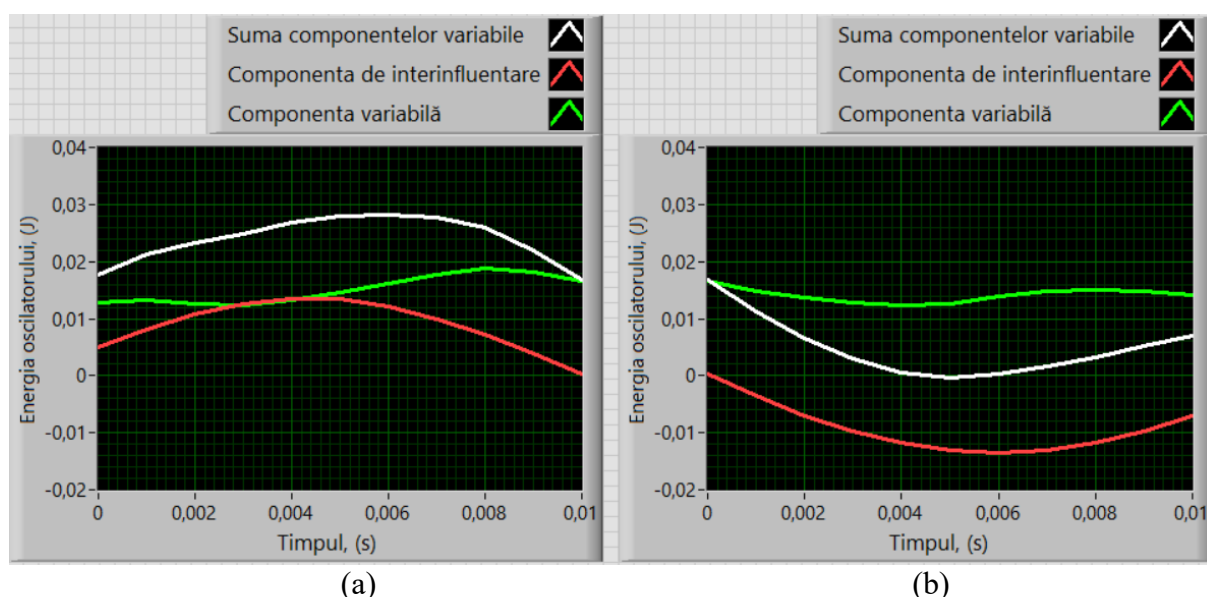


Fig. 12. Modalitățile de variație a componentelor a energiei oscilatorului sub influența tribosistemului: a – pe faza de ridicare a vitezei relative; b – pe faza de coborâre a vitezei relative

În baza componentelor puterii de disipare, se stabilesc componentele forței de frecare (Fig. 13), care constau din: componenta medie pe ciclu de tip Coulomb (în cazul ciclului examinat componenta $F_c = c \cdot X_m = 25,404 \text{ N}$ este afișată și pe interfața principală); componenta variabilă; componenta de interinfluențare dintre componenta medie și cea variabilă.

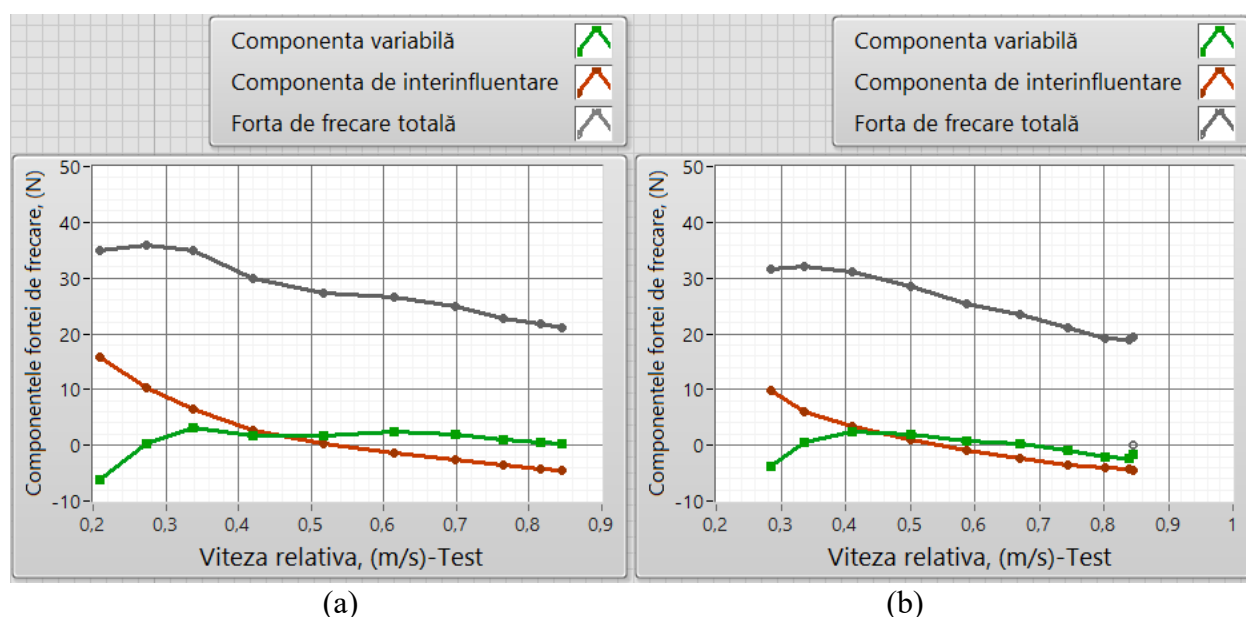


Fig. 13. Componentele forței de frecare: a – pe faza de ridicare a vitezei relative; b - pe faza de coborâre a vitezei relative

Legea forței de frecare în regim de alunecare (Fig.14a) se aproximează cu instrumentul virtual „Curve Fitting Express” configurat pentru modelul polinomial de ordinul cinci (Fig. 14b).

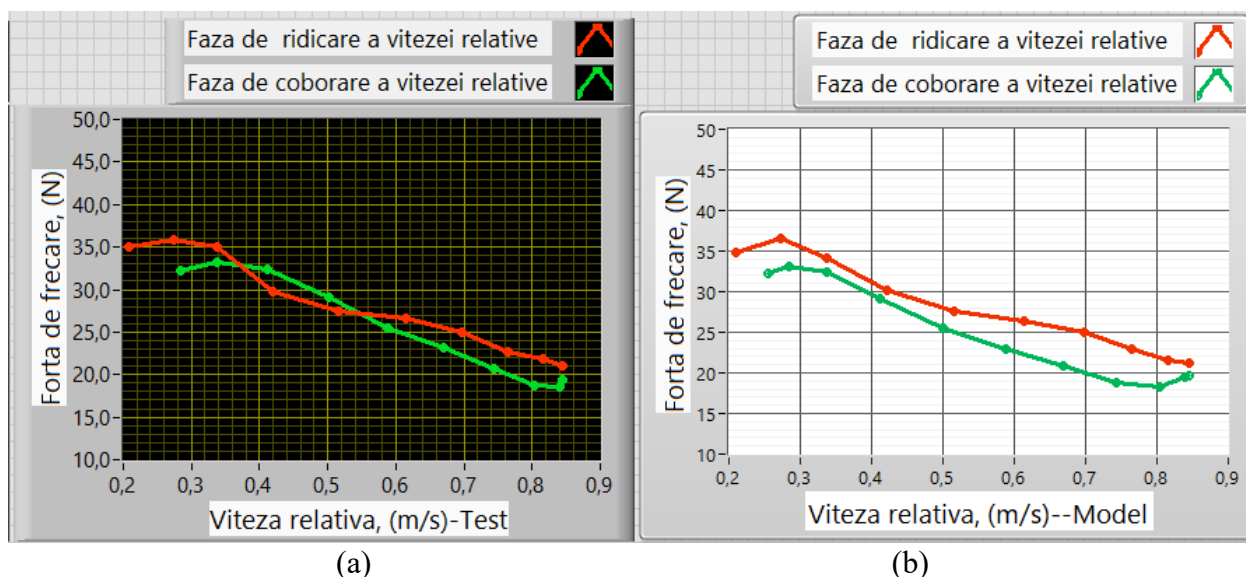


Fig. 14. Rezultatele variației forței de frecare obținute pe cale experimentală (a) și determinate prin calcul în baza modelului de aproximare (b)

Prelucrarea datelor experimentale. Regimul stick-slip de autooscilare

Algoritmul de prelucrare a datelor experimentale brute se realizează conform următorilor pași:

1. Accesarea datelor experimentale brute stocate în fișierul TDMS;
2. Căutarea unei secvențe de date din masivul total al experimentului în care apare regimul stick-slip de frecare;
3. Stabilirea, din secvența aleasă, a masivului unui ciclu care prezintă interes pentru prelucrare;
4. Împărțirea ciclului ales pe faze: 1 – „stick”; 2 – „slip”.
5. Stabilirea stării energetice a oscilatorului în limitele ciclului stick-slip examinat;
6. Reprezentarea masivului energiei oscilatorului în diferențe finite δE_i ;
7. Secționarea masivului de diferențe finite δE_i al energiei oscilatorului în două perioade reprezentative (1 – perioada fazei stick; 2 – perioada fazei slip);
8. Reprezentarea în diferențe finite δX_i a deplasărilor oscilatorului în limitele perioadei fazei stick;
9. Determinarea deplasărilor la mișcarea relativă de alunecare a contactului pe faza slip și reprezentarea în diferențe finite δl_i ;
10. Stabilirea legilor de frecare în rezultatul prelucrării datelor experimentale pentru perioadele fazelor stick și slip;

11. Aproximarea legilor de frecare stabilite în baza datelor experimentale cu un model matematic.

Instrumentele virtuale de secționare a masivului de date experimentale permit afișarea datelor unei curse a platformei care include cicluri cu mișcare de tip stick-slip (Fig. 15a) și extragerea unui asemenea ciclu (Fig. 15b) pentru prelucrări ulterioare.

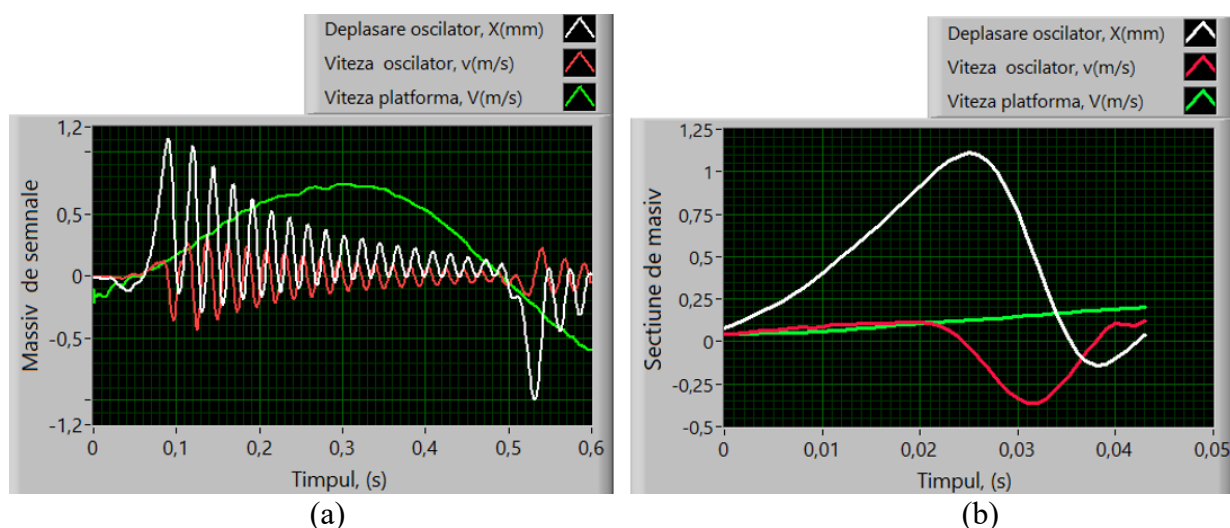


Fig. 15. Secvență de masiv în care se conține cicluri stick-slip (a) și un ciclu stick-slip ales pentru prelucrare (b)

Pentru prelucrare, ciclul ales se împarte în două perioade: perioada de stare stick a contactului și perioada de stare slip (Fig. 16). Punctele de stabilire a limitelor perioadelor corespunzătoare sunt prezentate pe interfață cu indicatoarele „Locația Stick” și „Locația Slip”. Aceste puncte sunt determinate utilizând VI-ul „Waveform Peak Detection” care detectează punctele caracteristice (vârfurile maxime și minime) ale semnalelor mărimilor de stare a oscilatorului și le returnează pentru a fi utilizate în calcule.

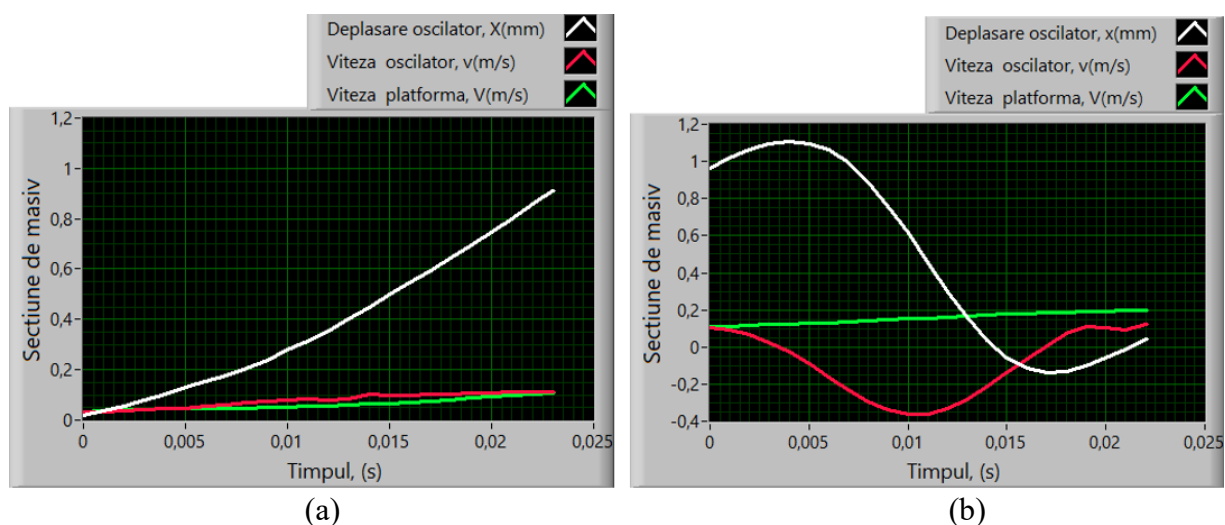


Fig. 16. Secvențe de masiv a perioadei fazei stick (a) și a perioadei fazei slip (b) a ciclului

Conform datelor experimentale se caută *modelul forței de frecare* prin aproximare cu funcții algebrice. În cadrul aplicației date, aproximarea s-a efectuat cu instrumentul virtual „Curve Fitting Express”. În cazul datelor prezentate în Fig. 17a, instrumentul virtual de aproximare („Curve Fitting Express”) a fost configurat pentru funcția polinomială de ordinul trei. Merită de menționat faptul că ordinul funcției polinomiale poate fi ridicat sau micșorat în cazul în care cerințele impun aceasta. Rezultatele se afișează în matricea coeficienților polinomiali de aproximare pe interfața grafică principală. În Fig. 17b sunt prezentate rezultatele obținute cu modelul de aproximare.

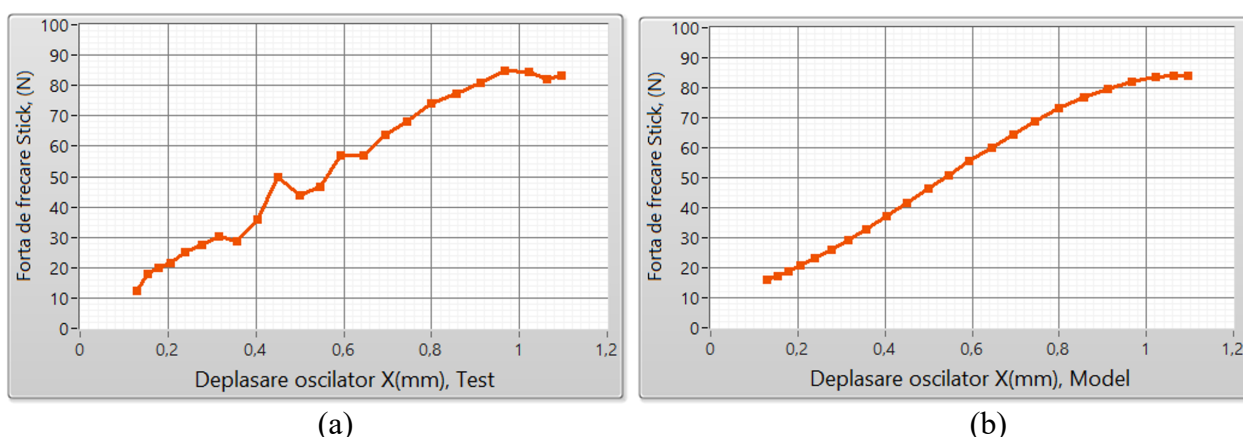


Fig. 17. Rezultatele cu variația forței de frecare pe faza stick, obținute pe cale experimentală (a) și determinate prin calcul în baza modelului de aproximare (b)

Pe gaza slip legea de frecare obținută în baza datelor experimentale, pe secvențele de ridicare și coborâre a vitezei relative de alunecare, este prezentată în Fig. 18a. În Fig. 18b sunt prezentate rezultatele obținute cu modelul de aproximare.

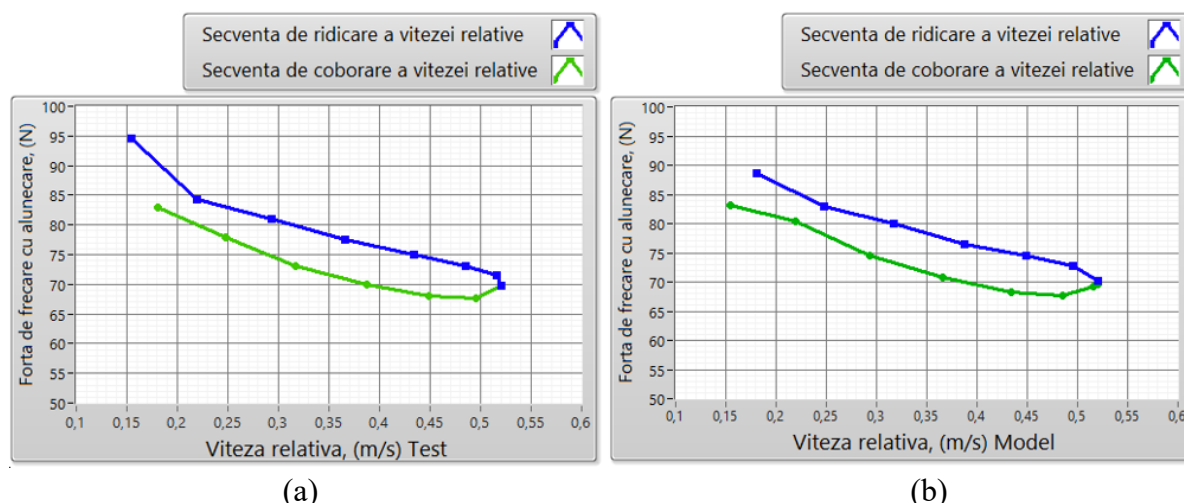


Fig. 18. Rezultatele cu variația forței de frecare pe faza slip, obținute pe cale experimentală (a) și determinate prin calcul în baza modelului de aproximare (b)

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

În rezultatul studiului bibliografic, a cercetărilor și implementărilor în cadrul tezei, care reprezintă contribuții originale, pot fi formulate următoarele concluzii generale și recomandări:

1. A fost stabilit modelul de cercetare a evoluției dinamice în condiții de generare a autooscilațiilor de fricțiune [14, 21, 22] compus din oscilatorul armonic cu elemente elastice care interacționează cu tribosistemul. Aceasta a permis examinarea stării mecanice a oscilatorului sub acțiunea forței de frecare în baza ecuațiilor fundamentale ale mecanicii.
2. În calitate de ipoteză pentru modelarea matematică a sistemului a fost aleasă echivalența energetică dintre tribosistem și oscilator (variația lucrului mecanic produs de forța de frecare este echivalentă cu variația energiei oscilatorului). Aceasta a permis elaborarea modelelor matematice pentru regimul de autooscilații la frecare cu alunecare și pentru regimul de autooscilații de tip stick-slip. În baza acestor modele au fost stabilite relațiile de calcul al forțelor de frecare în condiții dinamice de funcționare a tribosistemului.
3. A fost elaborat și realizat oscilatorul armonic cu elemente elastice pentru cercetări tribometrice [15, 21] care a fost adaptat la instalația de cercetare din dotarea laboratorului de tribologie din cadrul centrului „Precesia” al UTM. Aceasta a permis stabilirea următorilor parametri de comandă: forța normală de încărcare a contactului; frecvența ciclică de mișcare a platformei; viteza de translație a platformei. Controlul se efectuează cu parametrii de stare a oscilatorului: deplasarea și viteza centrului maselor blocului în raport cu punctul de echilibru stabil al oscilatorului.
4. A fost elaborat și realizat un sistem hardware pentru achiziția datelor care descriu comportamentul tribosistemului de alunecare în condiții dinamice de funcționare [16]. Sistemul constă din traductori și senzori ai variabilelor de stare a tribosistemului și a oscilatorului, module de condiționare a semnalelor și placă de achiziție a datelor. Aceasta a permis elaborarea unei serii de aplicații pentru achiziția datelor experimentale utilizând mediul LabVIEW.
5. Au fost realizate aplicații ale sistemului informatic de prelucrare a datelor experimentale [16] pentru regimurile *de alunecare* și *stick-slip*. Aceasta a permis prelucrarea datelor și determinarea legilor de frecare pentru fiecare ciclu de oscilație ales. Utilizând instrumente virtuale din mediul LabVIEW, legile stabilite experimental sunt approximate cu modele matematice.

Recomandări

Ca direcții de cercetare de viitor:

1. Se propune continuarea cercetărilor pe direcția dată, extinderea metodei de cercetare și a principiilor de prelucrare a datelor experimentale pentru alte tipuri de tribosisteme. În particular, unul dintre tribosistemele care trebuie cercetat este cel cu mișcare relativă variabilă de alunecare în combinație cu mișcare de rostogolire, și anume angrenajul transmisiei planetare precesionale. Mișcarea relativă variabilă impune regim dinamic de funcționare cu variație a forței de frecare. O cale de studiere a acestor regimuri este cea experimentală. Pentru efectuarea experimentelor, tribosistemul angrenajului precesional trebuie supus modelării în conformitate cu construcția unei instalații speciale de cercetare din dotarea Centrului Precesia al UTM.
2. Alte aspecte importante ce țin de dezvoltarea ulterioară a sistemului informatic propus în teză sunt gestionarea datelor experimentale și îmbunătățirea experienței utilizatorului.
3. Pentru compensarea pierderilor energetice în oscilator trebuie determinat modelul de disipare energetică a oscilatorului, ceea ce va îmbunătăți precizia de calcul a legilor forței de frecare.
4. Deoarece inteligența artificială este un domeniu care se dezvoltă cu pași foarte rapizi, una dintre direcțiile de dezvoltare a sistemelor informatice în domeniul tribologiei este integrarea Inteligenței Artificiale (AI), și în special, al Învățării Automate (ML), care a câștigat o atenție notabilă în acest domeniu.

BIBLIOGRAFIE

1. ГОРЯЧЕВА, И.Г. *Механика фрикционного взаимодействия*. М.: Наука, 2001. 478 с.
2. WOJEWODA J., STEFAŃSKI A., WIERCIGROCH M., KAPITANIAK T. Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies., In: *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 366, 2008, pp. 747–765 DOI: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2125>.
3. КОЛУБАЕВ, А.В., КОЛУБАЕВ, Е.А., ВАГИН, И.Н., СИЗОВА, О.В. Генерация звука при трении скольжения. In: *Письма в ЖТФ*, том 31, вып. 19, 2005, с. 6 – 12. [citat 03.02.2025] Disponibil: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/13342>.
4. ЛЯШЕНКО А.Я. Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием. In: *Журнал Технической Физики*, 81/6, 2011, с. 125–132. [citat 03.02.2025] Disponibil: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10344>
5. КРАГЕЛЬСКИЙ, И.В., ГИТИС, Н.В. *Фрикционные автоколебания*, Москва: Наука, 1987. 183 с.
6. СОСНОВСКИЙ, Л.А., ЩЕРБАКОВ, С.С., КОМИССАРОВ, В.В. Закон (внешнего) трения и его обобщение: теория и эксперимент. In: *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. № 1 (32), 2016. с. 91–101.
7. ХРОМОВ, Е.В., ХРОМОВ, В.Г. Анализ колебаний системы с подвижной фрикционной связью и постоянным коэффициентом трения. In: *Вестник СевГТУ*, Севастополь: Изд-во СевНТУ, Вып. 137: Механика, энергетика, экология, 2013, С.32-36. ISSN: 2307–6488.
8. БОРОДИЧ, Ф.М., КРЮКОВА, И.В. Фрикционные автоколебания, обусловленные деформированием шероховатостей контактирующих поверхностей. In: *Письма в ЖТФ*, Т.23, № 6, 1997, с. 67–73. [citat 03.02.2025] Disponibil: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/33430>.
9. ZHANG, Z., YIN, N., CHEN, S., LIU, C. Tribo-informatics: Concept, architecture, and case study. In: *Friction*, 9, 2021, pp. 642–655. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0457-3>.
10. YIN, N., XING, Z., HE, K., ZHANG, Z. Tribo-informatics approaches in tribology research: A review. In: *Friction*, 11, 2023, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0596-7>.
11. ЛОЙЦЯНСКИЙ, Л.Г., ЛУРЬЕ, А.И. *Курс теоретической механики. В 2 томах. Том 2*, М.: Дрофа, 2006, с.719. ISBN: 5-358-01277-X.

12. ЛАНДАУ, Л.Д., ЛИФШИЦ, Е.М. *Механика*, М.: Наука, 1988. 216 с.
13. ЛУРЬЕ, А.И. *Аналитическая механика*. Москва: Физматгиз, 1961. 824 с.
14. POSTARU, A., POSTARU, GH., CEBAN, V., SPÂNU, C., STOICEV, P. 2017. The dynamic behavior of sliding tribosystems in unstable operating conditions. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 174, 012013, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/174/1/012013.
15. ПОШТАРУ, А.Г. Экспериментальный метод и программные средства для исследования динамического поведения трибосистем скольжения. In: *Электронная обработка материалов*, 60(2), 2024, с. 74–85. DOI: <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.74>.
16. POSTARU, A.G. Experimental Method and Software Instruments for Sliding Tribosystem Dynamic Behavior Research. In: *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 60, 2024, pp. 706–716. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375524700297>.
17. TRAVIS, J., KRING, J. *LabVIEW for Everyone. Graphical Programming Made Easy and Fun*, Prentice Hall, 2006, 981 p. ISBN 0-13-185672-3.
18. МАГДА Ю.С. *LabVIEW. Практический курс для инженеров и разработчиков*. Москва: ДМК Пресс, 2012, 208 с, ISBN: 978-5-94074-974-6.
19. BITTER, R., MOHIUDDIN, T., NAWROCKI M. *LabView: Advanced Programming Techniques*, CRC Press, 2006, 520 p. ISBN 0-8493-3325-3.
20. CRUDU, I. *Tribomodelarea*. București: AGIR, 2011, 187p.
21. POȘTARU, A. Modelarea dinamică a tribosistemului de alunecare la mișcare de translație. In: *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, Volumul I, Chișinău, Republica Moldova, 2017, pp. 38-41. ISBN 978-9975-45-544-2.
22. POȘTARU, GH., CRUDU, I., POȘTARU, A., STOICEV, P., CEBAN, V. Dynamic monitorization in slip translation cyclic movement tribosystems. In: *Mechanical Testing and Diagnosis*. Vol. 3, 2012, pp. 71-78. ISSN 2247–9635. <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/2555/2169>.
23. A Complete Guide to Data Acquisition (DAQ) Systems, Site [online] [citat: 03.02.2025] Disponibil <https://www.omega.co.uk/prodinfo/daq-systems.html>.

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE LA TEMA TEZEI

Articole în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS

1. POSTARU, A.G. Experimental Method and Software Instruments for Sliding Tribosystem Dynamic Behavior Research. In: *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 60, 2024, pp. 706–716. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375524700297> (SCOPUS).
2. POȘTARU, GH., STOICEV, P., POȘTARU, A., BODNARIUC, I., BUGA, A., PLATON, A. Determination of the tribotechnical characteristics of the materials used for precessional transmissions design. In: *Acta Technica Napocensis - Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, vol. 67, supl. nr. 2, 2024, pp. 577-584. ISSN 1221-5872. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/219481 (Web of Science).
3. BOSTAN, I., STOICEV, P., POȘTARU, GH., BUGA, A., BODNARIUC, I., POȘTARU, A., PLATON, A. Particularities of tribological behavior of the contact elements of the precessional gear, made of metallic and plastic materials. In: *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol.15, 2023, pp. 16-27. ISSN 2067-3604. DOI: <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2023.15.3.16> (SCOPUS).

Articole în reviste din străinătate recunoscute

4. POȘTARU, GH., CRUDU, I., POȘTARU, A., STOICEV, P., CEBAN, V. Dynamic monitorization in slip translation cyclic movement tribosystems. In: *Mechanical Testing and Diagnosis*. Vol. 3, 2012, pp. 71–78. ISSN 2247–9635. <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/2555/2169>.
5. POȘTARU, GH., CRUDU, I., POȘTARU, A., CEBAN, V. The dynamic behavoir of the sliding tribosystem in cyclical translation motion in unsteady duty. In: *The annals of university “DUNĂREA DE LOS” of Galați. Fascicle VIII*, 2011 (XVII), Issue 1, 2011, pp. 76–80. ISSN 1221–4590.
6. POȘTARU, GH., AJDER, V., CRUDU, I., POȘTARU, A., CEBAN, V. Principles and methodological peculiarities research of the tribosystem with sliding on translation cyclic movement. In: *The annals of university “DUNĂREA DE JOS” of Galați. Fascicle VIII*, 2009 (XV), Issue 1, 2009, pp. 52–58. ISSN 1221-4590.

Articole în reviste de cat. B+

7. BOSTAN, I., STOICEV, P., POȘTARU, GH., VACULENCO, M., BUGA, A., KULEV, M., POȘTARU, A., PLATON, A. Theoretical and experimental modelling of the

tribological behaviour aspects of contact elements in the precessional gearing (PG). In: *Journal of Engineering Sciences*, vol. 29, nr. 2, 2022, pp. 8-17. ISSN 2587-3474.

Articole în reviste de cat. B

8. ПОШТАРУ, А.Г. Экспериментальный метод и программные средства для исследования динамического поведения трибосистем скольжения. In: *Электронная обработка материалов*, 60(2), 2024, с 74–85. DOI: <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.74>.

Articole în lucrările conferințelor științifice internaționale (peste hotare)

9. POSTARU, A., POSTARU, GH., CEBAN, V., SPÂNU, C., STOICEV, P. 2017. The dynamic behavior of sliding tribosystems in unstable operating conditions. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 174, 012013, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/174/1/012013.

Articole în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)

10. POȘTARU, A., CEBAN, V., POȘTARU, GH., CROITORU, D. Principii metodologice de cercetare a tribosistemului cu alunecare la mișcări ciclice de tip piston-cilindru. In: *Realizări și perspective în mentenanța utilajului agricol și a autovehiculelor*, 30 septembrie 2011, Chișinău, Republica Moldova: Institutul de Științe ale Educației, 2011, pp. 157-162. ISBN 978-9975-64-218-7. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/85095.

Articole în lucrările conferințelor științifice naționale

11. POȘTARU, A. Modelarea dinamică a tribosistemului de alunecare la mișcare de translație. In: *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, Volumul I, Chișinău, Republica Moldova, 2017, pp. 38-41. ISBN 978-9975-45-544-2.

Articole în alte culegeri de lucrări științifice editate în Republica Moldova

12. POȘTARU, A., POȘTARU, GH., STOICEV, P., CEBAN, V. Aspecte dinamice în comportamentul tribosistemului cu alunecare la mișcări ciclice de tip piston-cilindru. In: *FIZICĂ ȘI TEHNICĂ: Procese, modele, experimente, nr. 1*, 2011, pp. 16 – 21. ISSN 1857-0437.

ADNOTARE

la teza „Modele și algoritmi de identificare și monitorizare a evoluției dinamice în tribosisteme cu alunecare” prezentată de către Poștaru Andrei pentru conferirea titlului științific de doctor în științe ingineresti, Chișinău, 2025

Structura tezei: introducere, 4 capitole, concluzii, bibliografie – 114 titluri, două anexe, 128 de pagini text de bază, inclusiv 90 figuri și un tabel. Rezultatele sunt publicate în 12 lucrări științifice.

Cuvinte-cheie: modelare, sistem informatic, achiziție de date, prelucrarea datelor experimentale, LabVIEW, canale virtuale, tribologie, tribosistem, tribomodel, oscilator.

Domeniul de studiu: produse program, achiziție de date, prelucrarea datelor experimentale

Scopul tezei: Identificarea legilor și a modelelor de frecare specifice tribosistemelor cu alunecare, în condiții dinamice de funcționare, prin intermediul modelărilor experimentale, utilizând sisteme informatice avansate de achiziție și prelucrare a datelor.

Obiective: Dezvoltarea unui model matematic care să descrie influența reciprocă dintre sistemul oscilant (oscilatorul armonic) și tribosistem. Stabilirea relațiilor de echivalență energetică între tribosistem și oscilator pentru regimurile de alunecare și stick-slip. Elaborarea tribomodelului experimental al tribosistemului de alunecare, cu mișcare ciclică de translație. Proiectarea unui sistem informatic de achiziție și prelucrare a datelor experimentale. Adaptarea instalației de testare tribologică pentru tribomodel și echiparea acesteia cu traductori și senzori necesari sistemului informatic. Dezvoltarea unei aplicații software pentru achiziția și stocarea datelor experimentale în cadrul sistemului informatic. Dezvoltarea unor aplicații pentru prelucrarea datelor experimentale care să permită analiza regimului de alunecare și a regimului stick-slip, în cadrul sistemului informatic.

Noutatea și originalitatea științifică: A fost elaborat un sistem informatic original cu aplicații dezvoltate în mediul LabVIEW, care fiind adaptat la o instalație specială pentru testări tribometrice a permis realizarea unor cercetări detaliate privind comportamentul tribosistemului de alunecare în condiții dinamice de funcționare.

Rezultatul/rezultate care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante: stabilirea comportamentului tribologic al elementelor tribosistemului de alunecare în condiții dinamice de funcționare. Aceasta s-a realizat prin dezvoltarea unor mijloace noi de cercetare, ceea ce a permis evaluarea caracteristicilor de frecare în regimuri variabile de încărcare și a facilitat optimizarea performanței tribosistemelor în aplicațiile industriale.

Semnificația teoretică: În baza modelului echivalent sistemului oscilant al elementelor mecanismului real a fost stabilit modelul matematic de influență reciprocă dintre sistemul oscilant (oscilatorul armonic) și tribosistem. În baza modelului matematic a fost elaborat tribomodelul experimental al tribosistemului de alunecare cu mișcare ciclică de translație.

Valoarea aplicativă: Sistemul informatic elaborat oferă posibilitatea de a stabili legile de frecare în condiții de realizare a autooscilațiilor de fricțiune și permite executarea experimentelor pentru alegerea materialelor cuplelor de frecare și a lubrifianților pentru utilizarea în sisteme mecanice concrete. O altă aplicație practică se referă la compensarea influenței forței de frecare asupra stabilității și preciziei mișcării în sisteme mecanice (robotică, utilaje tehnologice).

Implementarea rezultatelor științifice Sistemul informatic elaborat a fost implementat în cadrul Centrului „Precesia” al UTM. Cercetări cu utilizarea acestui sistem au fost efectuate în cadrul proiectului de cercetare Program de Stat nr.160-PS (cifru proiectului 20.800097007.24, din 31.01.2020) și a subprogramului de cercetare în cadrul programului instituțional de cercetare al organizației (2024-2027, codul subprogramului 02.06.01). Coordonator de proiecte, academician Ion Bostan.

ANNOTATION

to thesis "Models and Algorithms for Identifying and Monitoring Dynamic Evolution in Sliding Tribosystems", presented by Poștaru Andrei for the conferring of the scientific title of Doctor of engineering sciences, Chișinău, 2025

The thesis structure: introduction, 4 chapters, conclusions, bibliography - 114 titles, two appendixes, 128 pages of basic text, including 90 figures and one table. The results are published in 12 scientific articles.

Keywords: modeling, information system, data acquisition, processing of experimental data, LabVIEW, virtual channels, tribology, tribosystem, tribomodel, oscillator.

The field of study: software products, data acquisition, processing of experimental data.

Purpose of the thesis: Identification of friction laws and models specific to sliding tribosystems under dynamic operating conditions through experimental modeling using advanced information systems for data acquisition and processing.

The objectives: Development of a mathematical model to describe the mutual influence between the oscillating system (harmonic oscillator) and the tribosystem. Establishing the energy equivalence relationships between the tribosystem and the oscillator for sliding and stick-slip regimes. Development of the experimental tribomodel of the sliding tribosystem with cyclic translational motion. Design of an information system for the acquisition and processing of experimental data. Adaptation of the tribological testing facility for the tribomodel and equipping it with necessary transducers and sensors for the information system. Development of an information system software application for data acquisition and storage. Development of information system applications for processing experimental data that allow the analysis of the sliding and stick-slip regimes.

Scientific novelty and originality: An original information system with applications developed in the LabVIEW environment was created. This system, when adapted to a special setup for tribometric testing, enabled detailed research on the behavior of the sliding tribosystem under dynamic operating conditions.

The result/results that contribute to solving an important scientific problem consists of determining the tribological behavior of the elements of the sliding tribosystem under dynamic operating conditions by extending the research method and developing research tools.

Theoretical significance: Based on the equivalent model of the oscillating system of the real mechanism's elements, the mathematical model for the mutual influence between the oscillating system (harmonic oscillator) and the tribosystem was established. Based on this mathematical model, the experimental tribomodel of the sliding tribosystem with cyclic translational motion was developed.

Practical value: The information system proposed in the thesis allows for the determination of friction laws in conditions of friction self-oscillations. This system enables the execution of experiments for selecting the materials for friction couples and lubricants to be used in specific mechanical systems. Another practical application refers to compensating the influence of the friction force on the stability and accuracy of movement in mechanical systems (robotics, technological equipment).

Implementation of scientific results: The developed information system was implemented within the Centrul "Precesia" of UTM. Research using this system was conducted within the State Program Research Project no.160-PS (project code 20.800097007.24, 31.01.2020) and the research subprogram within the organization's institutional research program (2024-2027, code 02.06.01). Project coordinator, academician Ion Bostan.

АННОТАЦИЯ

к диссертации «Модели и алгоритмы для определения и мониторинга динамического поведения трибосистем скольжения», представленной Поштару Андрей на соискание ученой степени доктора технических наук, Кишинев, 2025

Структура диссертации: введение, 4 главы, заключение, библиография – 114 названий, 2 приложения, 128 страниц основного текста, в том числе 90 рисунков и 1 таблица. Результаты опубликованы в 12 научных статьях.

Ключевые слова: моделирование, информационная система, сбор данных, обработка экспериментальных данных, LabVIEW, виртуальные каналы, трибология, трибосистема, трибомодель, осциллятор.

Область исследования: программные продукты, сбор данных, обработка экспериментальных данных.

Цель диссертации: Идентификация законов и моделей трения, специфичных для трибосистем со скольжением, в динамических рабочих условиях через экспериментальное моделирование с использованием передовых информационных систем для сбора и обработки данных.

Решенные задачи: Разработка математической модели, описывающей взаимное влияние между колебательной системой (гармоническим осциллятором) и трибосистемой. Установление энергетических эквивалентных отношений между трибосистемой и осциллятором для режимов скольжения и stick-slip. Разработка экспериментальной модели трибосистемы со скольжением, с циклическим поступательным движением. Проектирование информационной системы для сбора и обработки экспериментальных данных. Адаптация трибологической испытательной установки для трибомодели и оснащение ее датчиками, необходимыми для информационной системы. Разработка программного приложения для сбора и хранения экспериментальных данных в рамках информационной системы. Разработка приложений для обработки экспериментальных данных, позволяющих анализировать режимы скольжения и stick-slip в рамках информационной системы.

Научная новизна и оригинальность: Разработана оригинальная информационная система с приложениями, созданными в среде LabVIEW, которая, будучи адаптированной к специальной установке для трибометрических испытаний, позволила провести детальные исследования поведения трибосистемы со скольжением в динамических рабочих условиях.

Результат/результаты, которые способствуют решению важной научной проблемы состоит в установлении трибологического поведения элементов трибосистемы со скольжением в динамических рабочих условиях путем расширения метода и разработки средств для испытаний.

Теоретическая значимость: На основе эквивалентной модели колебательной системы элементов реального механизма была установлена математическая модель взаимного влияния между гармоническим осциллятором и трибосистемой. На основе математической модели была разработана экспериментальная модель трибосистемы со скольжением, с циклическим поступательным движением.

Прикладная ценность: Предложенная в диссертации информационная система позволяет устанавливать законы трения в условиях возникновения фрикционных автоколебаний. Эта система позволяет проводить эксперименты для выбора материалов пар трения и смазочных материалов, предназначенных для использования в конкретных механических системах. Другим практическим применением является компенсация влияния силы трения на стабильность и точность движения в механических системах (робототехника, технологическое оборудование).

Реализация научных результатов: Разработанная информационная система была внедрена в Centrul “Precesia” ТУМ. Исследования с использованием этой системы были проведены в рамках научно-исследовательского проекта Государственной программы №160-PS (код проекта 20.800097007.24, от 31.01.2020) и исследовательской подпрограммы в рамках институциональной исследовательской программы организации (2024–2027, код подпрограммы 02.06.01). Координатор проекта - академик Ион Бостан.

POȘTARU ANDREI

**MODELE ȘI ALGORITMI DE IDENTIFICARE ȘI
MONITORIZARE A EVOLUȚIEI DINAMICE ÎN
TRIBOSISTEME CU ALUNECARE**

232.02 – TEHNOLOGII, PRODUSE ȘI SISTEME INFORMAȚIONALE

Aprobat spre tipar 22.05.2025	Formatul hârtiei 60x84 1/16
Hârtie offset. Tipar RISO	Tirajul 50 ex.
Coli de tipar 2,0	Comanda nr. 60

MD 2004, Chișinău, bd. Stefan cel Mare și Sfânt, 168, UTM
MD 2045, Chișinău, str. Studenților, 9/9, Editura “Tehnica-UTM”

© Poștaru Andrei, 2025