



PROJEKTOVANJE RAČUNAROM MAŠINSKIH SISTEMA UZIMAJUĆI U OBZIR TRENJE

Dr Dušan STAMENKOVIĆ, docent, Mr Miloš MILOŠEVIĆ, asistent
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Srbija i Crna gora

COMPUTER AIDED DESIGN OF MECHANICAL SYSTEMS CONSIDERING FRICTION

S u m m a r y

Savremeno projektovanje podržano računarom podrazumeva proveru dinamičkog ponašanja mašinskih sistema u realnim uslovima. U tu svrhu primenjuju se računarske simulacije na različitim nivoima procesa projektovanja. Neophodno je da simulacije obuhvate i silu trenja s obzirom da se u svakom kontaktu mašinskih elemenata javlja trenje. Ovo je problematično kada se uzme u obzir kompleksnost i nepredvidivost veličine koeficijenta trenja. U radu je data uporedna analiza podataka u računarom simuliranim procesima trenja klizanja i podataka izmerenih u eksperimentima realizovanim na Mašinskom fakultetu u Nišu.

1. UVOD

U radu mašinskih sistema prisutno je trenje na kontaktnim površinama elemenata koji su u međusobnom relativnom kretanju. Pored dinamičkog trenja, koje se javlja u procesu kretanja elemenata, postoji i statičko trenje koje se javlja u uslovima kada elementi nisu u pokretu već u stanju predpomeranja, neposredno pre nastupanja makro kretanja.

Savremeno projektovanje mašinskih sistema podržano računarom podrazumeva numeričku simulaciju dinamičkog ponašanja. Težnja je da virtuelno okruženje što više odgovara realnim uslovima eksploatacije, a za to je neophodno uzeti u obzir, pored ostalog i uticaj trenja. Nesavršenost simulacija koje uzimaju u obzir trenje kod savremenog projektovanja uglavnom potiče od kompleksnosti, nepredvidivosti i nestalnosti veličine koeficijenta trenja.

2. SAVREMENI PRISTUP PROJEKTOVANJU MAŠINSKIH SISTEMA

Danas inženjeri pri razvoju novog proizvoda od njegovog koncepta do konačnog uobličavanja i proizvodnje, koriste računare u okviru računarskog inženjerstva CAE (*Computer Aided Engineering*), pri čemu im je na raspolaganju čitav niz softverskih alata za projektovanje i razvoj proizvodnje u virtuelnom okruženju VPD (*Virtual Product Development*). Pored ostalih, kao najznačajniji tu se mogu izdvojiti programi za geometrijsko modeliranje mašinskih sistema primenom računara CAD (*Computer Aided Design*), čiji je sastavni deo za realizaciju i izradu tehničke dokumentacije CADD (*Computer Aided Design Drafting*), zatim programi koji koriste metode konačnih elemenata FEA za strukturnu analizu kontinuma FEM (*Finite Element Methods*), kinematski i dimanički programi za simulaciju kretanja pokretnih mašinskih sklopova, programi koji kao osnovu imaju baze podataka standardnih

geometrijskih entiteta za projektovanje tehnologije proizvodnje i tehnoloških procesa postupaka izrade CAPP (*Computer Aided Process Planning*) u okviru kojih su i programi za planiranje, upravljanje i kontrolu tehnoloških procesa u proizvodnji CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Programski alati u okviru navedenih oblasti upotrebe računara predstavljaju osnovne module CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) koncepta u računaru integrisanom procesu nastajanja proizvoda.

Savremene metode projektovanja mašinskih sistema uključuju novije numeričke alate za matematičko modeliranje dinamičkog ponašanja u eksploatacionim uslovima. Tako veliki evropski istraživački instituti i proizvođači železničkih delova učestvuju u realizaciji projekta "Hiperwheel" koji finansira Evropska zajednica [2]. Ovaj projekt se naročito bavi definisanjem i proverom "multi-body" modela železničkog vozila, sa numeričkim tehnikama za generisanje reprezentativnog spektra opterećenja na osovinskim sklopovima i sa eksperimentalnim procedurama kojima bi se proverio i potvrdio dizajn novog osovinskog sklopa. U okviru projekta se vrši analiza kontaktnih naprezanja usled kotrljanja točka po šini koja uključuje habanje, koroziju i zamor materijala. U projektu se koristi softverski paket ADAMS/Rail koji uzima u obzir model sila na kontaktu točak-šina kao i analizu efekata fleksibilnosti tela (npr. osovinskih sklopova).

3. SIMULACIJA MAŠINSKIH SISTEMA PRIMENOM PROGRAMA UZIMAJUĆI U OBZIR TRENJE

Trenje predstavlja silu otpora koja se suprostavlja relativnom kretanju površina čvrstih tela u kontaktu. Zavisno od stanja kretanja, tj. od toga da li je rezultantna tangencijalna sila koja izaziva kretanje manja ili veća od zbira svih otpora kretanju, razlikuju se trenje mirovanja i trenje kretanja.

Sila trenja mirovanja (sila statičkog trenja) je uglavnom veća od sile trenja kretanja (sila dinamičkog trenja). U momentu kada se pokreću mehanizmi, mašine, motori, prenosnici snage i drugi mehančki sistemi javlja se ekstremno veliko opterećenje. Da bi mašinski sistem prešao iz stanja mirovanja u stanje kretanja neophodno je da pogonska sila, pored inercijalnih i aktivnih opterećenja, savlada i silu statičkog trenja na kontaktu elemenata. Ovo je neophodno uzeti u obzir kod projektovanja mašinskih sistema posebno

u slučaju ako se u toku eksploatacije često zaustavljaju i pokreću.

Softverski paket ADAMS omogućava projektovanje mašinskih sistema uzimajući u obzir proračun sile trenja pri različitim načinima ostvarivanja kontakata međusobno pokretnih delova sklopova, kao što su transaltoni, rotacioni, cilindrični, sferni ili drugi korisnički definisani spojevi. Pri tome je programski podržano dinamičko i statičko trenje, kao i prelaz iz statičkog u dinamički režim.

Frikcioni model ovog programa razlikuje stanje predpomeranja kao efekt statičkog trenja i proces klizanja kao efekt dinamičkog trenja. U okviru režima predpomeranja definiše se sila trenja u spoju koji ostaje nepokretan (nema makro pomeranja) uz utvrđenu veličinu maksimalnog predpomeranja (nastupa mikro pomeranje). Neznatna deformacija uslovljava da program ADAMS, u režimu predpomeranja, računa sa vrednošću sile trenja kao:

$$\text{veličina sile trenja} < \mu_{\text{static}} \cdot \text{normalna sila,}$$

dok se u režimima statičkog i dinamičkog trenja sila trenja definiše kao vektorska veličina čiji se intenzitet određuje prema formuli:

$$F = \mu F_N,$$

gde je F_N normalna sila, a μ je koeficijent trenja (μ_{static} za statičko trenje ili μ_{dynamic} za dinamičko trenje). Delovanje sile dinamičkog trenja je suprotnog smera u odnosu na smer brzine, dok je smer sile statičkog trenja suprotan od sile ili momenta koji deluju na spoj duž mogućeg smera kretanja.

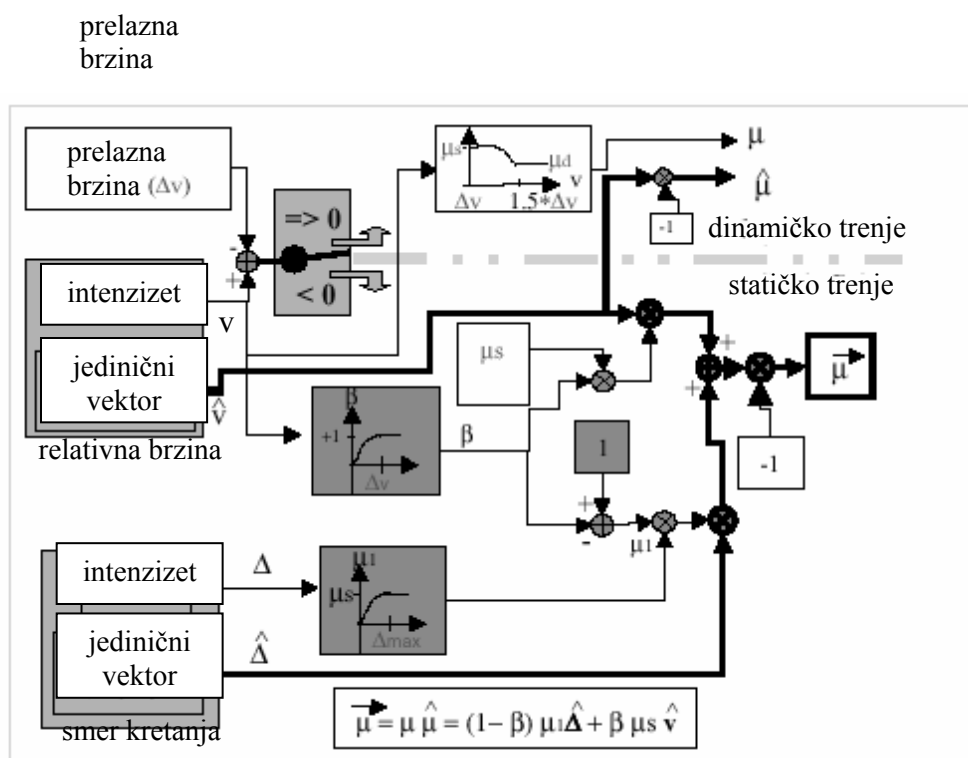
Ovim programom je moguće obračunavanje i uzimanje u obzir početnog preklopa sklopovnih elemenata u spoju, pri čemu u toku pomeranja taj preklap može da se menja tako što može da raste, opada ili da ostane konstantne veličine.

Pred početak simulacije mašinskih sistema uzimajući u obzir trenje potrebno je definisati frikционе režime. Za određivanje ovih režima neophodno je kao jedan od ulaznih podataka za program, pored vrednosti koeficijenata trenja za statičko i dinamičko trenje koje je moguće za određene kontakte usvojiti iz postojeće baze podataka u zavisnosti od materijala delova u kontaktu i načina podmazivanja, definisati vrednost prelazne brzine. Ova vrednost predstavlja apsolutnu vrednost relativne brzine kretanja tela koja su u kontaktu i definiše trenutak prelaza statičkog u dinamički režim trenja. U skladu sa navedenim, spoj je u uslovima statičkog trenja ako je relativna

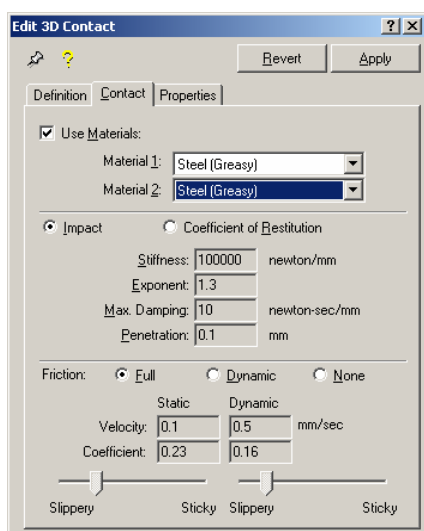
brzinu kretanja tela u spoju ispod ove usvojene prelazne brzine. Tada se efektivni koeficijent trenja za ovaj režim sračunava korišćenjem unete vrednosti statičkog koeficijenta trenja i simulacijom dobijenih vrednosti za relativnu brzinu kretanja, kao i pomeranja, odnosno promene položaja elemenata u spoju. Ukoliko je veličina relativne brzine kretanja između 1 i 1.5 puta vrednost usvojene prelazne brzine, onda je spoj u uslovima prelaza između dinamičkog i statičkog trenja. U ovom režimu se linearnom funkcijom vrši tranzicija vrednosti statičkog u dinamički koeficijent trenja. I

konačno, spoj je u uslovima dinamičkog trenja ako vrednost relativne brzine u spoju nadmašuje 1.5 puta vrednost prelazne brzine i tada se za sračunavanje sile trenja koristi zadata vrednost za dinamički koeficijent trenja.

Na slici 1 prikazan je blok dijagram frikcionih režima koji su na raspolaganju u programu ADAMS [1], a na slici 2 je programski prozor za unos potrebnih ulaznih podataka za simulaciju 3D kontakta uzimajući u obzir trenje.



Slika 1 Blok dijagram frikcionih režima



Slika 2. Prozor za unos ulaznih podataka 3D kontakta

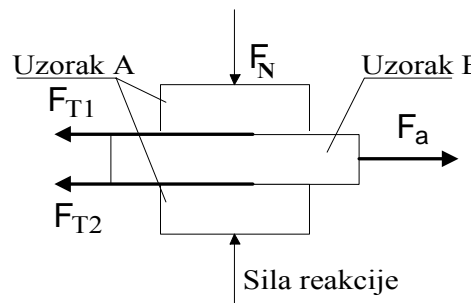
4. UPOREDNA ANALIZA PODATAKA DOBIJENIH EKSPERIMENTOM I SIMULACIJOM

Koeficijent trenja se najčešće utvrđuje eksperimentalnim putem na konkretnom tribomehaničkom sistemu. Sa visokim stepenom pouzdanosti može se utvrditi vrednost koeficijenta dinamičkog trenja, s obzirom da se ispitivanje sprovodi u dužem vremenskom periodu i da je proces ponovljiv. Na taj način, bez obzira na odstupanja u veličini sila trenja koja se povremeno javljaju, može se, sa visokim stepenom pouzdanosti, utvrditi srednja (prosečna) vrednost koeficijenta trenja.

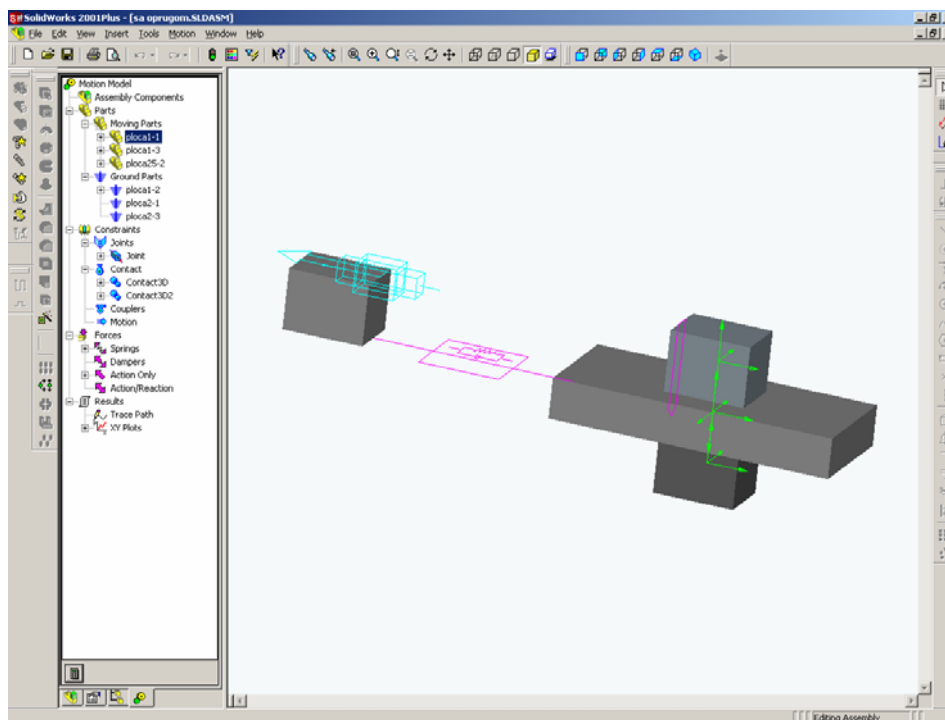
Međutim, kod trenja mirovanja, vrednost sile statičkog trenja se utvrđuje u veoma malom vremenskom intervalu tj. u trenutku pokretanja tj. proklizavanja delova u kontaktu, jer odmah iza toga njena vrednost opada do vrednosti sile dinamičkog trenja. Ovaj proces je potpuno određen uslovima ostvarenih mikrokontakata i, u svakom ponovljenom postupku merenja, on je apsolutno specifičan i neponovljiv sa aspekta uslova kontakta. Znatno rasipanje eksperimentalnih podataka objašnjava se nemogućnošću obezbeđenja jednoznačnih uslova i nestabilnošću frikcionih karakteristika.

Šematski prikaz tribološkog modela za merenje sile statičkog trenja sa uzorcima u obliku pločica, koji je tretiran u ovom istraživanju, dat je na slici 3. Pod dejstvom sile u aksijalnom pravcu pločica B, dimenzija 70x30x10, se pokreće horizontalno klizajući po pločicama A, dimenzija 20x15x15, od kojih je donja učvršćena i nepo-

kretna, dok gornja može da se kreće samo vertikalno. Prema ovom modelu napravljen je merni sto na kome su eksperimentalno ispitivani uzorci u obliku pločica [3] i trodimenzionalni model sa uzorcima pločastog oblika prikazan na slici 4.



Slika 3. Tribološki model za merenje sile statičkog trenja



Slika 4. Trodimenzionalni model za određivanje sile trenja

Kod ovog modela su za pločice odgovarajućih uzoraka definisana potrebna ograničenja kretanja i obezbeđen je njihov međusobni kontakt sa definisanim neophodnim parametrima za simulaciju, prelaznom brzinom $\Delta v=0.25\text{mm/s}$ i koeficijentima trenja $\mu_{\text{static}}=0.08$ i $\mu_{\text{dynamic}}=0.07$. Normalna sila koja obezbeđuje kontakt uzoraka je $F_N=30\text{kN}$. Kretanjem pomoćnog tela se preko opruge, simbolički prikazane na modelu, obezbeđen spor priraštaj sile aksijalne sile koja izaziva pokretanje pločice B.

Uslud dejstva ove aksijalne i normalne sile na dodirnoj površini gornje pločice A i gornje površine pločice B javlja se trenje (sila F_{T1} na slici 3) koje je u procesu simulacije dobijeno u obliku dijagrama sile prikazanog na slici 5.

Takođe se javlja trenje i na dodirnoj površini donje pločice A i donje površine pločice B (sila F_{T2} na slici 3), čiji je dijagram sile dat na slici 6.

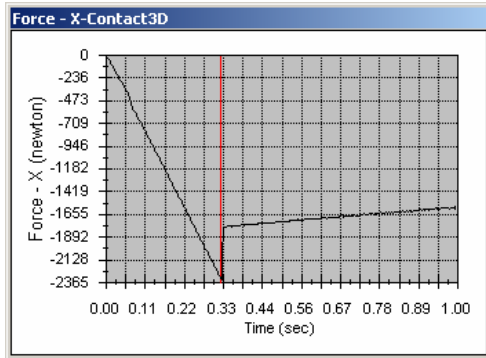
Vrednosti ovih sila su približne pošto su težine pločica A i B izuzetno male, tako da se taj uticaj može zanemariti, a kako je:

$$F_{T1} = \mu_1 F_N$$

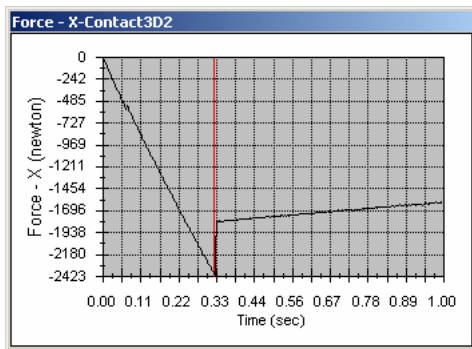
$$F_{T2} = \mu_2 F_N$$

$$F_{T1} + F_{T2} = (\mu_1 + \mu_2) F_N$$

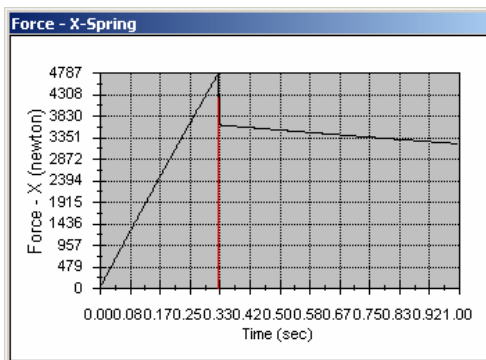
sledi da je aksijalna sila koja izaziva kretanje i koja se javlja u opruzi u toku kretanja ustvari ukupna sila trenja i njena vrednost dobijena simulacijom prikazana je na slici 7.



Slika 5. Dijagram sile trenja u gornjem kontaktu

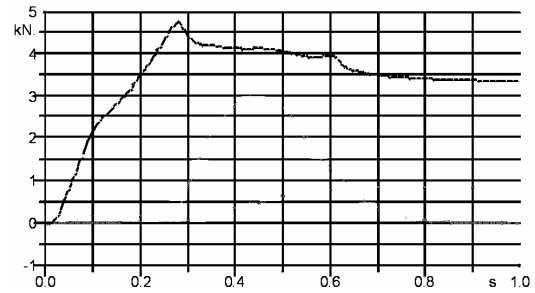


Slika 6. Dijagram sile trenja u donjem kontaktu



Slika 7. Dijagram ukupne sile trenja

U eksperimentalnoj fazi [3] na mernom mestu za merenje sile trenja na uzorcima pločastog oblika u međsobnom kontaktu, izmerene su vrednosti sile trenja, odnosno registrovana je aksijalna sila u funkciji vremena onako kako je to pokazano na slici 8.



Slika 8. Dijagram sile trenja u funkciji vremena na osnovu izmerenih podataka

Ukoliko se uporede oblici dijagrama sile trenja dobijenih kod eksperimentalne analize ili metodom simulacije može se uočiti velika sličnost. Pored sličnog vremenskog toka i u jednom i drugom slučaju je zabeležena maksimalna sila od 4,78 kN, što navodi na zaključak da se numerička procedura, ukratko opisana u ovom odeljku, može primeniti za projektovanje računom mašinskih sistema uzimajući u obzir trenje napregnutih delova koji su u međsobnom kontaktu.

5. ZAKLJUČAK

Savremeni pristup projektovanju mašinskih sistema uključuje nove sofisticirane numeričke alate za matematičko modeliranje dinamičkog ponašanja procesima simulacije, kao što je na primer uzimanje u obzir trenja pri projektovanju mašinskih sistema, ali je i pored toga neophodno da se izvrši eksperimentalna provera na ispitnim stolovima i u realnim eksploatacionim uslovima.

U daljem radu koji razmatra projektovanje mašinskih sklopova kroz simulacije mašinskih sistema uzimajući u obzir trenje akcenat će biti stavljen na simulaciju presovanih spojeva opterećenih aksijalnom silom, momentom uvijanja i momentom savijanja, uzimanjem u obzir u spoju sile trenja kao predopterećenja koja potiče od preklopa delova.

REFERENCE

- [1] Road Map to ADAMS Documentation, Mechanical Dynamics, 2002.
- [2] K. Bel Knani, S. Bruni, S. Cervello, G. Ferrarotti "Development of an integrated design methodology for a new generation of high performance rail wheelset" WCRR, Köln 2001.
- [3] D. Stamenković "Istraživanje nosivosti presovanog spoja kao tribosistema u okviru pogonskih sklopova železničkih vozila" - doktorska disertacija, Niš, 2000.
- [4] D. Stamenković, M. Đurđanović "Faktori koji utiču na statičko trenje" Zbornik radova sa konferencije "YUTRIB 2001" str.6-7, Beograd 2001.