SIMULACIONI MODEL VIŠELAMELASTIH FRIKSIONIH SKLOPOVA

Major Aleksandar Grkić, dipl. inž., Vojna akademija
dr Čedomir Duboka, dipl. inž., Mašinski fakultet Beograd
major dr Slavko Muždeka, dipl. inž., Vojna akademija

Rezime:

Višamelasti frikcionni sklopovi koriste se za promenu stepena prenosa u planetarnim menjačkim prenosnicima motornih vozila. Razvijeni simulacioni model frikcionne spojnice i kočnice omogućava simulaciju rada menjačkog prenosnika pri promeni stepena prenosa. Primenom razvijenog modela moguće je na bazi simulacije analizirati prelazni proces pri promeni stepena prenosa i obezbediti identifikaciju relevantnih parametara bez izrade većeg broja fizičkih prototipova. Na taj način obezbeđuje se smanjenje troškova i skraćanje procesa razvoja novih prenosnika snage, uz poboljšanje upotrebne kvaliteta. Simulacioni model može da se koristi i pri razvoju upravljačkog sistema menjačkog prenosnika za definisanje potrebnih karakteristika njegovih komponentata.

Ključne reči: višamelasti frikcionni sklop, model, simulacija.

SIMULATION MODEL OF MULTIPLE PLATE FRICTION CLUTCHES AND BRAKES

Summary:

Multiple plate friction clutches and brakes are used for gear shifting within planetary gear trains of motor vehicles. The developed simulation model of the friction clutch and brake enables the simulation and the analysis of the planetary gear train transitional processes during gear shifting and provides identification of relevant parameters without making numerous physical prototypes. Costs are thus reduced and time for developing new gear trains shortened, while the product quality is increased. The simulation model can be use additionally in developing steering systems of planetary gear trains for defining characteristics of their components.

Key words: compatibility, method, gas mask, tactically – technical requests.

Uvod

Višamelasti frikcionni sklopovi ostvaruju funkciju spojnice i kočnica na principu korišćenja sile trenja između dve površine u relativnom kretanju. U transmisijama motornih vozila sa planetarnim menjačkim prenosni-

cima, višelamelasti frikcionni sklopovi se koriste u svojstvu: glavnih spojnice, spojnice i kočnica za uključivanje stepeni prenosa u menjaču, spojnice i kočnica u mehanizmima za izvođenje zaokreta guseničnih vozila i radnih kočnica. U slučaju naglih udara i preopterećenja frikcionni elementi proklizavaju, tako da praktično imaju i ulogu sigurnosnih mehanizama.

Višelamelasti frikcionni sklopovi olakšavaju automatizaciju menjačkih prenosnika, omogućavaju kratko trajanje prelaznog procesa, što smanjuje dinamička opterećenja i stvara uslove za promenu stepena prenosa pod opterećenjem.

Klasični pristup projektovanju višelamelastih frikcionih sklopova koristio je razvojnu metodologiju po kojoj se nastojalo da se naknadno dodaju određene funkcionalne karakteristike koje ranije nisu uključene usled nedovoljno precizne apstrakcije budućeg izgleda i funkcije razvijanog sistema. Nepreciznost potiče od upotrebe nedovoljno tačnih metoda za predviđanje mogućih stanja sistema u toku njegove upotrebe.

Računarski podržano projektovanje povećava efikasnost projekatata, značajno olakšava modifikovanje i smanjuje greške pri projektovanju. Istovremeno omogućava automatizaciju izrade, arhiviranja i ažuriranja tehničke dokumentacije. Računarska simulacija rada gotovog sistema omogućava ispitivanje pre izrade fizičkog modela. Ovom metodom, odnosno specijalizovanim softverima, stvaraju se simulacioni modeli koji omogućavaju imitaciju ili reprodukciju ponašanja realnog mehaničkog sistema. Značaj simulacionih modela je, pre svega, u mogućnosti vrednovanja performansi sistema u najranijoj fazi konstruisanja, a naročito pre proizvodnje prototipa.

Analizom ponašanja modela tokom simulacija u različitim uslovima omogućava se:

- sagledavanje potencijalno „slabih“ mesta radi preduzimanja odgovarajućih koraka za njihovo sprečavanje u ranoj fazi razvoja,
- ispitivanje njegove funkcionalnosti i eksploatacijskih karakteristika pre same proizvodnje,
- znatno smanjenje broja ispitivanja na fizičkim prototipovima i
- procena uticaja parametara procesa na karakteristike proizvoda u njegovom konceptualnom dizajnu.

Sa druge strane, stvara se mogućnosti kreiranja brojnih varijanti i njihovo poboljšavanje u procesu optimizacije konstrukcijskih rešenja uz čuvanje prethodnih konstruktorskih iteracija.

Konstrukcijske karakteristike višelamelastih frikcionih sklopova

U planetarnim menjačima gotovo isključivo se koriste višelamelaste spojnice i kočnice koje rade u ulju. Kod ovog tipa frikcionih sklopova obrtni moment se prenosi preko tankog uljnog filma koji se nalazi između dve

radne površine. Približavanjem pogonskog diska spojnice gonjenom disku, gonjeni disk počinje da se rotira. Za to vreme nema direktnog kontakta između radnih površina, odnosno između frikcionog materijala i metala. U trenutku kada se ugaone brzine gonjenog i pogonskog diska izjednače, uljni sloj se potpuno istiskuje između lamela i dolazi do statičkog trenja. Kod kočnica se dešavaju slični tribološki fenomeni, s tom razlikom što jedan disk miruje, a statičko trenje nastupa po zaustavljanju kočenog diska.

Habanje frikcionih površina (frikcionog materijala i čelika) znatno je smanjeno zbog postojanja uljnog filma na radnim površinama. Toplotna energija koja se stvara u toku rada frikcionih sklopova u većoj meri se generiše u ulju nego na radnim površinama i na taj način se stvaraju uslovi za povećanje termičkog kapaciteta radnih površina. Pojedine konstrukcije frikcionih sklopova ne koriste ulje za prenos obrtnog momenta već samo za hlađenje frikcionih površina. Osim ako se uljni sloj ne održava na radnim površinama, frikcioni sklopovi rade u uslovima suvog trenja, pri čemu se obrtni moment direktno prenosi sa jedne površine na drugu, što izaziva značajan porast temperature, kao i nestabilnost koeficijenta trenja.

Da bi se uljni sloj održavao na radnim površinama i učestvovao u prenošenju obrtnog momenta, mora se obezbediti stalna cirkulacija ulja kroz paket lamela. To se obezbeđuje tako što se ulje pod pritiskom dovodi na radne površine kroz otvore na nosačima lamela (slika 1). Ulje se rasprostire radijalno preko frikcionih površina, nakon čega se sliva u karter. Pojedini prenosnici snage poseduju i izmenjivače toplote koji mogu znatno da podignu termički kapacitet frikcionih sklopova.

Kod frikcionih sklopova kod kojih je uljni film stalno prisutan može doći do prenosa obrtnog momenta i u fazi kada su frikcioni sklopovi isključeni. Ovaj problem je posebno izražen kod konstrukcija sa vrlo velikim brojevima obrtaja. Veličina tog „zaostalog otpora“, koji uzrokuje neželjeni prenos obrtnog momenta, jeste funkcija viskoznosti ulja, površine lamela, relativne brzine klizanja lamela, kao i rastojanja između njih.

Uljni sloj takođe absorbuje i udare tokom spajanja lamela, smanjujući na taj način opterećenje čitavog prenosnika.

Slika 1 – Otvori na nosaču frikcionih elemenata za dovođenje ulja

Upravljanje višelamelastim frikcionim sklopovima u planetarnim menjačkim prenosnicima najčešće je hidraulično.

Materijali od kojih će biti izgrađeni frikcionni elementi određeni su zahtevima u pogledu visoke otpornosti na habanje, stabilnosti koeficijenta trenja u širokom rasponu brzina klizanja, specifičnih pritisaka i temperatura, visoke toplotne provodljivosti, itd. Materijali koji se koriste u frikcionim sklopovima menjačkih prenosnika motornih vozila su: metalni, nemetalni i metalokeramički.

Frikcioni elementi višelamelastih frikcionih sklopova savremenih planetarnih menjačkih prenosnika najčešće predstavljaju kombinaciju glatkih čeličnih lamela i lamela od metalokeramike. Metalokeramički frikcionni materijali izrađuju se presovanjem usitnjenog praha bakra ili čelika sa različiti legirajućim primesama, a zatim se na čelični disk nanose metodom sinterovanja.

Da bi se obezbedilo stvaranje uljnog filma između frikcionih površina u kontaktu, kao i radi hlađenja i odvođenja produkata habanja na površinama frikcionih obloga presovanjem se izrađuju specijalni kanali. Primeri konstrukcijskih realizacija kanala na frikcionim površinama prikazani su na slici 2.

Slika 2 – Oblici kanala na frikcionim površinama

Vrednost i stabilnost koeficijenta trenja je vrlo važna karakteristika frikcionih sklopova koji rade u ulju. Optimalan rad frikcionih sklopova ostvaruje se dovođenjem one količine ulja koja obezbeđuje trenje radnih površina pri graničnom podmazivanju. U slučaju nedovoljne količine ulja nastupa režim suvog trenja praćen povećanim koeficijentom trenja i habanjem. Pri povećanom protoku ulja dolazi do značajnog smanjenja koeficijenta trenja. Na slici 3 prikazana je zavisnost koeficijenta trenja u funkciji brzine klizanja za materijal MK-5 [5].

Slika 3 – Zavisnost koeficijenta trenja od brzine klizanja za materijal MK-5

Višelamelasti frikcionni elementi sa hidrauličkim upravljanjem (slika 4) sastoje se od paketa frikcionih elemenata (1), nosača frikcionih elemenata (2, 3), klipova (4, 5), oslonih diskova (6, 7), povratnih opruga (8) i zapтивnih elemenata (9, 10). Detalj I predstavlja višelamelastu frikcionu kočnicu, a detalj II višelamelastu frikcionu spojnicu.

Slika 4 – Osnovni elementi višelamelastih frikcionih sklopova

Moment nošenja frikcionog sklopa, sa hidrauličkim aktiviranjem, u opštem slučaju je funkcija karakteristika trenja, srednjeg poluprečnika trenja, broja frikcionih površina i ukupne sile aktiviranja. Izračunava se prema izrazu:

$$M_n = N \cdot \mu \cdot r_{sr} \cdot z \quad (1)$$

gde je:

N – ukupna sila aktiviranja,

μ – koeficijent trenja,

r_{sr} – srednji računski poluprečnik trenja i

z – broj površina trenja.

Ukupna sila aktiviranja N određena je veličinom sile statičkog pritiska ulja i sile povratnih opruga klipa:

$$N = F_u - F_{ok} \quad (2)$$

gde su:

F_u – sila statičkog pritiska ulja,

F_c – sila centrifugalnog pritiska ulja,

Sila statičkog pritiska ulja je:

$$F_u = p \cdot A_k \quad (3)$$

gde su:

p – pritisak ulja u radnom cilindru i

A_k – površina klipa radnog cilindra.

Sila povratnih opruga omogućava vraćanje klipa u početni položaj i izražava se kao proizvod krutosti opruge c , ugiba f i broja opruga n :

$$F_o = cfn \quad (4)$$

Srednji računski poluprečnik trenja izračunava se prema izrazu:

$$r_{sr} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \quad (5)$$

gde je:

R, r – spoljni i unutrašnji poluprečnik frikcionog diska, slika 4.14.

Na povećanje ukupne sile aktiviranja utiče i sila centrifugalnog pritiska ulja kao posledica rotiranja radnog cilindra.

Pojedine konstrukcije frikcionih spojnica (slika 4), radi ravnomernijeg isključivanja, koriste centrifugalnu silu periferno postavljenih kuglica (11). Kuglice koje su smeštene u profilisanim kanalima (12), usled centrifugalne sile, kreću se po strmoj ravni (13) i na taj način ostvaruju dodatnu silu za pouzdano isključivanje frikcionih elemenata nakon prestanka dejstva statičkog pritiska ulja.

Izraz (1) zapravo služi kao osnova za proračun konstrukcijskih parametara frikcionog sklopa na osnovu poznatog koeficijenta trenja i mo-

menta nošenja. Sa druge strane, moment nošenja frikcionog sklopa određuje se u zavisnosti od maksimalnog momenta motora (M_m), prenosnog odnosa (i_n) n -tog stepena prenosa u kojem se nalazi frikcioni sklop. Na vrednost momenta nošenja frikcionog sklopa utiča i moment inercije rotirajućih delova spojnice (I) i ugaono ubrzanje pogonskih i gonjenih delova (ω), te se vrednost momenta nošenja frikcionih sklopova može izraziti sledećim izrazom:

$$M_n = M_m * i_n + I * \omega \quad (6)$$

Pri projektovanju frikcionih sklopova potrebno je definisati i određenu rezervu u odnosu na zahtevanu vrednost momenta koju treba da prenese, a izražava se stepenom sigurnosti (β).

$$M_{\max} = M_n * \beta \quad (7)$$

Vrednost stepena sigurnosti kreće se u granicama $\beta = 1,3 - 1,7$ i zavisi od vrste i namene vozila, kao i mesta i uloge frikcionog sklopa u planetarnom menjačkom prenosniku.

Prema izrazu (1) moment nošenja se povećava sa povećanjem srednjeg poluprečnika trenja, ali se na taj način povećava i moment inercije. Jedno od rešenja je smanjenje srednjeg poluprečnika trenja i povećanje broja frikcionih površina. Kod savremenih frikcionih sklopova ovaj broj se kreće od 6 do 36. Povećanje broja frikcionih površina, međutim, može biti ograničavajući faktor po osnovu nekih drugih zahteva.

Može se zaključiti da konstrukcijske karakteristike frikcionih sklopova zavise od niza faktora i najčešće predstavljaju kompromis većeg broja različitih zahteva.

Model za simulaciju rada višelamelastih frikcionih prenosnika

Za dinamičke simulacije koje se odnose na analizu prelaznog procesa u višelamelastim frikcionim sklopovima pri promeni stepena prenosa koriste se specijalizovani softveri za simulacije ili softverski alati opšte namene, namenjeni za dinamičke simulacije mašinskih sistema kod kojih postoji mogućnost modeliranja frikcionih, hidrauličkih i električnih i drugih komponenata.

Konstrukcijska realizacija menjačkog prenosnika koji omogućava ovakav način promene stepeni prenosa u prošlosti bio je vrlo skup i oduzimao je mnogo vremena. Zahtevani su ekskluzivni prototipovi i specijalizovane analize. Ispitivanjem virtuelnog prototipa racionalizuje se proces dizajniranja i obezbeđuju mnogo kvalitetnije prve serije proizvoda.

Za potrebe analize prelaznog procesa u višamelastim frikcionim sklopovima razvijen je simulacioni model u programu MATLAB, odnosno njegovom modulu *Simulink/ SimMechanics* koji podržava razvoj mehaničkih sistema preko mehaničkih komponenata. *Simulink* [6] je modul razvijen u MATLAB okruženju koji omogućava modeliranje, simulaciju i analizu raznih dinamičkih sistema. Podržava linearne i nelinearne sisteme modelirane kako u kontinuiranom, tako i diskretnom vremenu.

Pri modeliranju u *Simulinku* koristi se grafičko okruženje, kao i „click-and-drag“ operacije mišem za crtanje modela u obliku blok- dijagrama. *Simulink* sadrži veliku biblioteku generatora ulaznih pobuda, prikazivača izlaznih promenljivih, linearnih i nelinearnih komponenti sistema, kao i konektore.

Mehaničke komponente unutar Simulinka opisuju se preko tzv. tela, koja simbolizuju delove mehaničkog sistema i veza između tela. Tela se opisuju koordinatama težišta (centra mase), masom i tenzorom inercije. Veze ograničavaju broj stepeni slobode kretanja tela i na taj način obezbeđuju pravilno funkcionisanje mehaničkog sistema. Pored veza mogu biti definisani i drugi tipovi ograničenja. Veza „mehaničkog“ i klasičnog *Simulink* okruženja ostvaruje se preko davača (merenje određene veličine) i aktuatora (zadavanje određene veličine). To znači da se ulaznim veličinama, koje su predstavljene *Simulink* signalima i predstavljaju određenu matematičku funkciju, preko aktuatora daje fizički smisao i određuje fizička veličina (ugaona brzina, ubrzanje, moment, sila...).

Rezultati simulacije formiranog mehaničkog modela mere se pomoću davača i kao *Simulink* signali (određene matematičke funkcije) predstavljaju izlaz iz sistema i mogu biti predstavljeni na odgovarajući način. Grafičko okruženje *Simulink*, sem mogućnosti definisanja ulaza i izlaza, ima mogućnost definisanja početnih uslova simulacije (IC – Initial conditions). *Simulink* model predstavlja strukturu mehaničkog sistema, geometrijske i kinematske odnose njegovih delova i pretvara ovaj strukturni prikaz u ekvivalentni matematički model.

Prethodno opisano modeliranje mehaničkih sistema vrši se pomoću različitih blokova koji su smešteni u *Simulink* biblioteku i razvrstani su u četiri osnovne grupe: Body, Joint, Constraint, Actuator i Sensor grupe blokova. *Simulink* omogućava primenu tehnike modularnog programiranja koja je zasnovana na konceptu objektno orijentisanog programiranja, koji je usvojen za razvoj simulacionog modela višamelastog frikcionog sklopa.

Na osnovu izvršene analize konstrukcije i rada frikcionih sklopova utvrđeni su parametri koji utiču na proces rada frikcionih sklopova. S obzirom na to da se funkcija višamelastih frikcionih sklopova posmatra u okviru planetarnog menjačkog prenosnika, to i njihov simulacioni model predstavlja podsistem modela sistema za prenos snage koji se sastoji od:

- modela motora SUS,
- modela planetarnog menjačkog prenosnika (modela planetarnog reda i modela višamelastog frikcionog sklopa) i

– modela spoljašnjeg opterećenja.

Računarski model u okviru kojeg se vrši simulacija procesa uključivanja-isključivanja frikcionog sklopa prikazan je na slici 5.

Slika 5 – Model za simulaciju rada višamelastih frikcionih sklopova

Ulazni parametri za rad ovog modela dovode se na ulazno vratilo (2), a to su signali u vidu ugaone brzine i obrtnog momenta koje emituje uprošćeni model motora SUS. Izlazno vratilo (1) u vezi je sa modelom spoljašnjeg opterećenja.

Na simulacionom modelu višamelastog frikcionog sklopa razlikuju se tri celine:

- blok sa tzv. *revolute* vezom, na slici označen kao *spojnica*,
- Joint Stiction Actuator, na slici označen kao JSA, i
- model trenja, uokviren isprekidanom linijom.

Blok *spojnica* definisan je *revolute* vezom. Na ovaj način ostvarena je veza između ulaznog i izlaznog vratila, što predstavlja frikcionu spojnicu. Ukoliko se umesto izlaznog vratila postavi oslonac i definišu početni uslovi (ugaona brzina jednaka nuli), veze prikazane isprekidanom linijom na slici 5, onda je u pitanju frikciona kočnica. Iz ovog bloka vode još tri signala. Prvi signal je usmeren ka davaču obrtnog momenta, koji ovaj signal dalje prosleđuje ka osciloskopu. Drugi signal dolazi od sklopa JSA, koji bloku *revolute* saopštava u kakvom stanju je veza između elemenata u funkciji vremena. Treći signal je veza sa davačem momenata i davačem ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata, čije se vrednosti koriste kao povratna veza radi definisanja potrebnog momenta nošenja.

Blok u kojem se na osnovu ulaznih parametara, konstrukcijskih karakteristika i proračuna odlučuje kojom vrstom i koja će biti vrednost momenta nošenja kojim će se delovati na elemente u relativnom kretanju u frikcionom sklopu naziva se Joint Stiction Actuator (slika 6).

Slika 6 – Joint Stiction Actuator

Joint Stiction Actuator (JSA) povezuje dva elementa koja se nalaze u relativnom kretanju silom trenja na osnovu prethodno definisanih parametara. Ovaj aktuator, takođe, može da ostvari čvrstu vezu između dva elementa, nezavisno od sile trenja između njih (External Actuation, slika 6). Ovakav način ostvarivanja veze u ovom modelu frikcionih sklopova ne postoji, pa se smatra da je vrednost ovog parametra jednaka nuli. Maska preko koje se definišu osnovni parametri kojima se definiše rad JSA prikazana je na slici 7.

Slika 7 – Maska za definisanje osnovnih parametara za rad JSA

S obzirom na to da silom trenja mogu da se povežu elementi koji su u međusobnom translatornom ili rotacionom kretanju, iz padajućeg menija potrebno je definisati vrstu veze. U skladu sa izabranom vrstom veze potrebno je definisati, takođe iz padajućeg menija, merne jedinice, kao i

prag razlike brzine između elemenata koje treba povezati, posle kojeg dolazi do „zaključavanja“ frikcionog sklopa.

Vrednost relativne ugaone brzine može biti sa pozitivnim ili negativnim predznakom, s obzirom na to da frikcionni elementi mogu biti u ulozi pogonskih, ali i gonjenih elemenata.

U vezi s tim, JSA razlikuje tri stanja frikcionog sklopa: otključano, zaključano i stanje na čekanju.

Otključano stanje podrazumeva da postoji razlika ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata frikcionih sklopova, kao i da nema dejstva sile na upravljački uređaj frikcionog sklopa.

Zaključano stanje podrazumeva da ne postoji razlika ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata frikcionog sklopa. Moment nošenja određen je statičkim momentom nošenja koji mora da se nalazi u granicama (Forward Stiction Limit i Reverse Friction Limit), koje su definisane proračunskim momentom nošenja.

Stanje na čekanju predstavlja prelazno stanje između stanja „otključano“ i stanja „zaključano“. Moment koji se ostvaruje između pogonskih i gonjenih elemenata frikcionog sklopa određen je proračunskim momentom trenja i zavisi od brzine klizanja između elemenata u relativnom kretanju.

Model trenja (slika 8) vrši proračun momenata koji se javljaju na frikcionom sklopu. Proračun se vrši na osnovu:

- sile aktiviranja frikcionog sklopa,
- trenutnih vrednosti ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata i momenata nošenja i
- prethodno definisanih parametara.

Slika 8 – Model trenja

Sila aktiviranja definiše se u funkciji vremena i praktično ne postoje ograničenja u obliku te funkcije.

Trenutne vrednosti ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata i momenata nošenja dobijaju se preko davača direktno sa frikcionih elemenata.

Prethodno definisani parametri odnose se na konstrukcione parametre frikcionog sklopa, odnosno na srednji poluprečnik trenja i broj frikcionih površina. Blok za unos ovih parametara prikazan je na slici 9.

The 'Parameters' dialog box contains three input fields:

- Srednji poluprečnik trenja**: $\frac{2}{3} \cdot \frac{(r_2^3 - r_1^3)}{(r_2^2 - r_1^2)}$
- Koeficijent trenja**: mutable
- Broj frikcionih površina**: Nf1

Slika 9 – Blok za unos konstrukcionih parametara

Pored konstrukcionih parametara u ovom bloku unapred je definisana i vrednost koeficijenta trenja. Vrednost koeficijenta trenja nije konstantna već se menja u funkciji brzine klizanja, slika 10.

The left screenshot shows the 'Function Block Parameters: Koeficijent trenja' dialog box. The 'Main' tab is active, showing 'Vector of input values' as 'mutable(:,1)' and 'Vector of output values' as 'mutable(:,2)'. The 'Look-up method' is set to 'Interpolation-Extrapolation'.

The right screenshot shows the 'Lookup Table Editor: to_je_to/F2/Koeficijent trenja' window. It displays a table with 9 rows and 2 columns. The first column represents sliding velocity and the second column represents the friction coefficient.

Row	Column	(1)
(1)	0	0.131
(2)	22.7	0.147
(3)	30.3	0.15
(4)	45.5	0.154
(5)	75.8	0.155
(6)	144	0.157
(7)	220	0.158
(8)	303	0.159
(9)	400	0.159

Slika 10 – Koeficijent trenja u funkciji brzine klizanja

Prva kolona predstavlja brzinu klizanja između frikcionih površina i definiše se na osnovu apsolutne vrednosti razlike ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata sveden na srednji poluprečnik trenja. Druga kolona predstavlja koeficijent trenja za zadatu brzinu klizanja.

U narednom bloku množi se koeficijent trenja sa konstrukcionim parametrima i silom i dobija se moment nošenja u obliku:

$$M_n = N \cdot \mu \cdot r_{sr} \cdot z \quad (8)$$

Vrednost momenta, dobijena izrazom 8, služi za definisanje granica statičkog momenta nošenja. Dinamički moment nošenja takođe je jednak izrazu 8 i figurira sve do momenta izjednačavanja ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata frikcionog sklopa. Nakon toga nastupa statički moment trenja, koji se mora nalaziti u pomenutim granicama.

Analiza rada simulacionog modela

Nakon formiranja modela potrebno je definisati uslove u kojima će se odvijati simulacija. Pretpostavka je da se model odnosi na laboratorijske uslove ispitivanja. Pogonski elementi višelamelaste frikционе spojnice u vezi su sa motorom SUS, a gonjeni su hidrauličnom kočnicom i zamajnim masama. S obzirom na to, potrebno je definisati:

- konstrukcione parametre višelamelaste frikционе spojnice,
- ulazne parametre,
- spoljašnje opterećenje i
- vreme trajanja simulacije.

Definisanjem konstrukcionih parametara, modelu višelamelaste frikционе spojnice praktično se dodeljuju fizičke osobine. Parametri koji opisuju osobine spojnice su:

p – pritisak aktiviranja frikcionog sklopa;	m_{izl} – masa gonjenih elemenata višelamelastog frikcionog sklopa;
A – površina frikcionog diska frikcionog sklopa ;	I_{ul} – moment inercije centralnog pogonskih elemenata višelamelastog frikcionog sklopa;
N_f – broj frikcionih površina frikcionog sklopa ;	I_{izl} – moment inercije gonjenih elemenata višelamelastog frikcionog sklopa.
m_{ul} – masa pogonskih elemenata višelamelastog frikcionog sklopa;	r_{sr} – srednji poluprečnik trenja

U tabeli 1 prikazane su vrednosti konstrukcionih parametara višelamelaste frikционе spojnice koja se razmatra u radu.

Tabela 1

$A[\text{cm}^2]$	298,28	$m_{ul}[\text{kg}]$	12	$I_{ul}[\text{kgm}^2]$	4	N_f	8
$p[\text{bar}]_{\text{max}}$	11	$m_{izl}[\text{kg}]$	15	$I_{izl}[\text{kgm}^2]$	2	$r_{sr}[\text{m}]$	0,1921

Koeficijent trenja unosi se preko maske prikazne na slici 10 i promjenljiv je u funkciji brzine klizanja frikcionih površina.

Ulazne parametre predstavljaju obrtni moment (M_{ul}) i ugaona brzina (ω_{ul}) pogonskih elemenata višelamelaste frikcione spojnice, čije su vrednosti prikazane u tabeli 2.

Tabela 2

$M_{ul}[\text{Nm}]$	500	$\omega_{ul}[\text{rad/s}]$	100
---------------------	-----	-----------------------------	-----

Spoljašnje opterećenje simulira se signalom iz signal-generatora preko Joint Actuatora i predstavlja otpor u vidu momenta (M_t) koji se stvara u hidrauličnoj kočnici. Pored toga, sistem je opterećen i zamajnim masama na izlazu i to opterećenje je prikazano u vidu momenta inercije gonjenih masa (I_t). U tabeli 3. prikazane su vrednosti momenta opterećenja i momenta inercije zamajnih masa.

Tabela 3

$M_t[\text{Nm}]$	500	$I_t[\text{kgm}^2]$	40
------------------	-----	---------------------	----

Vreme trajanja simulacije iznosi 5 sekundi i može se podeliti u tri intervala. Prvi predstavlja period u kojem je višelamelasta frikciona spojnica isključena i traje do trenutka t_0 . U ovom intervalu, s obzirom na to da je sponica isključena, moment nošenja je jednak nuli. Istovremeno, može se primetiti da pogonski delovi spojnice lagano ubrzavaju. U trenutku t_0 počinje uključivanje spojnice. Sa početkom uključivanja, moment nošenja spojnice počinje da raste. Istovremeno, brzina gonjenih elemenata počinje lagano da opada, dok brzina gonjenih elemenata spojnice počinje da raste od stanja mirovanja. Taj period traje do trenutka t_1 i iznosi 0,5 sekundi. Drugi period predstavlja prelazni proces i može se podeliti u dve faze. Prva faza je od momenta uključivanja spojnice, t_0 , do trenutka t_1 kada je spojnica potpuno uključena. Druga faza traje od trenutka t_1 do izjednačavanja ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata spojnice u trenutku t_2 . Treći interval predstavlja period od trenutka t_2 , u kojem se višelamelasta spojnica ponaša kao kruto telo.

Rezultati simulacije na prethodno definisanom modelu prikazani su na slici 11.

Slika 11 – Rezultati simulacije: a) moment nošenja spojnice, b) ugaone brzine ulaznog i izlaznog vratila

Na slici 12 prikazani su rezultati simulacije uključivanja višelamelaste frikcijske spojnice uz izmenjene uslove rada.

Slika 12 – Rezultati simulacije za a) $N_f = 4$ i b) $N_f = 12$

U stvari, jedina promena je u konstrukcionim parametrima spojnice i to u broju frikcionih površina. Svi ostali parametri ostali su isti kao i u prethodnoj simulaciji. Na slici 12 a) prikazana je promena ugaonih brzina pogonskih i gonjenih elemenata spojnice za $N_f = 4$. Sa slike 12 a) može se zaključiti da, u odnosu na prvu simulaciju, gde je period sinhronizacije pogonskih i gonjenih elemenata spojnice trajao oko 0,6 sekundi, u ovom slučaju taj period je mnogo duži i iznosi više od jedne sekunde. Sa slike 12 b) može se zaključiti da za povećan broj frikcionih površina $N_f = 12$ vreme sinhronizacije znatno kraće traje i iznosi manje od 0,5 sekundi.

Zaključak

Razvoj računarskih modela postao je posebna inženjerska disciplina, koji, za razliku od klasičnog načina projektovanja, razvoj mehaničkih sistema realizuje u virtuelnom, odnosno računarskom okruženju. U radu je prikazan model za simulaciju rada višelaamelaste frikcionog spojnice u MATLAB/Simulink okruženju. Značaj simulacionih modela ogleda se u mogućnosti donošenja adekvatnih odluka u početnim fazama projektovanja, ispitivanju funkcionalnosti i eksploatacijskih karakteristika sistema, što znatno smanjuje broj ispitivanja na fizičkim prototipovima, a samim tim i ukupnu cenu proizvoda. U radu je pokazano da se analizom simulacije vrlo brzo mogu dobiti rezultati za koje je kod klasičnog pristupa potrebno razrađivati posebne programe ili ručno izračunavanje. Prikazani model, u suštini, predstavlja opšti model višelaamelastog frikcionog sklopa i, kao takav, predstavlja deo jednog kompleksnog modela prenosnika snage. Ovakav simulacioni model, osim optimizacije rada višelaamelastog frikcionog sklopa, stvara mogućnost i za optimizaciju prenosnika snage u celini, kao i projektovanje sistema upravljanja prenosnicima snage.

Literatura

- [1] Krsmanović, M., Muždeka, S., Grkić, A., Arsenić, Ž.: *Simulacija rada elemenata sistema za prenos snage prilikom polaska motornog vozila s mesta*, 21. međunarodni naučno-stručni skup Nauka i motorna vozila 2007, JUMV-SP-0702, ISBN 978-86-80941-32-5, NMV0756S, Beograd, 2007.
- [2] Abel A., Schindler J.: *Shifting Simulation – Goals, Solutions and Benifits*, Auto Technology 5/2006.
- [3] Lang T., Schyr Ch.: *Simulation Aided Proces for Developing Powertrains*, SAE Convention, Sao Paolo Brasil, October 2000.
- [4] Muždeka, S., Arsenić, Ž., Aleksendrić, D.: *Projektovanje elemenata složenih prenosnika snage*, Međunarodni naučno-stručni skup IPS 2001, Podgorica – Bečići, 2001.
- [5] Živanović, Z., Janićijević, N.: *Automatske transmisije motornih vozila*, ECOLIBRI, Beograd, 2000.
- [6] MATLAB Using Simulink and Stateflow™ in Automotive Aplication, 1999.