

Nelinearni fenomeni u dinamici loma mašinskih konstrukcija

Dr Katica (Stevanović) Hedrih¹⁾
Dr Dragan B Jovanović¹⁾

Rad je pokušaj objedinjavanja najnovijih saznanja i poznatih znanja o nelinearnim dinamičkim sistemima teorijom nelinearne mehanike slučajnih oscilacija i mehanike loma i oštećenja, radi definisanja predznaka katastrofe sistema i praktičnih kriterijuma rizika od loma i nestabilnosti rada inženjerskih sistema i njihovog unošenja u proces projektovanja mašinskih pod sistema i sistema. Ovakva znanja su preduslov za projektovanje pouzdanog sistema i određenog nivoa kvaliteta otpornosti na lom i gubitak stabilnosti. Objedinjeni su rezultati istraživanja nelinearnih fenomena dispartne prirode i saznanja dispartnih naučnih oblasti na osnovu matematičke fenomenologije, nelinearne mehanike, teorije slučajnih oscilacija i mehanike loma, i znanja o pouzdanosti dinamičkih sistema.

Ključne reči: Nelinearna dinamika, mehanika loma, prslina, mašinstvo, mehanika.

U v o d

BILI smo 78 dana svedoci *eksperimenta mehanike loma* "in vivo" pod dejstvom najsavršenijih tehničko-tehnoloških dostignuća, u kojima se koriste vibroudarni procesi za razaranje konstrukcija (i njihov lom), a čija je pouzdanost i tačnost, s aspekta upravljanja kretanjem, vrhunska, što je civilizacijski klasičan primer ostvarenog društvenog rizika i katastrofe. Eksperiment mehanike loma, u laboratoriji otvorenog prostora, klasičan je primer višeslojnog rizika upotrebe pouzdanih tehničko-tehnoloških sistema na bazi *vibroudarnih procesa* [1], koji vode ka katastrofi [2].

Pokazano je da je *rizik* izazvan upotrebom najsavremenijih i najpouzdanijih tehničko-tehnoloških sistema, i da rezultat nije samo *moгуća katastrofa od razaranja elemenata sistema i konstrukcija u procesu njihovog rada*, nego i međudejstva tehničkog, biološkog i društvenog sistema usmerenog na razaranje. U najširem smislu rizik je neka dinamika sistema, koja može slučajno ili nužno da dovede do razaranja sistema ili njegovih elemenata ili *gubitka stabilnosti* koja vodi razaranja, ili kojom se upravlja da bi se *ostvarilo razarajuće dejstvo*. Kako je dinamički sistem ili više sistema u interakciji s čovekom i prirodnom životnom sredinom [1], rizik može da se definiše pomoću više različitih fizičkih i bioloških fenomena i procesa. U radu su razmatrani tehničko-tehnološki aspekti rizika od loma konstrukcije zasnovani na saznanjima o nelinearnim dinamičkim sistemima, mehanici loma i teoriji slučajnih oscilacija. Rizik je izvestan i kada se radi o senzitivnoj osetljivosti dinamike nelinearnog sistema na male promene početnih uslova na kinetičkim parametrima, koji odgovaraju pojavi, u sistemu, trigera spregnutih singulariteta.

Pojava lokalnih fenomenoloških singulariteta i dinamika globalnog sistema, u kome se javljaju ti *singulariteti* ([3-6]), predstavlja skup linearnih i nelinearnih, prostih i složenih dinamičkih determinističkih ili stohastičkih procesa sa elementima haotičnosti na osnovu kojih možemo

fenomenološki doći do kriterijuma rizika od pojave određenih neželjenih dinamika. Mehanika nelinearnih fenomena ([1-4,7,8]) i mehanika loma ([9-16]) jesu nauke koje nam otkrivaju *singularne, nelinearne fenomene*, na osnovu kojih možemo predvideti *pojavu lokalnih rizika*, a na osnovu *akumulacije lokalnih rizika* i stvaranja evolucionih procesa koji uzrokuju fenomenološki nove procese, mogu da se predvide i uoče znakovi upozorenja od *globalnog rizika*.

Matematička fenomenologija [17] Mihajla Petrovića Alasa, ističe da su *uloge* sadržane u *jednom fenomenološkom tipu fakata* nezavisne od specifične konkretne *prirode svojih nosilaca*. Mogućnost korišćenja fenomenološkog pristupa u različitim sistemima traženja zajedničkih fenomenoloških tipova nosilaca, na osnovu kojih možemo dati opšte kriterijume nastanka rizika, ali s mogućnošću, da ih na osnovu specifičnih konkretnih prirodnih nosilaca prilagođavamo *konkretnom dinamičkom, materijalnom, matematičkom, ekonomskom, biološkom ili ekološkom sistemu*.

To znači da se jedna ista uloga može da veže za najdispartnije nosioce, kako materijalne tako i *inponderabilne prirode*. M. Petrović je definisao *dva fenomenološka tipa faktora i tri tipa uloga* na sledeći način. U *Fenomenološkom preslikavanju* ([17]) M. Petrovića definišu se: *impulsivni faktor i depresivni faktor*, zatim *uloga izazivača, regulatorska i terenska uloga*.

Svaka uloga takvog opšteg karaktera predstavlja po jednu fenomenološku ulogu koja ima karakteristična obeležja fenomenoloških bića, a za nju vezane pojedinosti imaju odlike fenomenoloških pojedinosti i fakata.

M. Petrović Alas otvara "*prostranu naučnu oblast matematike u proširenom smislu*" koja pored broja, veličine i reda, obuhvata "*i druge opšte pojedinosti u svetu fakata, nezavisne od konkretne prirode njihovih nosilaca*". Istovremeno zaključuje, da put za razradu te naučne oblasti "*vodi preko fenomenološkog preslikavanja fakata po njihovim zajedničkim pojedinostima i preko apstrakcija onakve vrste kakvima je stvoren i usavršen današnji*

¹⁾ Mašinski fakultet, 18000 Niš, Beogradska 14

matematički aparat”. Prilozi ovakvim razmatranjima su dati u [18-27].

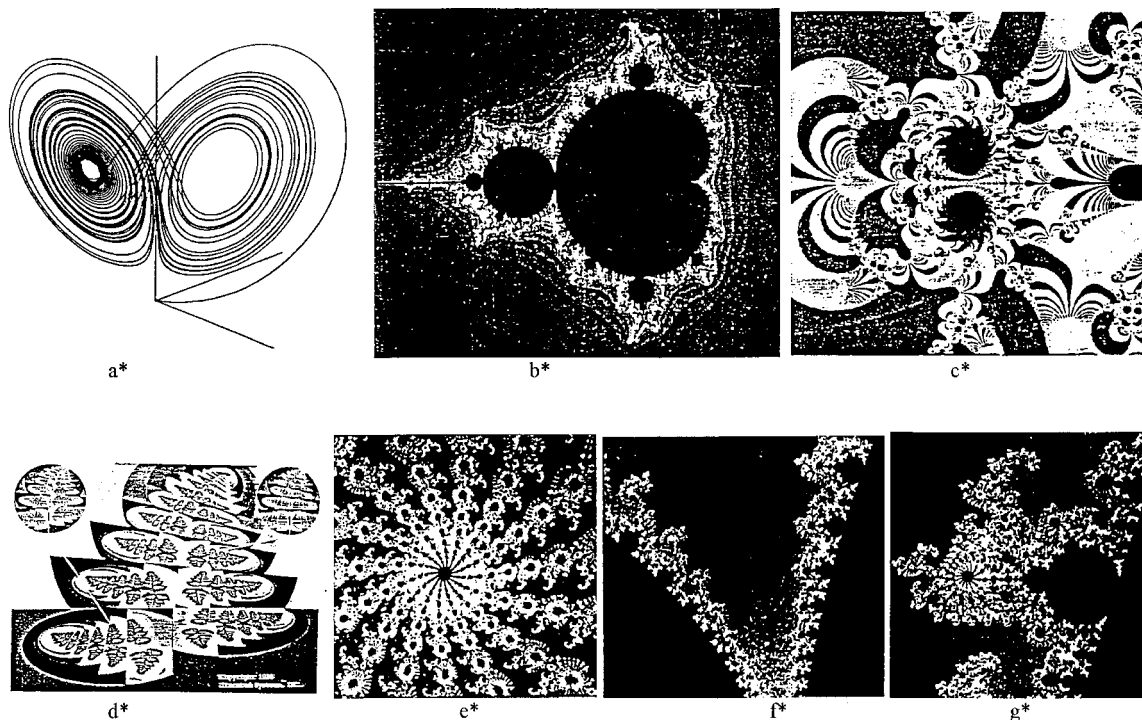
Današnji stepen razvijenosti znanja o nelinearnim dinamičkim sistemima i modelima upravljanja dinamičkim sistemima, kao i mogućnosti izvođenja numeričkih eksperimenata ([28-30]) na moćnim računarima, omogućava modeliranje fenomenoloških preslikavanja fakata i stvaranje apstraktne teorije i kreterijuma rizika od pojavljivanja određenih dinamika nelinearnih procesa sa specifičnim fenomenima, koji omogućavaju njihovu upotrebnu vrednost u dinamičkim sistemima s različitim karakterom svojstava.

Fenomeni nelinearne dinamike – uzročnici rizika loma

Kada je Lorentz [5,7,31-33] otkrio čudni atraktor u termofluidnim procesima u atmosferi, sl. 1a*, pisao je o efektu “leptirovih krila”, tj. da je nemoguće pouzdano tvrditi hoće li ili neće lepršanje krila leptira na jednoj strani zemljine kugle da izazove katastrofu na drugoj strani zemaljskog šara. Taj čudni atraktor ima fraktalnu, razlomljenu Hausdorfovnu dimenziju ([5,7,31-33]). Objekte razlomljenih dimenzija možemo videti i u prirodi. Na sl. 1d* npr., prikazan objekt fraktalne dimenzije – list paprati, ili na slikama 1b* i c* primerci “Maldelbrot set” (Maldelbrot skupa) [5] i “Julia set” (Julija skupa) [5] s fraktalnim dimenzijama. Ti prekrasni objekti su lepi fraktali [5,31], a sačinili su ih matematičari koristeći mogućnosti moćnih i brzih računara izvođeci iteracione procese po stepenim, odnosno eksponencijalnim zakonitostima – formulama preslikavanja i prateći dinamiku tih iteracionih procesa za različite vrednosti koeficijenata i za različite početne tačke iteracija. Zavisno od broja iteracija posle kojih su rezultati iteracije *iskakali* iz određenih “prozora” (oblasti), te početne tačke bojili su određenim bojama. U početku je to bila samo lepa slika a onda su ti fraktali upotrebljeni za tumačenje nelinearnih dinamičkih procesa

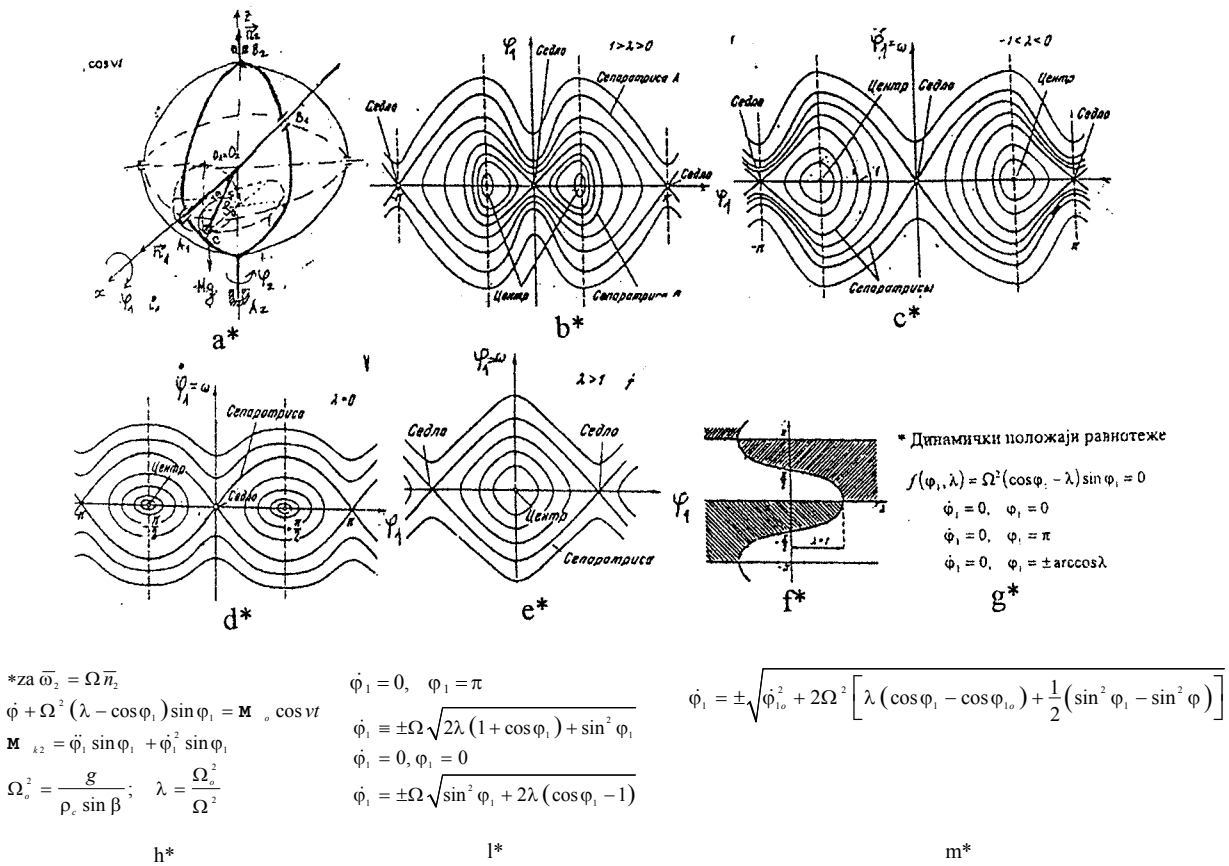
sa svojstvima višestrukih bifurkacija u kritičnim tačkama [3,5], svojstvima stohastičnosti i haotičnosti pri tim kritičnim vrednostima parametara sistema. Pojavila se teorija determinističkog haosa [5,34,35]. Saznanja o fraktalima povratno inspirišu naučnike da istražuju i otkrivaju nelinearne dinamičke procese u determinističkim dinamičkim sistemima, različite prirode, a koji su senzitivno osetljivi¹ [3,7,33] na male promene početnih uslova [4,7,32,36,37] koji menjaju karakter procesa i stabilnosti kretanja i svojstva strukturne stabilnosti pri tome. Tu počinju primene dostignuća nelinearnih nauka.

Jedan od karakterističnih fenomena u nelinearnoj prinudnoj dinamici je fenomen rezonantnog skoka [38,39] koji se dešava u kritičnom frekventnom opsegu, trenutnom promenom, naglim porastom ili opadanjem – rezonantnim skokom amplitude i faze na nekoj kritičnoj vrednosti frekvencije čime se menja režim oscilovanja sistema. Ova pojava se ne uočava kod linearnih sistema, već samo kod nelinearnih sistema, i to počevši s jednim stepenom slobode gde se javljaju dva rezonantna skoka [39]. Kod nelinearnih sistema s više stepeni slobode kretanja, javlja se više od dva rezonantna skoka, i to zavisi od konkretnih parametara sistema i interakcije rezonantnih stanja prinudnih harmonika. Na slikama 3, 4 i 5 su prikazane amplitudno-frekventne i fazno-frekventne krive rezonantnog stanja nelinearnih sistema s jednim i dva stepena slobode kretanja. Amplitudno-frekventne krive jednofrekventnog stacionarnog rezonantnog stanja su prikazane na slikama 3 i 4 za nelinearni sistem sa jednim stepenom slobode kretanja. Amplitudno-frekventne krive nestacionarnog rezonantnog stanja prolaska kroz rezonantni opseg frekvencija za taj sistem prikazane su na sl.3. Primer amplitudno-frekventnih i fazno-frekventnih krivih dvofrekventnog stacionarnog rezonantnog stanja sa odgovarajućim singularitetima u preslikanim faznim ravnima, a za nelinearni sistem s dva stepena slobode kretanja, prikazani su na skicama sa slike 5.

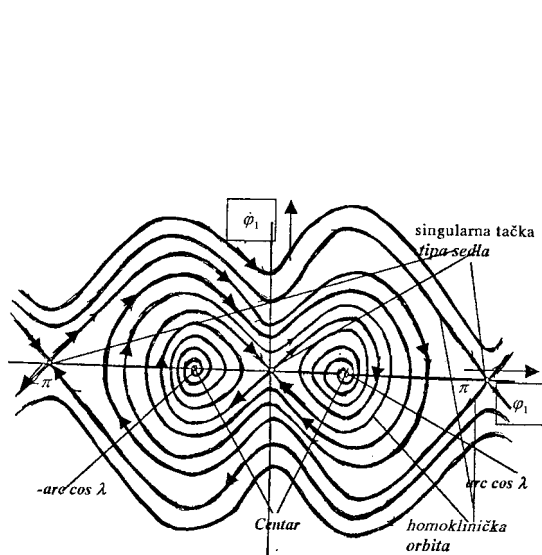


Slika 1a*- Lorentzov atraktor, b*- Maldelbrotov skup, c*- Julia skup, d*- paprat, e*, f*, g*- primeri fractala

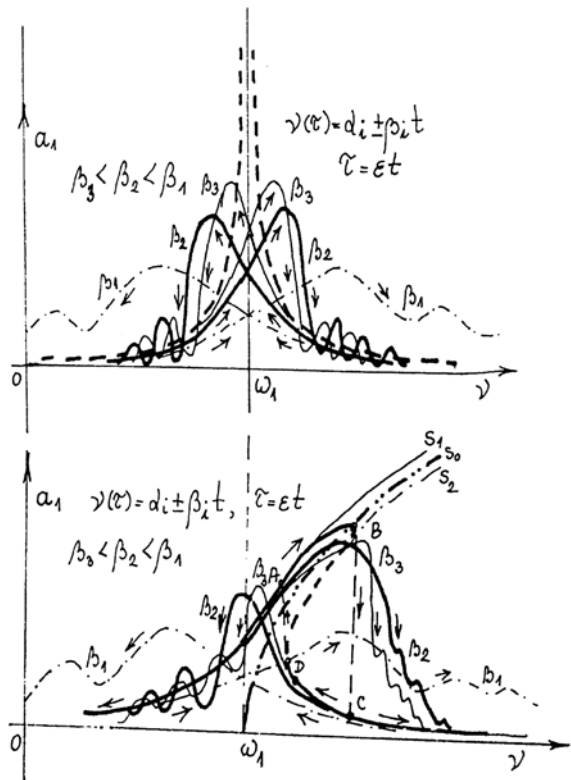
¹) Senzitivna osjetljivost – upotrebljeno u smislu osjetljive osjetljivosti, odnosno da se na male promene nekih kinetičkih parametara sistema ili početnih uslova bitno menja karakter kretanja, karakter nelinearne pojave ili strukture sistema.



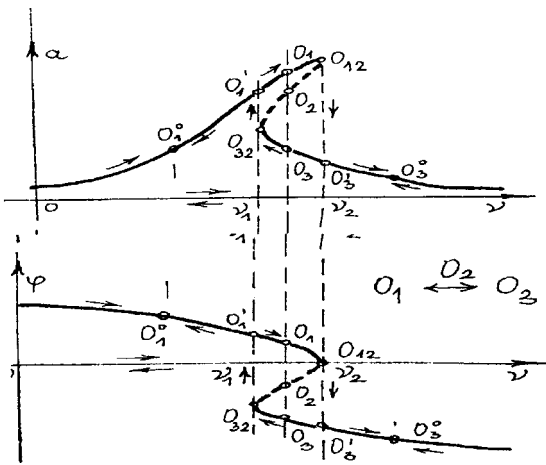
Slika 2a*- model giroratora, b*, c*,d*,e*- fazni portreti i integralne krive u faznoj ravni za različite parametre giroratora, f*- grafik strukturne stabilnosti portreta singularnih tačaka i dinamičkih i statičkih položaja ravnoteže; g*- jednačine dinamičkih položaja ravnoteže – položaja relativnog mirovanja, h*- jednačine rotacija giroratora, i* i m*- jednačine faznih trajektorija za različite početne uslove



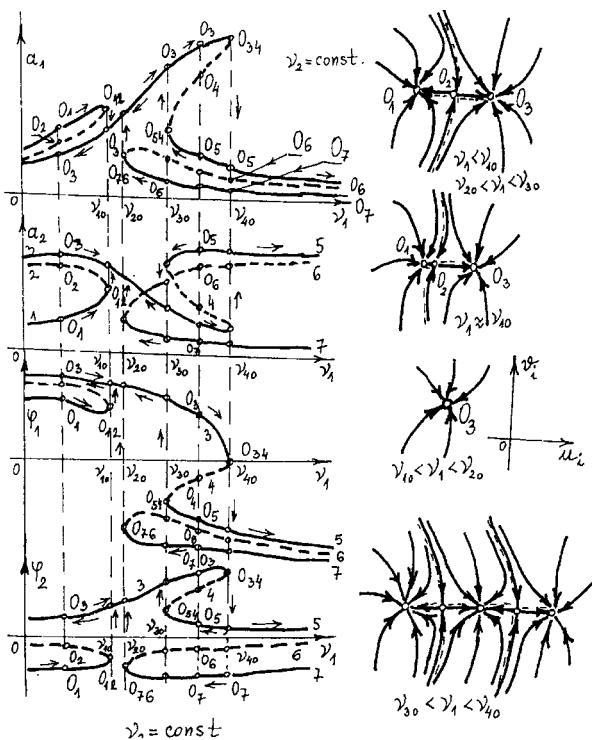
Slika 2n*. Fazni portreti separatrijsnih – homokliničkih trajektorija za kinetičke parametre ($1 > \lambda > 0$) dinamike giroratora u polju turbulentnog prigušivanja.



Slika 3. Amplitudno-frekventne krive stacionarnog i nestacionarnog rezonantnog režima linearnog i nelinearnog sistema

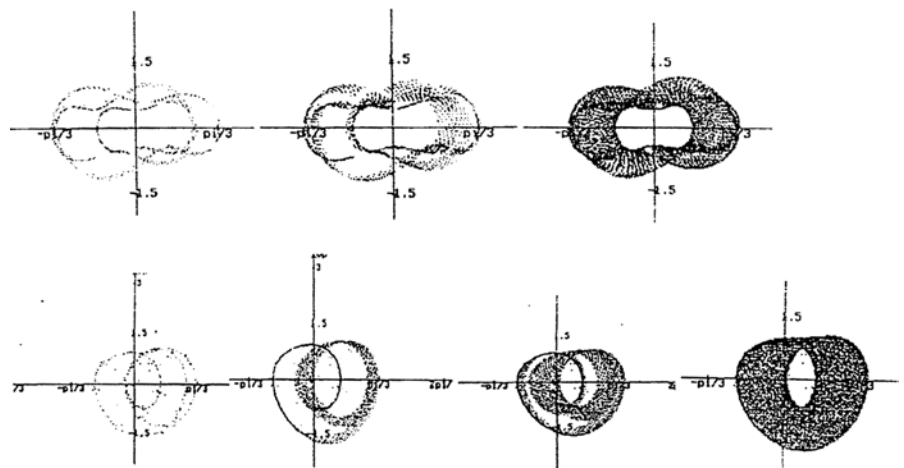


Slika 4. Amplitudno-frekventna i fazno-frekventna kriva stacionarnog rezonantnog jednofrekventnog režima nelinearnog sistema



Slika 5. Amplitudno-frekventne i fazno-frekventne krive i stacionarne tačke za dvofrekventni stacionarni režim nelinearnih oscilacija i skice trigera singulariteta i spregnutih trigera singulariteta.

Kod nekih nelinearnih sistema, promenom kinematičkih parametara, npr. ugaonih brzina, *statički stabilni položaji* i konfiguracije ravnoteže u *dinamičkim uslovima gube stabilnost* i položaj ravnoteže *iz stabilnog prelazi u nestabilan*, a pri tome se javljaju još *dva stabilna dinamička položaja ravnoteže* oko kojih su moguće male oscilacije. Tako se formira *triger spregnutih singulariteta u faznoj ravni*, koji odgovara tim spregnutim konfiguracijama ravnoteže, i dolazi do *reorganizacije faznog portreta*. Sl.2b*,c*,d* prikazuje fazne portrete nelinearne dinamike jednog prostog girorotora (u obliku teške materijalne tačke koja rotira oko dva vratila, *sopstvenog i prenosnog*, čije se ose



Slika 6. Izbor Poincaréovih preseka faznih trajektorija Mathieu-Hillove modifikovane diferencijalne jednačine za kretanje teške materijalne tačke po krugu sa oscilujućim centrom u vertikalnoj ravni za karakteristične parametre sistema [33]

seku - to je slučaj obrtanja tela oko nepomične tačke) za različite kinetičke parametre sistema. Ovakva reorganizacija konfiguracija i stabilnosti položaja ravnoteže sistema menja karakter dinamike sistema i za *različite male promene početnih uslova*. U takvim slučajevima važno je izučiti ponašanje sistema pri malim promenama parametara sistema oko homokliničkih tačaka i orbita koje odgovaraju nestabilnim položajima dinamičke ravnoteže i relativnog mirovanja, ili položajima statičke ravnoteže koji u dinamičkim uslovima gube stabilnost i ispitati njegovu stabilnost i moguće bifurkacije dinamičkih procesa [4,5,7,21,31,33,39,40]. To je značajno za prognoziranje moguće pojave rizika.

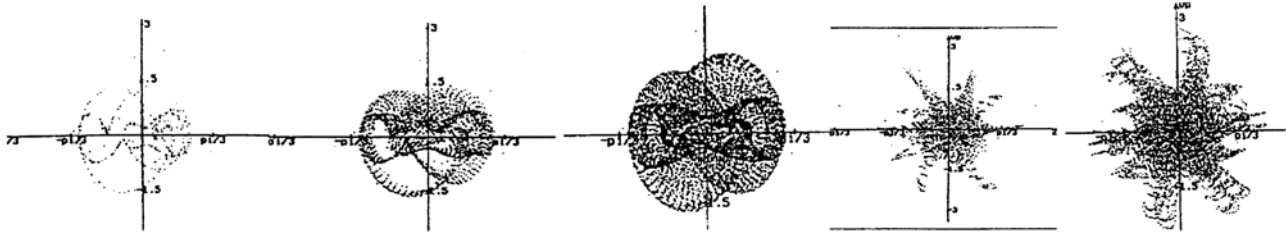
Rizik je u tome što se nelinearnost tipa *trigera (prekidača)* spregnutih singulariteta ponaša kao *okidač*, koji omogućava *preključivanje* ili *prebacivanje* sistema s jedne dinamike na drugu u uslovima malih, čak i jednofrekventnih periodičnih pobuda i za male promene početnih uslova. Pojava takvih rizika je spregnuta i pojavom *senzitivne osetljivosti* na male promene početnih uslova. Tako npr. u uslovima kinetičkih parametara sistema (npr. girorotor sl.2a*), za parametre sistema kojima odgovaraju fazne trajektorije (sl.2b*), gde se javlja *homoklinička tačka tipa sedla* kroz koju prolazi *separatrisna homoklinička trajektorija* oblika broja "osam", moguće je kretanje sistema slično haotičnom i slučajnom kretanju. Tada se za sasvim determinističke uslove kao odziv na jednofrekventnu sasvim strogo periodičku pobudu, javlja kretanje slično haotičnom i slučajnom procesu, a zatim može da se javi kretanje koje ima karakter dvojnoperiodičkog oscilatornog kretanja oko dva obližnja stabilna dinamička položaja ravnoteže, koji su prikazani singularnim tačkama tipa centra, koje okružuje ta separatrisa oblika osmice.

Na slikama 6 i 7 su prikazani Poincaréovi preseki za nelinearne procese opisane *Mathieu-Hillovom* diferencijalnom jednačinom [33], kojom se opisuje nelinearna dinamika teške materijalne tačke koja se kreće po krugu sa oscilujućim centrom u vertikalnoj ravni, a što je analogna i karakteristična pojava kod raznih rotora sa ekscentrično postavljenim diskovima ili njihovim masenim nehomogenostima, ili debalansiranih rotora. S tih Poincaréovih preseka može da se uoči pojava trigera singulariteta koja ukazuje na moguće pojave "okidanja" amplituda i faza, pojavu senzitivne osetljivosti na početne uslove i pojavu dinamike haosa u dinamici rotora turbina, planetarnih i običnih prenosnika snage i reduktora, kao

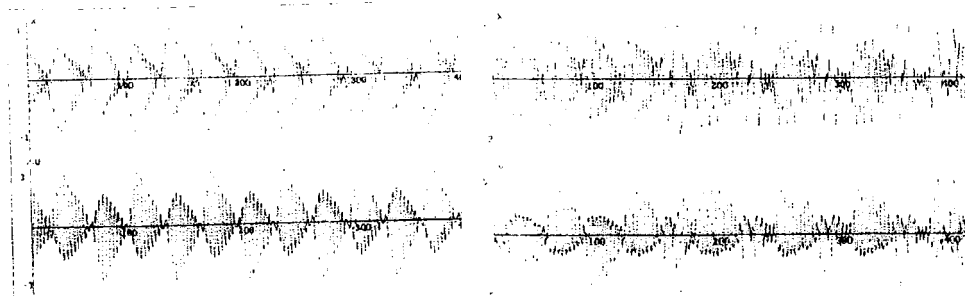
sistema pumpi i spregnutih elektroagregata i hidroagregata itd. Na sl.8 su prikazani odgovarajući kinematički dijagrami, za dinamike istih sistema, ali za različite izbore

ugledu na [18 i 19].

U rezultatu dejstva na objekt A, s determinističkom ili slučajnom strukturom, sile determinističke ili slučajne $F(t)$,

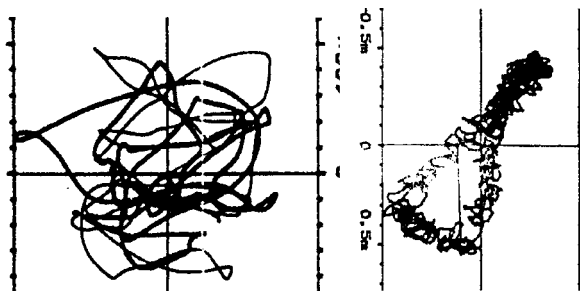


Slika 7. Izbor Poincareovih preseka faznih trajektorija Mathieu-Hillove modifikovane diferencijalne jednačine kojom se opisuje dinamika materijalne tačke po krugu sa jednofrekventno oscilujućim centrom u vertikalnoj ravni za karakteristične parametre sistema [33]



Slika 8. Kinematički dijagrami kretanja teške materijalne tačke po krugu s jednofrekventno oscilujućim centrom koje se opisuje Mathieu-Hillovom modifikovanom jednačinom za različite početne uslove i parametre sistema [33]

karakterističnih kinetičkih (geometrijskih i fizičko--



Slika 9. Putanje referentne tačke vratila i ležišta centrifugalne pumpe - eksperimentalni zapis u fabrici pumpe *Jastrebac* [8]

dinamičkih) parametara sistema. Na sl.9 su prikazani eksperimentalni zapisi putanja karakterističnih tačaka vratila centrifugalne pumpe na ispitnom štandru fabrike pumpe *Jastrebac* iz Niša, a za nelinearne dinamičke procese u radu hidroagregata, koji fenomenološki mogu da se prepoznaju u dinamici velikog broja mašinskih sistema [8].

Slučajne oscilacije - izazivač rizika loma

Da bi smo *ocenili sposobnost* objekta da *prenosi vibraciju*, podnese nivo vibracija [35] i ne dođe u stanje rizika od loma, neophodno je *imati informaciju o eksploatacionim vibracijama*, tj. imati model vibracionih procesa - njihovu strukturu i parametre koji opisuju realne procese.

Kao *model eksploatacionih vibracija* koji obuhvata dosta širok krug praktičnih zadataka, a daje metodološku osnovu za postavljanje sličnih modela, usvajamo model prikazan u [35]. Pri tome uvodimo nove pojmove *eksploatacionih slučajnih vibracija*, korišćenjem vektora vezanih za tačku i pravu, analogno tome kako se postavljaju modeli stanja napona i stanja deformacija u teoriji elastičnosti [18,19,22], koristeći pri tome analogiju koja može da se postavi po

pojavljuju se oscilatorna kretanja – vibracije njegovih tačaka i svaka tačka objekta izvodi prostorne vibracije², koje se razlikuju od vibracija u drugim njenim tačkama. U najopštijem slučaju ta oscilatorna kretanja, odnosno vibracije svake tačke su *nestacionarni slučajni procesi*. Ali, samo na osnovu te tvrdnje nismo u mogućnosti da napravimo model. Zato uvodimo pretpostavku da se radi o *stacionarnom slučajnom procesu*, u određenom intervalu vremena. Druga pretpostavka je da je model vibracije objekta niz stacionarnih slučajnih procesa, a karakteristike proizvoljna dva susedna, objekta su nezavisne jedne od drugih. Uvodimo takođe, da skalarni stacionarni slučajni proces može da bude opisan *spektralnom gustinom* $S_x(\omega)$.

Koristeći analizu i *modele stacionarnih slučajnih vibracionih procesa* - njihovu strukturu i parametre koji opisuju realne procese, razmotrene na modelima eksploatacionih vibracija (prema [35]), kao i ideje iz [18 i 19] uvodimo pojmove *tenzora stanja stacionarnih slučajnih vibracionih procesa* u referentnoj tački vibraciono pobuđenog objekta, kao i *vektore stanja stacionarnih slučajnih procesa u referentnoj tački vibraciono pobuđenog objekta, a za određeni pravac*.

Koristeći kompletnu analogiju sa stanjem deformacija napregnutog deformabilnog tela (ref. [18 i 19]) definisani su *vektori spektralne gustine i korelacija elongacija - oscilatornih pomeranja* referentne tačke vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac oscilacija.

Prateći citirane reference možemo istom metodologijom da analiziramo *stanje stohastičkih momenata vibraciono pobuđenog objekta*. Uveden je novi termin *stanje stohastičkih momenata vibraciono pobuđenog objekta*.

Tenzor stanja spektralne gustine i vektor spektralne gustine.

Pretpostavka da su poznate spektralne gustine stacionarnih slučajnih vibracionih procesa (npr. elongacija - oscilatornih pomeranja) u tri ortogonalna pravca kroz

²Termin *oscilacija* koristimo za periodička kretanja konstantne amplitude i frekvencije, a termin *vibracija* koristimo za oscilatorna kretanja promenljive i/ili modulirane amplitude i/ili faze.

referentnu tačku: $S_n(\omega)$, $S_u(\omega)$, $S_v(\omega)$ i uzajamne spektralne gustine $S_{nu}(\omega)$, $S_{nv}(\omega)$, $S_{uv}(\omega)$. Pomoću nabrojanih spektralnih gustina formiramo matricu:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} S_n(\omega) & S_{un}(\omega) & S_{vn}(\omega) \\ S_{nu}(\omega) & S_u(\omega) & S_{vu}(\omega) \\ S_{nv}(\omega) & S_{uv}(\omega) & S_v(\omega) \end{pmatrix}$$

koja predstavlja matricu \mathbf{G} tenzora stanja spektralne gustine u izabranoj tački vibraciono pobuđenog objekta. Od elemenata odgovarajućih kolona definišemo pojmove vektora $\mathbf{S}_n^{(A)}(\omega)$ spektralne gustine vibracionog polja u nekoj tački A vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac orijentisan jediničnim vektorom \mathbf{n} :

$$\mathbf{S}_n^{(A)}(\omega) = (\mathbf{S}_n^{(A)}(\omega), \mathbf{n})\mathbf{n} + \mathbf{D}_n^{(A)}(\omega) = \mathbf{S}_n^{(A)}\mathbf{n} + \mathbf{S}_{nu}^{(A)}\mathbf{u} + \mathbf{S}_{nv}^{(A)}\mathbf{v}$$

Pravac orijentisan vektorom \mathbf{n} i vektor spektralne gustine $\mathbf{S}_n^{(A)}$ vibracionog polja u nekoj tački vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac oscilacija obrazuju ravan nazvanu devijacionom ravni spektralne gustine vibracionog stanja u referentnoj tački vibraciono pobuđenog objekta.

Tenzor stanja korelacija slučajnih oscilacija i vektor korelacija

Definišimo i matricu \mathfrak{R} tenzora stanja korelacija slučajnog vibracionog stanja pobuđenog objekta u nekoj njegovoj referentnoj tački u obliku:

$$\mathfrak{R} = \begin{pmatrix} D_n & K_{un} & K_{vn} \\ K_{nu} & D_u & K_{vu} \\ K_{nv} & K_{uv} & D_v \end{pmatrix}$$

Od elemenata kolona matrice \mathfrak{R} tenzora korelacija slučajnog vibracionog stanja definišemo vektor $\vec{\mathbf{K}}_n^{(A)}$ korelacija vibracionog stanja u nekoj tački vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac orijentisan jediničnim vektorom \mathbf{n} u obliku:

$$\mathbf{K}_n^{(A)} = (\mathbf{K}_n^{(A)}, \mathbf{n})\mathbf{n} + \mathbf{D}_n^{(A)} = D_n^{(A)}\mathbf{n} + K_{nu}^{(A)}\mathbf{u} + K_{nv}^{(A)}\mathbf{v}$$

Veze između stanja korelacija i stanja gustine slučajnog vibracionog procesa u nekoj tački pobuđenog objekta možemo napisati pomoću matrica odgovarajućih tenzora: \mathbf{R} tenzora korelacija slučajnog vibracionog stanja pobuđenog objekta u referentnoj tački i \mathbf{G} tenzora stanja spektralne gustine u izabranoj tački vibraciono pobuđenog objekta, u sledećem obliku:

$$\mathbf{R}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{G}(\omega) e^{i\omega\tau} d\tau$$

Veze između stanja korelacija i stanja gustine slučajnog vibracionog stanja, u nekoj tački pobuđenog objekta za određeni pravac, možemo da napišemo pomoću odgovarajućih vektora korelacija i vektora gustine, u referentnim tačkama za referentne pravce: vektora $\mathbf{R}_n^{(A)}$ korelacija vibracionog stanja u nekoj tački vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac orijentisan jediničnim vektorom \mathbf{n} i vektora $\mathbf{S}_n^{(A)}(\omega)$ spektralne gustine vibracionog polja u nekoj tački A vibraciono

pobuđenog objekta za određeni pravac orijentisan jediničnim vektorom \mathbf{n} , u sledećem obliku:

$$\mathbf{K}_n^{(A)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{S}_n^{(A)}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

Ovako definisani vektori $\mathbf{S}_n^{(A)}(\omega)$ spektralne gustine vibracionog polja u nekoj tački vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac i vektor $\mathbf{K}_n^{(A)}$ korelacija vibracionog stanja u nekoj tački vibraciono pobuđenog objekta za određeni pravac, dozvoljavaju nam da proširimo analogiju uspostavljenu između modela stanja napona, modela stanja deformacija i modela stanja momenta inercije masa čvrstog tela [18 i 19] i na model stanja statističkih momenta pobuđenog slučajnog vibracionog polja objekta podvrgnutog vibracionim poremećajima.

Svojstva modela stanja iz citiranih analogija prevedena na definisane modele slučajnog vibracionog polja, govore o pojmovima: invarijante tenzora stanja spektralne gustine slučajnog vibracionog polja, invarijante stanja korelacija slučajnog vibracionog polja, glavne spektralne gustine stanja slučajnih vibracija objekta, glavni pravci spektralnih gustina stanja slučajnih vibracija, korelacione funkcije vibracionog polja, glavni pravci korelacija stanja slučajnih vibracija, pravci spektralno-gustinske asimetrije, pravci korelacione asimetrije, oktaedarski pravci korelacija, oktaedarski pravci spektralnih gustina stanja slučajnih vibracija.

Pomoću tako definisanih pojmova stanja slučajnih vibracija mogu da se postave kriterijumi rizika od vibracionog zamora i prognozira kvalitet rada konstrukcije. Ovakav pristup traži detaljniju analizu. Ukazano je na mogućnost da se pri ocenjivanju predznaka rizika od loma inženjerskog sistema ovakva analiza stanja korelacija i stanja spektralnih gustina slučajnog vibracionog polja i njegove osobenosti vrlo efikasno mogu da iskoriste. Zato je potrebno da se na ovim osnovama dogradi kompletna teorija.

Pojava i prostiranje prsline, izvori i uzročnici rizika loma

Ove godine je u Španiji održana 13. evropska konferencija iz mehanike loma (vid ref. The 13th European Conference on Fracture CD rom, Španija, 2000) na kojoj su prikazana nova saznanja iz mehanike loma i koja se u najvećem delu baziraju na eksperimentalnim saznanjima. Zaključeno je da tek predstoji teorijski razvoj ove naučne oblasti, posebno u delu analitičkog opisivanja pojava širenja prsline, izgrađivanje teorije bifurkacije prsline i energijskih stanja materijala u okolini vrha prsline.

Prslina u materijalu, kao pojava nelinearno singularnog karaktera, nastaje razaranjem i razdvajanjem materijala. Prslinu karakteriše pojava novih konturnih površi koje se odvajaju od jedne zajedničke, pre toga fiktivne površi razdvajanja, duž koje nastaje odvajanje materijala klizanjem ili otvaranjem. Pojam prsline, stanje napona i stanje deformacija oko vrha prsline su u osnovi razvoja teorije mehanike loma materijala i konstrukcije [9-13,36,41-43].

Navedene su definicije nekih pojmova od značaja za izlaganja izabranih ideja, razvijenih u ovom radu.

Stepen površinski oslobođene energije (Energy Release Rate) [9,13-15,36,43,44] \mathbf{G} je promena gustine potencijalne energije po jedinici površine konturne površi bokova

prslina i definiše se u varijacionom obliku - kao varijacioni izvod potencijalne energije Π po konturnoj površi A bokova prsline. Pomoću stepen površinski oslobođene energije definiše se kriterijum stabilnosti prsline u obliku:

$$\mathbf{G} = -\frac{\delta \Pi}{\delta A} = 2\gamma = \mathbf{G}_c = \text{const}$$

ili *kriterijum za propagaciju (napredovanje) vrha (čela) prsline*, kada se prethodna relacija napiše u obliku nejednakosti. Prethodne relacije predstavljaju Griffithov kriterijum loma, a on može da bude izražen i pomoću faktora intenziteta napona \mathbf{K}_I . Kada se "*površinska brzina*" oslobođene energije ili mera stepen površinski oslobođene energije izrazi pomoću faktora intenziteta napona \mathbf{K}_I [15,36,42], za prvi mod (oblik) deformacije prsline je:

$$\mathbf{G}_I = \begin{cases} \frac{1-\mu^2}{E} \mathbf{K}_I^2 & \text{za ravno stanje deformacija} \\ \frac{1}{E} \mathbf{K}_I^2 & \text{za ravno stanje napona} \end{cases}$$

Analizom *putanje vrha prsline i propagacije prsline*, kao i saznanja o *bifurkaciji prsline*, pri njenoj propagaciji mogu da se dobiju kriterijumi rizika od loma. Međutim, savremena saznanja ekperimentalne mehanike loma nisu još dobila odgovarajuća teorijska utemeljenja i analitičke izraze kojima, praktično, mogu da se vrše proračuni složenih slučajeva.

Aktivno stanje prsline je stanje u kome vrh prsline napreduje, a naponi i deformacije u tačkama okoline vrha prsline se uvećavaju. Aktivno stanje prsline se definiše površinskom brzinom pomeranja vrha prsline iznad definisane granice i izražava relacijom nejednačine.

Faktori intenziteta napona su teorijski ili eksperimentom određeni kinetički parametri, koji zavise od vrste opterećenja, oblika prsline i njene geometrije. Najčešće se definišu za odgovarajuće konturne uslove i geometriju konstruktivne prsline i poznato statičko stanje napona i stanje deformacija. Koriste se za sastavljanje asimptotske aproksimacije rešenja za izraze komponentnih napona i komponentne deformacije u okolini prsline, uvođenjem pretpostavki o obliku prsline i o svojstvima propagacije prsline. Faktori intenziteta napona, u zavisnosti od vrste i oblika prsline i naponskog stanja ploče, prema dostupnim podacima iz literature nalaze se u vidu tablica i priloga u monografijama ili priručnicima, kao npr. N. Toda (1973), Y. Murakami (1987), i D. Šumarca, D. Krajčinovića (1990) [9,11,13,36, 45]. Faktori intenziteta napona za dinamička stanja napona i stanja deformacija su još u fazi istraživačkog zadatka.

Nivo oštećenja je parametar akumulacije oštećenja i pomoću njega može da se ocenjuje stepen rizika od loma na osnovu saznanja mehanike loma [10 i 13].

Akumulacija oštećenja se definiše nivoom ω oštećenja i za nivo oštećenja 1 nastupa lom. Rizik od loma može da se oceni pomoću nivoa oštećenja. Kada je nivo ω oštećenja jednak jedinici rizik je izvestan, kada je $\omega < 1$ rizik je umanjn, a kada je $\omega = 0$ rizik ne postoji. Pod uslovima periodičnog (cikličnog) opterećenja razarajući lom može da se definiše linearnim sabiranjem oštećenja do nivoa kada počinje razvoj zamora materijala ili pojava prsline. Za detalje vidi Kachanov [13].

Energija aktivacije je energija pri kojoj nastupa napredovanje prsline u materijalu. *Prslina se "aktivira"* pri

određenoj vrednosti potencijalne i kinetičke energije ili pak u kvazistatičkim uslovima pri određenoj gustini potencijalne energije.

Analiza pouzdanosti se vrši na osnovu stanja napona i stanja deformacija i gustine potencijalne energije u tačkama okoline vrha prsline, ako se pouzdanost zasniva na kriterijumu lokalnog stanja u tačkama okoline vrha prsline. Ako se analiza pouzdanosti zasniva na globalnom stanju konstrukcije, onda se govori o pouzdanosti na osnovu akumulacije oštećenja. Kompetentna analiza pouzdanosti sistema mora da bude zasnovana na lokalnoj i na globalnoj proceni elemenata pouzdanosti, uključujući ne samo stanja napona i stanja deformacije u okolini prsline, nego i stanje stabilnosti cele konstrukcije u interakciji sa stanjem razaranja elemenata konstrukcije.

Globalni kriterijumi loma [9,11-14,16,42,43 i 46] se zasnivaju na saznanjima o kritičnom uzajamnom dejstvu lokalnog stanja napona u telu u okolini prsline i globalnog stanja napona. Jedan od globalnih kriterijuma loma je kritičan slučaj kada se *prslina javlja duž linije (trajektorije)* jednog od *glavnih napona* veće vrednosti, a propagacija vrha prsline ide duž te trajektorije, pri čemu je tangenta linije prsline na njenom vrhu ista s tangentom na trajektoriju glavnog napona u toj tački. Iz takvog odnosa globalnog stanja napona i lokalnog stanja napona u okolini prsline mogu da se izdvoje dva slučaja kojima se definišu dva globalna kriterijuma loma.

Irwin je dao postupak za *procenu oblasti plastičnog tečenja*, koja se javlja u okolini vrha prsline unutar elastično--idealno-plastičnog materijala, koja daje mogućnost za grubu aproksimaciju oblasti plastičnog tečenja materijala u okolini vrha prsline, kao i uticaja na ponašanje prsline i napredovanja vrha ili čela prsline [12,36]).

Kriterijum nagomilavanja oštećenja [10 i 13] se formira na osnovu praćenja uvećanja broja oštećenja, pojave i ponašanja većeg broja prsline, ili *bifurkacije* (grananja i pojave više pravaca napredovanja) jedne prsline. Taj proces se karakteriše nagomilavanjem oštećenja i akumulacijom parametara koji ukazuju na moguću pojavu loma. Na osnovu akumulacije lokalnih oštećenja, mogu da se predvide predznaci pojave globalne katastrofe i loma tela.

Kriterijumi loma izraženi preko napredovanja prsline se zasnivaju na teorijskim pretpostavkama i eksperimentalnim potvrđama o promeni dužine ili površine prsline pri prelasku u *novu prslinu sebi samsličnu* (selfsimilar-transformation) pod određenim uslovima i ograničenjima. U proizvoljnom slučaju prostornog stanja naprezanja tela i pojave prsline u njemu, koje menjaju pravce propagacije, kao i oblik, a time i veličine površine bočne konturne površi prsline, često dolazi i do bifurkacionih procesa propagacije prsline. To može da se poredi s *fraktalima* - fraktalnim matematičkim objektima (skupovima) fraktalnih dimenzija, te se u tom smislu pojavljuje novi pravac mogućih istraživanja i postavljanja teorije dinamičke propagacije prsline i kriterijuma za određivanje preduslova rizika loma.

Teorijsko proučavanje putanje prsline omogućava poredjenje različitih kriterijuma loma. Poznate metode za analizu putanje vrha prsline se uglavnom zasnivaju na pretpostavci o kvazistatičkim uslovima propagacije prsline, i mogu da se podele u dve grupe [15]: diferencijalne metode zasnovane na lokalnim kriterijumima loma i integralne metode zasnovane na globalnim kriterijumima loma.

Diferencijalne metode su zasnovane na određivanju ugla između početnog (inicijalnog) i narednog pravca

napredovanja vrha prsline. Svakom malom kvazistatičkom priraštaju opterećenja odgovara izvestan priraštaj dužine prsline.

Integralne metode pretpostavljaju određivanje jednačine linije napredovanja vrha prsline preko jedinstvenih konturnih uslova za telo, bilo da ono sadrži inicijalnu prslinu, ili je ne sadrži. Konturna površi tela može da bude jednostruko, ili višestruko povezana oblast, zavisno od pozicije prsline i oblika tela. Konturni uslovi mogu da budu zadati po naponima ili pak po pomeranjima.

Ovde navodimo sledeće lokalne kriterijume loma [15]:

- Kriterijum najvećeg normalnog napona** pri kome nastupa širenje (prostiranje) prsline na vrhu prsline u radialnom pravcu. Ovaj kriterijum su prvi uveli F. Erdogan i G. C. Sih 1963. [42] Po ovom kriterijumu širenje prsline nastupa u radialnoj ravni upravnoj na pravac maksimalnog normalnog napona u cirkularnom pravcu, a za tačke u okolini vrha prsline i za radialni presek; *vrh prsline počinje da napreduje kada maksimalni normalni napon za neku tačku u okolini vrha prsline i za radialnu ravan s normalom u cirkularnom pravcu dostigne kritičnu vrednost za odgovarajući mod (oblik) prsline.*
- Kriterijum gustine elastičnog potencijala** ili S-kriterijum koji je razradio G. C. Sih [42 i 43]. Prema ovom kriterijumu potrebno je da se odredi potencijal elastične deformacije na konturnoj površi prsline proizvoljnog oblika u prostoru i provere pretpostavke za njegovu primenu: da širenje prsline počinje od njenog vrha u radialnom pravcu za koji je gustina elastičnog potencijala minimalna i dosegla nivo S_c .
- Cottrell-Rajsov kriterijum propagacije zakrivljene prsline** (1980, [14 i 15]) je zasnovan na metodi određivanja faktora intenziteta napona na vrhu *krilne* prsline u funkciji faktora intenziteta napona glavne (osnovne) prsline. O **propagaciji prsline i pojavi krilnih prsline** po ovoj metodi se zaključuje na osnovu granične vrednosti napona pri kome dolazi do pojave krivljenja prsline. Na osnovu izraza za graničnu vrednost napona, s pouzdanošću se tvrdi da je raspored prsline haotičan i da će se prvo kriviti prsline najveće dužine.
- U okviru ovih kriterijuma treba pomenuti **metodu maksimalnog stepena površinski oslobodene energije** na konturnim površima prsline u okolini vrha prsline koju je dao C.N.Wu, [16].

Globalni kriterijumi loma se zasnivaju na kritičnom uzajamnom dejstvu lokalnog stanja napona u telu u okolini prsline i globalnog stanja napona. Jedan od globalnih kriterijuma loma je kritičan slučaj kada se prsline javlja duž linije (trajektorije) jednog od glavnih napona veće vrednosti, a propagacija vrha prsline ide duž te trajektorije, pri čemu je tangenta linije prsline na njenom vrhu ista s tangentom na trajektoriju glavnog napona u toj tački. Iz takvog odnosa globalnog stanja napona i lokalnog stanja napona u okolini prsline mogu da se izdvoje dva slučaja kojima se definišu **dva globalna kriterijuma loma**:

- Putanja prsline se javlja **duž trajektorija glavnih napona** i u slučaju naglog dinamičkog porasta intenziteta opterećenja, rast prsline se aktivira i dolazi do loma. Ovo je primer globalnog kriterijuma u odnosu na stanje napona koje nije poremećeno rastom prsline.
- Prsline raste duž takve trajektorije glavnog napona, pri čemu je uzeto u obzir **da linija glavnog napona ima zajedničku tangentu s linijom prsline na njenom vrhu** i, kada dostigne neku kritičnu vrednost, dolazi do loma.

Pojam **aproksimativna metoda** znači da se radi o nekoj približnoj metodi čijom primenom se određuje približno (aproksimativno) rešenje koje ima osobinu da pri promeni nekog parametra ka nekoj graničnoj vrednosti teži tačnom rešenju problema. Aproximativna **asimptotska metoda** daje približna rešenja, koja asimptotski teže tačnom rešenju zadatka, koji je postavljen sa izabranim parametrom "neporemećen" sistem. Asimptotski karakter rešenja znači da se fenomenološki može da napravi analogija procesa asimptotskog približavanja sa asimptotskim procesom približavanja krive (funkcije) i njene asimptote (ili asimptotske krive) kojoj se ona približava kada nezavisna promenljiva teži nekoj konačnoj ili beskonačnoj vrednosti, ili nuli. U mehanici loma **asimptotske metode se koriste za određivanje faktora intenziteta napona K_I** , preko relacija koje opisuju raspored napona u bliskoj okolini vrha prsline. Ukoliko rešenje daje pouzdane podatke o veličinama napona i pomeranju tačke (r, θ) koja se nalazi u neposrednoj okolini vrha prsline, onda K_I može da se izračuna pomoću relacija:
$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi r}}{f_{ij}(\theta)} \sigma_{ij} \quad i$$

$$K_I = \frac{2\mu\sqrt{2\pi}}{F_i(\theta)\sqrt{r}} u_i. \quad \text{U prvim primenama MKE u mehanici}$$

loma bilo je pokušaja da se bez primene specijalnih konačnih elemenata u okolini prsline, a posebno u okolini vrha prsline, iskoriste asimptotske metode za određivanje faktora intenziteta napona, pri čemu su dobijeni rezultati s velikom greškom. Kako se naponi najčešće određuju pomoću konstitutivnih relacija (jednačina) u kojima se dilatacije i klizanja određuju diferenciranjem koordinata vektora pomeranja, to su asimptotske metode u mehanici loma, skoro uvek, zasnovane na pomeranjima radi poboljšanja tačnosti asimptotskih aproksimacija rešenja [9 i 10].

Disipativni kriterijum loma se koristi kod problema pojave prsline pod uslovima stabilnog puzanja materijala. Za taj slučaj Kachanov, L.M., Landes, J.D. i Begley, J.A. su predložili da se koristi količina oslobodene energije po jedinici dužine napredovanja prsline, definisana invarijantnim integralom $J^* = -\frac{dD}{dl}$, gde je ukupna mera

disipacije energije tela data relacijom:
$$D = \int LdV - \int T_i \cdot v_i \cdot dS_r \quad [13].$$
 Vreme napredovanja (propagacije) prsline za jedinicu dužine je inverzno proporcionalno meri \dot{l} - brzini promene dužine prsline.

Odnos J^*/\dot{l} karakteriše akumulaciju energije disipacije na vrhu prsline. Pretpostavka je da se lom javlja pri izvesnom određenom nivou disipacije, koji predstavlja konstantu za određeni materijal. Disipativni kriterijum loma može da se napiše u obliku $\dot{l} = c \cdot J^*$, gde je c konstanta na određenoj temperaturi i određuje se eksperimentom na epruveti s konstruktivnom prslinom [10].

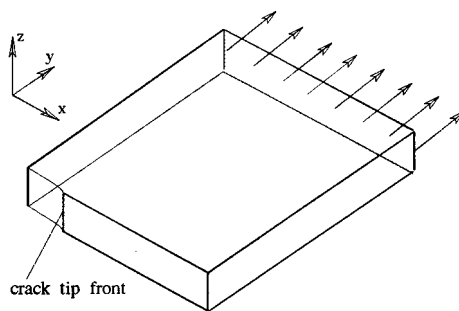
Sa stanovišta termodinamike Chudnovsky [13] je predložio **entropijski kriterijum loma**. Kod loma, gustina entropije dostiže kritičnu vrednost $s = s^*$. Kritična vrednost s^* , gustine entropije može da se smatra materijalnom konstantom koja zavisi od tipa loma i vrste materijala. Korišćenjem entropijskog kriterijuma, moguće je analizirati ne samo mehaničke faktore, već i opšte fizičke i hemijske, koji utiču na proces loma [9,10,13].

Riceov konturni integral J izveden je 1968. godine.

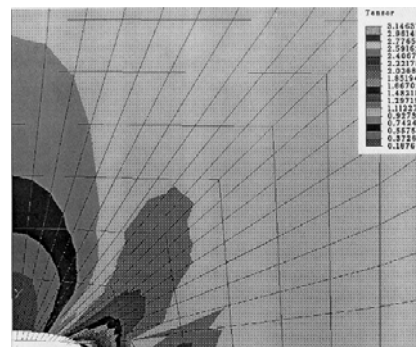
Izveo ga je Rice i potpuno razjasnio njegove osobine i primenio u mehanici loma. Ranija primena ovog integrala može da se nađe u radovima J.D.Eshelbyja (1958) [9,14,15,36,43], Sandersa (1960) i Cherepanova (1969). Vrednosti J -integrala za različite slučajeve ploča, naprezanja i konstruktivnih prslina su određene i mogu da se nađu u tablicama i priložima monografija iz ove oblasti. U [29,30,47] su dati prilozi određivanju stanja napona i stanja deformacija u okolini vrha prsline piezomaterijala - materijala s dejstvom spregnutih polja.

Lokalno stanje napona u okolini vrha prsline je trodimenzionalno i ilustrovano je na slikama 10 a*,b*,c* i d*. Eksperimentalni rezultati [28,48,49] kao i analiza metodom konačnih elemenata pokazuje da je ovaj zaključak tačan.

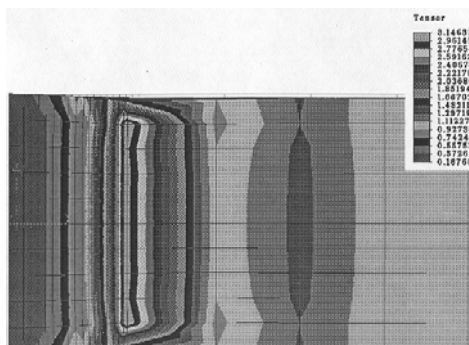
Za slučaj prsline eliptičnog početnog oblika u



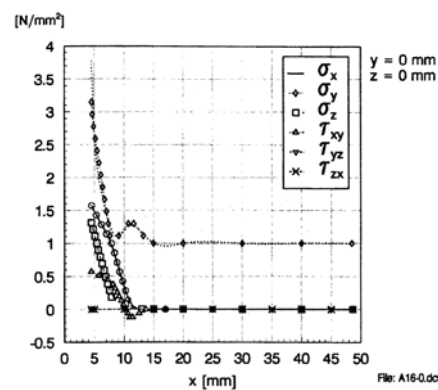
a)



b)



c)



d)

Slika 10 a* i b*- stanje normalnih napona u tačkama srednje ravni ploče za poprečne preseke paralelne prsline napregnute ploče na zatezanje u pravcu poprečno na prslinu, dobijeno metodom MKE, c*- stanje normalnih napona u tačkama ravni u pravcu ploče, za tu ravan napregnute ploče na zatezanje u pravcu poprečno na prslinu, dobijeno metodom MKE i d*- grafički prikazi promene komponentnih normalnih i tangencijalnih napona za tačke na pravcu prsline u srednjoj ravni ploče

napregnutoj tankoj ploči na zatezanje u pravcu poprečnom na ravan prsline, koja je prikazana na sl.10 a*, dobijen je raspored normalnog napona σ_y u tačkama u središnjoj ravni ploče $z = 0$, kao što je prikazano na sl.10 b*. Na toj slici je prikazano stanje normalnih napona σ_y u tačkama srednje ravni ploče za poprečne preseke paralelne prslini napregnute ploče, a dobijeno metodom MKE.

Na sl.10 c* je prikazan raspored normalnog komponentnog napona σ_y u tačkama poprečnog preseka ploče, i u ravni $y = 0$ za tu ravan. Na toj slici je dat grafički prikaz stanja normalnih napona σ_y u tačkama ravni u pravcu sred-nje ravni prsline ploče, za tu ravan napregnute

ploče na zatezanje u pravcu poprečno na prslinu, isto dobijeno metodom MKE.

U tačkama ispred vrha prsline na pravcu $y = 0$, $z = 0$ na sl.10 c* prikazan je raspored komponentnih, normalnih i smičućih napona σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} i τ_{zx} odgovarajućim dijagramima.

Analizom rasporeda i stanja napona u tačkama i ravnima s normalama u pravcima koordinatnih osa i za ravni paralelne prslini, vidi se da je stanje napona u tačkama u neposrednoj okolini vrha prsline trodimenzionalno, a da je u tačkama koje su dalje od vrha prsline u ostatku ploče stanje napona skoro ravno i naponi su paralelni srednjoj ravni ploče. U ovom slučaju stanje napona u tačkama ploče se ne menja promenom koordinate z .

Potvrda teorijskih rezultata mehanike loma se nalazi u

eksperimentalnim radovima koji mogu da se nađu npr. u referencama [22,28,48-53].

Zaključak

Ako je u pitanju **industrijski rizik**, onda parametri dinamičkog sistema obuhvataju veliki broj podsistema za čije **modeliranje su potrebna različita znanja i kontrole kvaliteta**, kako u procesu rada, proizvodnje, tako i eksploatacije. Na primer, kao podsistem može da se javi inženjerski sistem za koji se određuju parametri rizika kroz stabilnost i lom. Zato je posebno potrebno primeniti saznanja **nelinearnih dinamičkih sistema, nelinearne mehanike i teorije stabilnosti, mehanike loma, fizike materijala i eksperimentalne mehanike**. Ako se radi o mašini kojom upravlja radnik, inženjerskom sistemu treba

dati biološki dinamički sistem u interakciji s tehničkim sistemom. **Fenomenološko preslikavanje** oba sistema u jedinstven sistem s većim brojem stepeni slobode kretanja i ispitivanje takvog sistema na stabilnost i lom donosi **nove kriterijume rizika**, koji bi sada bili **globalnog nivoa**, u odnosu na **kriterijume lokalnog rizika** za svaki od dinamičkih pod sistema. **Akumulacija predznaka rizika** na globalnom planu rađa nove fenomene, koji postaju relevantni za utvrđivanje kriterijuma rizika. Ako prethodnim dinamičkim sistemima dodamo i društvenoekonomski sistem sa svojim kriterijumima rizika, proučavamo kriterijume globalnog rizika sistema. Uopštavanja i fenomenološka preslikavanja nas vode ka još složenijim dinamičkim sistemima s većim brojem parametara sistema, većim brojem stepeni slobode dinamike takvog sistema. Za globalni sistem, kao i za svaki od pod sistema, može da se primeni i sinergijska teorija upravljanja dinamičkim sistemom, kao i parametrizacija rizika. Savremena saznanja o upravljanju takvim sistemima upućuju nas na to da takvi sistemi poseduju i svojstva **samoorganizacije** i da poseduju **invarijante** ili adijabatske invarijante na osnovu kojih možemo graditi i kriterijume zaštite od rizika. Na primer, javljaju se invarijante stanja napona, invarijante stanja deformacija, adijabatske invarijante dinamičkih procesa, invarijantni J integrali i sl.

Stabilna dinamika sistema je moguća samo u zoni **adaptacionog maksimuma** što je izvodljivo i za biološke, socijalno-ekonomske, i fizičko-hemijske sisteme. Radi povećanja stepena bezopasnosti sistema i zaštite od rizika, globalni sistem i njegov pod sistem moraju da se nalaze u oblasti adaptacionog maksimuma ([6] i ostale navedene reference).

U takvim sistemima **atraktori (sinergije)** formiraju unutrašnje dinamičke veze, a kao rezultat se u faznom prostoru sistema javlja **koherentno kolektivno kretanje**. To dozvoljava realizovanje stabilne dinamike u ciljnu (usmerenu) samoorganizaciju kolektivnog stanja u dinamičkim sistemima različite prirode. Ta svojstva mogu da budu upotrebljena za **programiranje zaštite od rizika pojave određenih neželjenih dinamika**.

U razvijenom sinergetičkom prilazu sintetizuju se zakoni upravljanja, koji uzimaju u obzir unutrašnja kooperativna uzajamna dejstva konkretnih fizičkih (hemijskih, bioloških) pojava i procesa. Taj prilaz dozvoljava suštinski pomak u rešavanju fundamentalnih primenjenih problema postavljanja fizičkih (hemijskih, bioloških, socijalno-ekonomskih) teorija upravljanja, kao problema traženja opštih objektivnih zakona procesa upravljanja pojavom rizika. Uvedeni jezik **invarijanti**, kao osnovni element sinergijske teorije upravljanja, dozvoljava pridruživanje **toj teoriji prirodno-ma-tematičkog jedinstva** i ustanovljavanje neposrednih veza sa **zakonima očuvanja uslova zaštite od rizika**.

Pojam rizik se definiše i kao izvesna **mogućnost naglog gubitka stabilnosti sistema**, kao sigurna mogućnost sistema i izvesnost koja **vodi rušenju i razaranju sistema**, kao izvesna mogućnost **nagle promene parametara stanja sistema** koja dovodi do nekontrolisanog rasta ili opadanja pojedinih parametara sistema, kao izvesna mogućnost **gubitka sposobnosti upravljanja sistemom**. Da bismo unapred mogli da prepoznamo puteve promene kinetičkih parametara sistema koji vode do izvesnosti realizacije rizičnih stanja dinamičkog sistema, bez obzira da li se radi o svojstvima tehničko-tehnološkog sistema, biološkog sistema, ekološkog sistema u interakciji s čovekom i industrijskim objektima, ekonomskog i društvenog sistema,

potrebno je poznavati nelinearne fenomene u dinamičkim sistemima s mogućim svojstvima stohastičnosti i haotičnosti, kao i mehanizme upravljanja njima.

Matematički postavljena i izražena definicija rizika zadržavajući se u okvirima proučavnog sistema, glasi: **Kriterijum rizika od loma** sadrži sledeće uslove: **da prslina u materijalu ne napreduje**, da sistem **nije u frekventnom opsegu rezonantne oblasti u kojoj su mogući rezonantni skokovi**, da sistem **nije u oblasti nestabilnog položaja dinamičke ravnoteže**, odnosno, da se sistem ne izvede iz oblasti moguće **upravljivosti sistemom**.

U najnovije vreme u literaturi mogu da se nađu prikazi rezultata istraživanja **dinamike i upravljanja oscilacijamaktivnih struktura** [59-60], a u praksi pojedinačni primeri izvedenih **aktivnih konstrukcija** (na primer mostova, zgrada, letelica) sa ciljem zaštite sistema od stvaranja uslova povećanog rizika. Takođe, naučna otkrića i inženjerska praksa nas vode do saznanja o postojanju **dinamički aktivnih i pasivnih materijala, materijala sa naslednim svojstvima** [61] i **materijala sa spregnutim poljima**. Sve više se govori o **integritetu konstrukcija** i izučavanju osnovnih parametara stanja **aktivnih i pasivnih konstrukcija** sa **samoorganizacijom** i sposobnošću za „**samopreživljavanje**” sistema i njegove strukture. Sva ta saznanja vode ka tome da se sistem može, od procesa projektovanja i konstruisanja pa do njegove realizacije, stvarati kao aktivni sistem sa sposobnošću „**aktivne samozaštite od rizika**” i sposobnošću „**samoorganizacije**” i „**samopodešavanja**” parametara stanja dinamika, stabilnosti struktura radi izvođenja sistema iz oblasti parametara sistema sa povećanim rizikom. Značajna su dostignuća koja omogućavaju **upravljanje nelinearnim oscilacijama struktura aktivnih konstrukcija** i izvođenja sistema iz oblasti nestabilnosti uključivanjem u dinamiku pod sistema sa sensorima i aktuatorima [62] koji menjaju parametre stanja sistema i uklanjaju predznake preopterećenja elemenata, nestabilnosti ili nagomilavanje oštećenja i napredovanja i grananja prslina. U te svrhe se koriste **girostabilizatori** na bazi poznavanja njihove dinamike i oscilacija poremećaja [64], **aktivne konzole grede, aktivne ploče sa piezokeramičkim folijama, aktivni skupovi specijalne namene, zatege s aktivnim elementima** i sl. Isto tako, zaštita od rizika može da se ostvari i projektovanjem aktivnog sistema vibroizolacije [63] struktura konstrukcije (dinamike sistema). I na kraju, svakako treba naglasiti, da se preventiva usmerena na zaštitu od rizika dinamika koje vode katastrofi sistema (disparatnih priroda) sastoji u projektovanju istih kao aktivnih struktura, sa mogućnošću samostabilizacije dinamika i smanjenja osetljivosti na promene kinetičkih parametara.

Literatura

- [1] HEDRIH (STEVANOVIĆ), K. *Fenomeni nelinearnih dinamičkih procesa, mehanika loma i rizik. Nelinearne nauke na Razmedji milenijuma*. plenarno predavanje, 1999, XXIV međunarodni skup o zaštiti radne i životne sredine, Osnovna pitanja međunarodne saradnje u zaštiti od industrijskog rizika, Institut "I.MAJ", Niš.
- [2] ARNOLD, V.I. *Catastrophe Theory*. Springer Verlag, (1937, 1984, 1986), p.110.
- [3] GUCKENHEIMER, J., HOLMES, Ph. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Fields*. Springer-Verlag, (1983), p.461.
- [4] HOLMES, Ph. *Nonlinear Oscillations and the Smale Horseshoe Map*, Proceedings of Symposium in Applied Mathematics, Amerikan Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 1989, vol.39, p.25-

- 39.
- [5] DEVANEY,L.R. *An Inreoduction to Chaotic Dynamical Systems*. Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City, Inc., (1989), p.336.
- [6] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. Međunarodna konferencija: "Nelinearne nauke na Razmeđu milenijuma", Saint Petersburg, Naučnotehnički pregled, 1999, XLIX, no.2, p.64-66.
- [7] BELIĆ,M.R. *Deterministički haos*, Institut za teorijsku fiziku, Beograd, Sveske fizičkih nauka, 1990, p.187.
- [8] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. i PRAŠČEVIĆ,M. *Determinističke haotične oscilacije u dinamici inženjerskih sistema*, Separat Zbornika radova Fakulteta zaštite na radu, X naučni skup, Čovek i radna sredina, Preventivni inženjering i informacione tehnologije, Niš. (1994), p.1-17.
- [9] BROEK DAVID *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, 1982.
- [10] CARPINTERI,A. *Mechanical Damage and Crack Growth in Concrete*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986.
- [11] GDOUTOS,E.E. *Fracture Mechanics, An Introduction*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993.
- [12] IRWIN,G.R. *Analysis of Stress and Strains nier The End of a Crack Transversing Plate*, Transactions ASME, Journal of Applied Mechanics, (1957), vol.24, p.361.
- [13] KACHANOV,L.M. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986.
- [14] PARIS,P.C., ERDOGAN,F. *A Critical Analysis of Crack Propagation Laws*, *Journal Basic Engineering*, (1963), no 85, p.528-534.
- [15] PARTON,V.Z., MOROZOV,E.M. *Mechanics of Elasto-Plastic Fracture*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1989.
- [16] WU,C.N. Explicit Asymptotic Solution for the Maximum-Energy Realise Rate Problems. *Solids and Structures*, 1979, no.15, p.561.
- [17] PETROVIĆ,M. *Fenomenološko preslikavanje*, Matematička fenomenologija, Sabrana dela 6 tom, Zavod za udžbenike, Beograd (1933,1999), str.1-33.
- [18] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Analogy between models of stress state, strain state and state of moment inertia mass of body. Facta Unversitatis, Series "Mechanics, Automatic Control and Robotics"*, Niš, 1991, vol.1, n.1, p.105-120.
- [19] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. Analogije modela stanja napona, stanja deformacije i stanja momenata inercije mase tela. *Tehnika*. Beograd, 1995, no.6.
- [20] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Same vectorial interpretations of the kinetic parameters of solid material lines*, *ZAMM. Angew.Math. Mech.* (1993), 73, 4-5, T153-T156.
- [21] BLEKHMANN,I.I. *Chto možet vibraciya?*, Nauka, Moskva, (1988), p.208.
- [22] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. Izabrana poglavlja teorije elastičnosti, Mašinski fakultet, Niš, 1988.
- [23] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. On one of the kinetic models of the rotor of exchangeable mass. *Facta Unversitatis, Series Mechanical Engineering*, 1995, vol.1, no.2, p.185-208.
- [24] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. Interpretation of the motion of a heavy body around a stationary axis in the field with turbulent damping and kinetic pressures on bearing by means of the mass moment vector for the pole and the axis. *Facta Unversitatis, Series "Mechanics, Automatic Control and Robotics"*, Niš, 1994, vol.1,no.4, p.519-538.
- [25] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Interpretation of the motion of a heavy body around a stationary axis and kinetic pressures on bearing by means of the mass moment vector for the pole and the axis. Theoretical and Applied Mechanics*, Beograd, 1994, no.20, p.69-87.
- [26] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Interpretation of the Motion Equations of a variable mass object rotating around a atationary axis by means of the mass moment vector for the pole and the axis*, Proceedings of the 4th Greek National Congress on Mechanics, Mechanics of Solids, Democritus University of Thrace, Xanthi, 1995, vol.1, p.690-696.
- [27] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *The power of the rheonomic constraints shange*, Zbornik radova JDM, Simpozijum iz opšte mehanike, Novi Sad, 1994, p.177-185. (serbian)
- [28] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K., JOVANOVIĆ,D. The stress state of the elliptical-annular plate by the complex variable function and conformal mapping method. *Theoretical and Applied Mechanics*, Beograd, 1991, no.17, p.73-87.
- [29] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K., PERIĆ,LJ. Stanje napona i stanje deformacija u piezoelektričnom materijalu u okolini vrha prsline za slučaj ravne deformacije. *Tehnika*, Mašinstvo, 1996, vol.3-4, no.45, p.M50-M56.
- [30] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. PERIĆ,LJ., Stanje napona i stanje deformacija u piezoelektričnom materijalu u okolini vrha prsline za slučaj smicanja izvan referentne ravni, *Tehnika, Mašinstvo*, (1997), no.46, vol.5-6, p.M11-M16.
- [31] *Chaoc and fractals, The Mathematics Behind the Computer Graphics*. Editors, Robert L. Devaney and Linda Keen, Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, American, Mathematical Society, Providence Rhode Island, 1988, vol.39, p.147.
- [32] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Haos I faktali*, (Chaos and fractals), *Tehnika*, Opšti deo, 1993, XLVIII, vol.48, no.4, p.TO13-TO24.
- [33] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K., PAVLOV,B. *Stange attractors of the phase portrait of motion of a heavy material point along the circle with an oscillating center and under the influence of two frequency couple*, Proceedings of the 2nd International Conference on nonlinear Mechanics, Beijing 1993, Peking University Press, ICNM-2, 1993. Apstract 514, p.938-944.
- [34] SCHUSTER,H.G. *Deterministic Chaos, An Introduction*.VCH., 1989, p.270.
- [35] *Vibracii u tehnike*, tom 5, Mašinstroenie, Moskva, 1981, p.496.
- [36] ŠUMARIC,D., KRAJČINOVIĆ,D. *Osnove mehanike loma*, Naučna knjiga, Beograd, 1990, str.262.
- [37] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Neka osnovna, glavna i aktuelna pitanja istraživanja nelinearnih i haotičnih procesa u nelinearnoj mehanici kroz pregled pojmova, fenomena i metoda*, Zbornik Građevinskog fakulteta u Nišu, (1989-1992), p.203-209.
- [38] MITROPOLSKI,YU.A. *Metod usrednyenia v nalinynyoy mehanike*, Naukova Dumka, Kiev, 1971, p.340.
- [39] Projekat: *Nelinearni deterministički i stohastički procesi u dinamičkim sistemima sa primenama u mašinstvu*, Republički fond za nauku - Srbija, rukovodilac K.Hedrih, koordinator Mašinski fakultet Niš, (1990-1995), p.500.
- [40] *Nenlinear Science on the Border of Mileniums*, dedicated to 275 th anniversary of Russian Academy of Sciences, Sankt Petersburg, 1999, p.127.
- [41] COTTERLL,B., RICE,J.R. Slightly curved or kirked cracks. *Int.Jour.of Fracture*, 1980, no.16, p.155.
- [42] ERDOGAN,F., SIH,G.C. On the Crack Extension in Plates Loading and Transfere Shear. *Journal of Basic Engineering*, 1963, vol.84, n.84, p.519-527.
- [43] SIH,G.C. *A Special Theory of Crack Propagation*, Mechanics of Fracture I, Nordhoff. 1973.
- [44] SEDMAK,S. *Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma*. Smederevska Palanka, 1980.
- [45] SEDMAK,S. *Perspektive razvoja i primene mehanike loma*, Međunarodna letnja škola Dubrovnik, 1986.
- [46] IOSILEVIĆ,G.B. *Koncentracija napržeženy i deormaciy v detaljah mašin*. Mašinstroenie, Moskva, 1981.
- [47] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K., PERIĆ,LJ. Application of the complex varable function to crack problem in the peizelectric materijal. *Theortical and Applied Mechanics*, Beograd, 1992, no.18.
- [48] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K., JECIĆ,S., JOVANOVIĆ,D. *Glavni naponi u tačkama konture eliptično-prstenaste ploče ravno napregnute parovima koncentrisanih sila*. *Tehnika, Mašinstvo*, Beograd, 1990, br.39, no.11-12.
- [49] PINDER,J.T., JODEPSON,J., JOVANOVIĆ,D.B. Electronic Techniques in Isodyne Stress Analysis. *Experimental Mechanics*, March 1997, vol.37, no.1 and no.2, p.33-38.
- [50] BRČIĆ,V., ČUKIĆ,R. *Ekaperimentalne metode u projektovanju konstrukcija*. Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [51] FOPPL,L., MONCH,E. *Practiche Spannungsoptic*, Springer, Berlin, 1950.
- [52] FROCHT,M. *Photoelasticity*, John Wiley & Sons, New York, 1949,vol.II.
- [53] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K., JOVANOVIĆ,D. *Optičke eksperimentalne metode u ispitivanju i projektovanju konstrukcija*, IRMES, Mašinski fakultet Niš, 1995, p.
- [54] HEDRIH(STEVANOVIĆ),K. *Izabrana poglavlja teorije nelinearnih oscilacija*, Niš, (1975-1977), str.180.
- [55] IUTAM Symposium *Nonlineariry and Chaos in Engineering Dynamics*, Universtiy College Lnodon, July 1993, 19-23, p.105.
- [56] MOON,C.M. *Chaotic Vibrations, An Introduction for Applied*

- Scientists and Engineers*, John Wiley & Sons, New York, 1987, 309.
- [57] RAŠKOVIĆ, D. *Teorija oscilacija*, Naučna knjiga, 1965, p.503.
- [58] STOKER, J.J. *Nonlinear Vibrations*. Interscience Publishers, New York, 1950, p.273.
- [59] PREUMONT, A. *Vibration Control of Active Structure*. Cluwr Academic Publisher, 1997.
- [60] Proceedings: *Int Conference: Control Oscillations and Chaos*. Edited by Felix Chernousko, Sainkt Petersburg, 2000.
- [61] GOROŠKO, O.A., HEDRIH (STEVANOVIĆ) K. *Analitička dinamika diskretnih naslednih sistema*. Univerzitet u Nišu, 2000-2001, p.428.
- [62] BARAUSKAS, R.A., KLIVETIS, G.P., PAGULYSKIS, K.M. *Rasčit i projektirovaniye vibrodvigatelyej*. Mašinstroenije, 1984.
- [63] RIBAK, L.A., SINJEV, A.V., PAŠKOV, A.I. *Sintez aktivnih sistem vibroizolacii na kosmičeskikh objektah*. Moskva, 1997.
- [64] HEDRIH (STEVANOVIĆ) K. *The Vector Method of the Heavy Rotor Kinetic Parameter Analysis and Nonlinear Dynamics*. Univerzitet u Nišu, 2001, p.250.

Rad primljen: 22.2.2000.god.

