

RAZVOJ MODELA DIJAGNOSTIKE HIDRAULIČNIH SISTEMA NA ŽELEZNIČKIM VOZILIMA

Darko Stjepanović¹ Svetozar Bugarin² Zoran Stjepanović³ Veljko Vuković⁴ Živoslav Adamović⁵

Rezime: U radu se analizira proces funkcionisanja hidrauličnih sistema uz mogućnost razvoja modela dijagnostike njihovog tehničkog. Prikazani su mogući modeli koji su univerzalni i mogu se primeniti za sve hidraulične komponente i sisteme, posebno na železničkim vozilima.

Cljučne reči: Vibroakustički model, model sistema (ulaza i izlaza), parametarski model, model zamora, model akumulisane energije, model strukturnog lanca.

DEVELOPMENT OF THE DIAGNOSTIC MODEL OF HYDRAULIC SYSTEMS ON RAILWAY VEHICLES

Abstract: The paper analyzes the process of functioning of hydraulic systems with the possibility of developing a model of their technical diagnostics. Possible models are shown that are universal and can be applied to all hydraulic components and systems, especially on railway vehicles.

Keywords: Vibroacoustic model, system model (input and output), parametric model, fatigue model, accumulated energy model, structural chain model.

1. UVOD

Na hidraulične sisteme vrlo često deluju različite vrste otkaza te se zato pojavljuju odstupanja tehničkih parametara od nominalnih i dozvoljenih odstupanja. Zbog toga je, u cilju održavanja što višeg nivoa pouzdanosti u procesu funkcionisanja hidrauličnih sistema, neophodno ustanoviti različite modele dijagnostike.

Za utvrđivanje osobina tehničkog stanja hidrauličnih sistema moguće je razviti više modela uzimajući u obzir uzročno-posledične veze slučajnih pojava. Zato su u ovom radu razvijeni sledeći modeli dijagnostike:

- model sistema (ulaza i izlaza),
- model na bazi vibracija i buke,
- parametarski model,
- model zamora,
- model akumulisane energije,
- model strukturnog lanca.

2. RAZVOJ MODELA DIJAGNOSTIKE HIDRAULIČNIH SISTEMA NA ŽELEZNIČKIM VOZILIMA

2.1. Model vibracija i buke (vibroakustični model)

Vibracija i buka (šum) stvaraju se u elementima instalacije, pa nose korisnu informaciju o njenom tehničkom stanju. Vibracija i buka (šum) predstavljaju nepravilne harmonijske oscilacije sa određenom periodnošću. Vibracija predstavlja spektar oscilacija sa različitim frekvencijama i amplitudama. U tom slučaju osobina stanja može biti raspodela energije oscilacija prema

¹ Msc Darko Stjepanović, Evropski univerzitet, Brčko, BIH, darko_s29@hotmail.com

² Mr Svetozar Bugarin, Evropski univerzitet, Brčko, BIH, bugarin_svetozar@yahoo.com

³ Mr Zoran Stjepanović, Evropski univerzitet, Brčko, BIH, stjepanovicz@hotmail.com

⁴ Prof. dr Veljko Vuković, Evropski univerzitet, Brčko, BIH, v.velja@gmail.com

⁵ Prof. dr Živoslav Adamović, Evropski univerzitet, Brčko, BIH, zivoslav.adamovic@gmail.com

frekvencijama. Energetski oblik slučajnog oscilatornog signala opisuje se Furijerovim integralom [3]- [6]-[7]-[8].

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

gde je $y(t)$ – slučajni oscilatorni signal u funkciji vremena; $F(j\omega)$ – prikazivanje vremenskog slučajnog signala na kompleksnoj površini (ravni), ω – frekvencija oscilacije. Srednja snaga, se dobija deljenjem energije na interval vremena posmatranja T ; tada je [3]-[4]:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |F(j\omega)|^2 d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)|^2 dt, \quad (2)$$

gde je $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |F(j\omega)|^2 d\omega = S(\omega)$ – spektralna gustina slučajnog signala (srednja snaga slučajnog procesa $y(t)$ u intervalu frekvencija ω).

Registrowanje buke omogućava da se vrše brza merenja u prirodnim uslovima rada sistema. Energetska karakteristika buke je intenzitet ili jačina zvuka koja se određuje količinom energije koja se prenosi zvučnim talasom za 1 s kroz površinu od 1 m² [3]-[4]:

$$J = \frac{p^2}{2\rho c} = Ap^2 = Bv^2 \quad (3)$$

gde su A i B – konstatni koeficijenti; p – pritisak sredine; v – brzina prenošenja čestica sredine; ρ – gustina sredine; c – brzina zvuka u sredini. U svojstvu dijagnostičkog signala uzima se srednji intenzitet zvuka [3]-[5]:

$$J_{sr} = \frac{A}{T} \int_0^T p^2 dt = \frac{B}{T} \int_0^T v^2 dt \quad (4)$$

Veličina J_{sr} meri se ultrazvučnom sondom i pretvara se u električni signal. Upoređivanje informacijskih svojstava buke i vibracije agregata hidraulične instalacije pokazuje da se statistička frekvetna svojstva akustičnih i vibracionih signala, po pravilu, podudaraju. Uopštena karakteristika vibroakustičnih pojava kao slučajnih spektara oscilovanja sa različitim frekvencijama i amplitudom je korelaciona funkcija, koja određuje uzajamnu vezu oscilovanja u različitim momentima vremena [1]-[3]-[6]:

$$R_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t+\tau)dt, \quad (5)$$

gde je T – period procesa koji se razmatra; τ – vremensko pomeranje.

Amplituda korelacione funkcije pri $\tau=T$ proporcionalna odnosu snage periodične komponente prema zajedničkoj snazi signala karakteriše intenzitet impulsa (udara) u hidročvoru.

2.2. Sistemski model (model sistema – ulaza i izlaza)

Hidraulički sistem se može razmatrati kao pretvarač ulaznih fizičkih veličina z_j , u izlazne veličine y_i . Takvo pretvaranje zapisuje se u obliku

$$Y = AZ \quad (6)$$

Gde su: Z i Y – vektori ulaznih i izlaznih promenljivih; A – operator pretvaranja vektora. Hidraulična instalacija je nelinearan sistem zbog postojanja elemenata sa trenjem, zasićenošću, otporom, multiplikovanim vezama i dr. Stoga njegov dijagnostički model predstavlja sistem diferencijalnih jednačina koji opisuju funkcionisanje agregata u koordinatama vremena – parametre, koje karakterišu radni proces i početne neispravnosti [16].

Za dijagnostikovanje stanja instalacije neophodno je znati karakter promene izlaznih parametara y_i pri različitim karakteristikama z_j početnih neispravnosti i izabrati od njih determinante. Reakciju instalacije, tj. Promenu njenih parametara pri različitim situacijama,

možemo odrediti rešenjem diferencijalnih jednačina koje opisuju funkcionisanje instalacije pri postojanju početnih neispravnosti.

Kod izbora osobina sastavlja se matematički model funkcionisanja instalacije u vidu sistema determinisanih jednačina koje opisuju procese u elementima i njihove uzajamne veze, a takođe i zavisnosti parametara instalacije od početnih neispravnosti. Model ima sledeći oblik [4]-[5]-[8]:

$$\sum_{i=1}^n Y_i \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, A \right) = F_i(t, \tau, Z, x), \quad (7)$$

gde su $Y()$ – vektor funkcija vremena koji karakteriše instalacije; Z – vektor funkcija vremena koji karakteriše spoljašnje i unutrašnje uticaje i početne neispravnosti; $F()$ – vektor nelinearne funkcije koji povezuje parametre instalacije sa početnim neispravnostima; t – moment vremena za koga se određuje stanje instalacije; τ – tekući moment vremena.

Postavivši tipske funkcije z_D početnih neispravnosti i rešavajući sistem jednačina određuje se realizacija parametara $y_i(t)$, koji odgovaraju svakom stanju. Neka je u procesu modeliranja dobijena analitička ili grafička veza parametara sa karakteristikama početne neispravnosti $y_i=f(z_i)$. Koeficijent osetljivosti određuje se zavisnošću [3]-[6]-[7]:

$$c_j = \frac{\partial y_i}{\partial z_i} \frac{z_j}{y_i} \quad (8)$$

Očigledno je, da što je veće c_j , to je pri manjim značenjima z_j veći gradijent parametara. Parametri pri kojima je $c_j=0$, ne sadrže informacije o stanju instalacije i nije poželjno da se odabiraju kao osobine. Za modeliranje stanja instalacije neophodno je imati opisivanje havarijskih stanja koje uključuje jednačine radno sposobnog stanja i jednačine početnih neispravnosti koje dovode do gubitka radno sposobnog stanja. Za izbor dijagnostičkih osobina, sve moguće neispravnosti objedinjuju se u grupe [4]-[5]-[8]:

Nehermetičnost različitih delova, koja dovodi do oticanja radne tečnosti. Oticanje se približno može uzeti u obzir relacijom $Q=Q_{i0} + Q_{iy}$, gde su: Q_i – raspoloživi utrošak (protok), tj. utrošak do mesta oticanja; Q_{i0} – potreban utrošak; Q_{iy} – oticanje. Oticanje se određuje prema jednačini lokalnog otpora [4]-[5]-[8].

$$Q_{iy} = \mu F_{Dr} \sqrt{\frac{2(p_j - p_i)}{\rho}} \text{sign}(p_j - p_i), \quad (9)$$

gde su: μF_{Dr} – otpor na nehermetičnom delu; p_j – pritisak pred ovim delom; p_i – pritisak sredine u kojoj se dešava oticanje.

Delimično prekrivanje (zapušenja) delova sistema dešava se zbog zaprljanja radne tečnosti ili lošeg kvaliteta njenog prečišćavanja i dr. uzroka. Ono se modelira sistemom jednačina koje opisuju promenu parametara koji određuju hidraulične gubitke μF , ζ , d .

Lomovi ili promene karakteristika elastičnih elemenata modeliraju se sistemom jednačina koje opisuju promenu koeficijenata čvrstoće u odgovarajućim jednačinama.

Brušenje (glačanje) i vezivanje (spajanje) pokretnih elemenata instalacija modeliraju se sistemom jednačina koje opisuju promenu sila trenja i momenata [16].

Principijelna šema instalacije razlaže se na tipske elemente i sklopove za koje se zapisuje sistem jednačina, čija struktura ima sledeći oblik [3]-[7]-[8]-[9]:

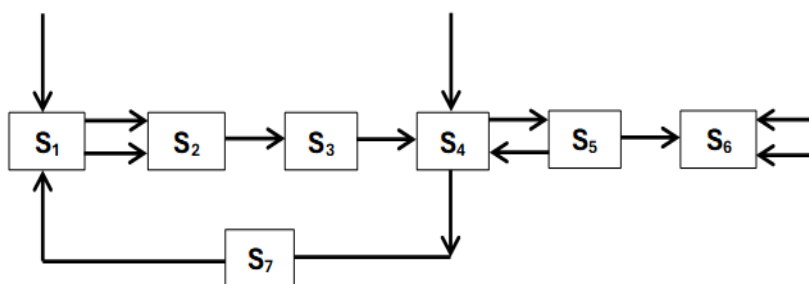
$$\dot{y}_1 = F_1(n, y_i, y_k, z); \quad (10)$$

$$\dot{y}_n = F_n(n, y_i, y_k, z),$$

gde su y_i i y_k – parametri (pritisak, utrošak, pomeranje i dr.) sklopova; n – dimenzija sistem; z – karakteristika početne neispravnosti. Kao rezultat analitičkog modeliranja za svaku neispravnost dobijaju se prelazne karakteristike, tj. promene parametara u vremenu pri skokovitoj promeni karaktersitikapočetne neispravnosti.

2.3. Model strukturnog lanca

Principijelna šema instalacije sa očuvanjem fizičke uzajamne zavisnosti radnih procesa u agregatima može se predstaviti u vidu strukturne šeme koja se sastoji od posebnih blokova S_i (pumpa, motor, regulator, filter itd.). Izlazak svakog bloka je vektor Z_i ($z_{i1}, z_{i2} \dots, z_{ij}$). Parametri z_{ij} karakterišu stanje hidoagregata ili stanje radne tečnosti na njegovom izlasku, tj. z_{ij} – to je pritisak, utrošak, temperatura, položaj izlazne karike (sastavnog dela), pomeranje i brzina, momenti itd. Ulazi svakog bloka S_i su vektori X_i i Y_i . Vektor X_i (x_{ij}) upravljačke (regulacione) uticaje, a vektor Y_i (y_{ij}) karakteriše stanje toka tečnosti na ulazu (za pumpe y_{ij} – to su parametri mehaničkog ili električnog izvora energije: snaga, frekvencija obrtanja i dr.). Prelazak od strukturne šeme hidraulične instalacije prema funkcionalnoj ostvaruje se putem razlaganja (deljenja) ulaska i izlaska blokova na komponente x_{ij} , y_{ij} , samih blokova S_i na S_{ij} u skladu sa promenljivim ulaskom i izlaskom i njihovo spajanje u funkcionalne nizove (lance) prema parametrima razlaganja (deljenja), u kojima izlazni parametar y_{ij} bloka S_{ij} postaje ulazni parametar $x_{(i+1)j}$ bloka $S_{(i+1)j}$. Kao rezultat takve izgradnje dobija se strukturno-funkcionalni model koji prikazuje prolazak toka energije i informacije u instalaciji. Razmotrićemo izgradnju strukturno-funkcionalnog modela hidrosistema koji je prikazan na slici 2. Razlaganje (deljenje) vektora izlaznih parametara blokova vršimo prema utrošku, pritisku i razlikama pritiska. U broj razlaganja (deljenja) mogu izlaziti i drugi parametri koji karakterišu stanje toka tečnosti na izlasku bloka [1]-[2]-[7].



Slika 1- Strukturna šema instalacije (model strukturnog lanca) S1 – hidrozervoar; S2 – pumpa; S3, S7 – filteri; S4 – razvodnik; S5 – hidromotor (hidraulični motor); S6 – objekat (organ upravljanja)

Za hidrozervoar S_1 razlagani (deljeni) parametar je nivo ulja u rezervoaru N_{rez} , za pumpu S_2 – pulsacija pritiska δp_p , za hidrozvodnik S_4 – nivo unutrašnjih oticanja Q_{ot} , za hidromotor (hidraulični motor), S_5 – pritisci p_1 i p_2 i utrošci Q i odgovarajućim šupljinama hidrocilindra, međušupljinska prelivanja tečnosti $Q_{o.c.}$, naprezanje na izlaznoj kretači R_{KR} i brzina njegovog pomeranja v_{KR} . Izlazni parametar sistema je brzina pomeranja ranog organa S_6 $v(t)$. Spoljšnji uticaji biće opterećenje R_{SO} i sila trenja R_{TR} , ugaona brzina vratila pogonskog motora ω_m i pomeranje razvodnika x_{raz} . Za nalaženje osobina tehničkog stanja neophodno je razmotriti različite

neispravnosti koje menjaju razlagani (deljeni) parametri, i prema strukturno-funkcionalnoj šemi utvrditi uticaj ovih neispravnosti na izlazne parametre sistema. Kao rezultat sastavljamo tabelu stanja sistema (tabela T-1). U tabeli znak >> + << označava da neispravnost agregata (bloka) može da bude razlog prelaska iz sistema ispravnog stanja u jedno od neispravnih stanja e_i , a znak >> - << pokazuje da tehničko stanje bloka nije povezano sa vrstom tehničkog stanja sistema. Izabrati i obrazložiti strukturu dijagnostičkih osobina moguće je pomoću izgradnje i analize tabela funkcije neispravnosti (tabela T-2), u kojima su po vertikali razmešteni izlazni parametri blokova strukturno-funkcionalne šeme sistema, a po horizontali – vrste tehničkog stanja prema tabeli T-1. Takvih minimalnih celokupnosti može biti nekoliko [1]-[2]-[3]-[4]-[5].

Tabela T-1- Stanja blokova funkcionalne šeme

Vrsta tehničkog stanja	Oznake	Agregati (blokovi funkcionalne šeme)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
Pritisak u potisnoj magistrali veći od dozvoljenog	e_1	-	+	-	-	-	-	-
Pritisak u potisnoj magistrali manji od dozvoljenog	e_2	-	+	-	-	-	-	-
Pritisak u izlivnoj magistrali veći od dozvoljenog	e_3	-	-	-	-	-	+	-
Napajanje pumpe manje od dozvoljenog	e_4	-	+	-	-	-	-	-
Spoljašnja nehermetičnost premašuje dozvoljenu	e_5	+	+	+	+	+	+	-
Unutrašnja nehermetičnost premašuje dozvoljenu	e_6	-	+	-	+	+	-	-
Pulsacija pritiska van pumpe	e_7	+	+	-	-	-	-	-
Nivo ulja u rezervoaru manji od dozvoljenog	e_8	+	-	-	-	-	-	-
Sila trenja u izlaznoj	e_9	-	-	-	-	+	+	-

kariki(spojenom delu) veća od dozvoljene								
Gubitak pritiska u hidroagregatima premašuje dozvoljeni	e_{10}	-	-	+	-	-	+	-

2.4. Model zamora

Elementi hidraulične instalacije u procesu eksploatacije rade u uslovima nestacioniranog režima opterećenja i na njih deluju opterećenja, koja se menjaju u vremenu. Višestruko opterećenje izaziva razaranje elemenata konstrukcije pri naprezanjima koji su manji nego pri jednokratnom opterećenju. Pod uticajem promenljivih naprezanja dešava se proces postepenog nagomilavanja oštećenja materijala, koji dovodi do nagomilavanja promene njegovih fizičko-hemijskih osobina, stvaranja pukotina i razaranja usled zamora [1]-[2]-[3]-[4].

Mikropukotine nastale usled zamora stvaraju se najčešće u mestima gde postoje koncentracije naprezanja (gde je velika koncentracija naprezanja, napona, tragovi od obrade alatom itd.)

Ciklus opterećenja karakteriše se maksimalnim σ_{max} , minimalnim σ_{min} i srednjim $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$ naprezanjima, amplitudom $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ i koeficijentom asimetrije ciklusa $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$. Uzimajući da je naprezanje može se opisati koristeći uvedene relacije. Tako, za simetrični ciklus imamo [1]-[2]-[3]-[4]:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_a; \quad \sigma_m = 0; \quad R = -\sigma_{min} / \sigma_{max} = -1 \quad (11)$$

Osnovni (glavni) pokazatelj koji karakteriše otpor materijala razaranju usled zamora, je granica izdržljivosti σ_{-1} pri izvijanju i τ_{-1} pri uvijanju. Pod granicom izdržljivosti podrazumeva se najveće naprezanje ciklusa σ_m , koje može da izdrži element bez razaranja usled zamora za dato vreme trajanja rada. Ona se određuje prema priručnicima ili prema empirijskim formulama [16].

Za asimetrični ciklus opterećenja granica izdržljivosti je $\sigma_{-1} = \sigma_a + R\sigma_m$ [3]-[7].

Proučavanje uticaja oblika (vrste) opterećenog stanja na otpor čelika zamoru omogućilo je da se utvrdi za simetrične cikluse opterećenja odnos između granica izdržljivosti pri izvijanju σ_{-1} , uvijanju τ_{-1} i istezanju $(\sigma_{-1})_i$. Drugi kriterijum koji karakteriše otpor na zamor je ciklična trajnost, tj. broj ciklusa opterećenja N , koji izdrži element pre stvaranja pukotine određene dužine ili pre razaranja. Zavisnost $N(\sigma)$ ili $\lg N(\sigma)$, koja se naziva kriva zamora određuje se kao rezultat ispitivanja. Kriva zamora opisuje se jednačinom [3]-[7].

$$\sigma_i^m N_i = const, \quad (12)$$

gde je m – pokazatelj koji zavisi od geometrije dela, površine preseka, broja ciklusa opterećenja, koeficijenta koncentracije naprezanja. Relacija između σ , m i N_0 (broj ciklusa opterećenja koji odgovaraju granici izdržljivosti, tj. razaranju) zavisi od osobina materijala, uslova rada i drugih faktora.

2.5. Model akumulisane energije

Deformacija i razaranje delova izazivaju se nepovoljnim spajanjem opterećenja i čvrstoće. Razlozi razaranja mogu biti unutrašnje promene svojstava opterećenog materijala usled termoaktivacionog procesa. Pojavljivanje i razvijanje pukotina u materijalu uslovljeni su prekidom međuatomskih veza na račun toplotnih fluktuacija i difuzije šupljina prema pukotinama. Dovedena

energija se karakteriše opterećenjem, a akumulisana – naprežanjem. Kada energija, koju je stekao neki element pri nekom procesu, premaši kritično zračenje, dešava se prekid međuatomskih veza i otkaz. Razmotreni model objašnjava otkaze pri visokim naprežanjima (naponima) i relativno niskim temperaturama. U oblasti malih naprežanja i visokih temperatura deluje difuzioni mehanizam razaranja koji zasnovan na rastu mikropukotina. Brzina razvoja mikropukotia zavisi od lokalnih naprežanja (napona). U početku se mikropukotina, koja je stvorena zbog beznačajnih defekata (sporednih uključivanja, ogrebotina, neispravnih materijala i dr.) razvija polako, a zatim velikom brzinom a , koja se približava brzini zvuka [1]-[3]-[7]-[8].

$$a = a_0 e^{-\alpha \sigma} \quad (13)$$

gde su a_0 , α – konstante, određene svojstvima materijala; σ – dodatno naprežanje.

Između brzine rasta pukotine i napona (naprežanja) postoji eksponencijalna veza, koja objašnjava rast pukotine lavinskog tipa. Razmotreni model razaranja svojstven je idealnim elementima.

Kao rezultat pokaznih razlika neki elementi mogu da otkazu pri nižim značenjima sakupljene energije. Takvi elementi nazivaju se “slabim”; oni su razlog otkaza čitavog objekta. Zaista, neka objekat ima N elemenata, od koji će otkazati n “slabih”. Usled toga porašće opterećenje na ostale elemente $R_H = R_0 N(N-n)$ (gde je R_0 – početno opterećenje); ako ono premaši noseću sposobnost “slabe” karike (sklopa), onda će element otkazati, a na ostale opterećenje raste još više itd. Razmotreni model “slabe” karike (sklopa) omogućava da se objasni pojava otkaza postojanjem lokalnih prenaprežanja, koji su izazvani neotkrivenim malim defektima materijalima [16].

2.6. Parametarski model

Stanje hidrauličke instalacije koja funkcioniše u uslovima slučajnih uticaja, može se karakterisati celokupnošću fizičkih parametara ili vektorom parametara stanja $X(t) = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$. Obavljanje svoje namene koju ima instalacija takođe se određuje dozvoljenim granicama promene određenih parametara odozdo [1]-[4]-[5]

$$X_D(t) = \{X_{D1}(t), X_{D2}(t), \dots, X_{Dn}(t)\} \quad (14)$$

i odozdo:
$$X_G(t) = \{X_{G1}(t), X_{G2}(t), \dots, X_{Gn}(t)\} \quad (15)$$

Za vreme t verovatnoća bezotkaznog rada [1]-[3]-[4]-[5].

$$P(t) = V_{er} [X_D(t) < X(t) < X_G(t)]. \quad (16)$$

U instalacijama parametri stanja (pritisak, protok, frekvencija obrtanja, koeficijent korisnog dejstva i dr.) su uzajamno povezani, usled čega mogu da se ograniče sa jednim ili dva parametra stanja, koji se nazivaju uopšteni, jer karakterišu celokupnost osobina i karakteristika instalacije. Naime, odabira se proračunsko vreme t_p , u toku koga je verovatnoća pojavljivanja otkaza najveća. Primenom tih dopuštanja, ako su zadate funkcije raspodele parametara $X(t)$, $X_D(t)$, $X_G(t)$, zadatak se svodi na izračunavanje verovatnoće [1]-[2]-[3].

$$P = V_{er} (X_D < X < X_G). \quad (17)$$

Uvedimo slučajne veličine

$$Y_D = X - X_D \quad i \quad Y_G = X_G - X \quad (18)$$

Ako su slučajne veličine X , X_D , X_G nezavisne i imaju normalnu raspodelu, onda Y_D i Y_G takođe imaju normalnu raspodelu i gustina verovatnoće određuje se zavisnostima [1]-[2]-[3]

$$f(Y_D) = \frac{1}{\sigma_{Y_D} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Y_D - m_{Y_D})^2}{2\sigma_{Y_D}^2}} \quad i \quad f(Y_G) = \frac{1}{\sigma_{Y_G} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Y_G - m_{Y_G})^2}{2\sigma_{Y_G}^2}} \quad (19)$$

Gde je $X_i = X$; X_D ; X_G ; σ – srednje kvadratno odstupanje slučajne veličine; m – matematičko očekivanje;

$$m_{Y_D} = m_X - m_{X_D}; \quad m_{Y_G} = m_X - m_{X_G};$$

$$\sigma_{Y_D} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_{X_D}^2}; \quad \sigma_{Y_G} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_{X_G}^2}; \quad (20)$$

Za određivanje koeficijenta korelacije prvo ćemo naći korelacioni moment [1]-[3]-[4]

$$K = M[(Y_D - m_{Y_D})(Y_G - m_{Y_G})]. \quad (21)$$

Posle množenja članova u zagrada i primene osobina matematičkih očekivanja zbira i proizvoda slučajnih veličina, svodenja sličnih članova uz uzimanje u obzir zavisnosti $\sigma_y^2 = M[Y^2] - m_y^2$, na kraju ćemo dobiti $K = -\sigma_y^2$ i koeficijent korelacije [1]-[5]

$$\rho = \frac{K}{\sigma_{Y_D} \sigma_{Y_G}} = -\frac{\sigma_X^2}{\sqrt{(\sigma_X^2 + \sigma_{X_D}^2)(\sigma_X^2 + \sigma_{X_G}^2)}} \quad (22)$$

5. ZAKLJUČAK

Razvijeni modeli dijagnostike mogu se primeniti na sve hidraulične komponente i sisteme. Energetski proces (akumulirana energije) kao pokazatelj vibracije, treba koristiti za dijagnostiku sistema u kome nastaju vibracije različitog nivoa. Svaki hidraulični sistem se može razmatrati kao pretvarač ulaznih veličina u izlazne veličine. Na taj način se protok (oticanje) može koristiti za delimično zapušanje različitih delova kao i za habanje (glačanje) pokretnih elemenata. Uzajmna zavisnost radnih procesa u agregatima može se predstaviti u vidu strukturne šeme koja se sastoji od posebnih blokova (pumpa, motor, filter itd.) Parametri koji karakterišu stanje hidroagregata ili stanje radne tečnosti na njegovom izlasku su: pritisak, protok (utrošak), temperatura, položaj sastavnog dela, pomeranje i brzina, momenti i itd. Mikropukotine nastale usled zamora stvaraju se najčešće u mestima gde postoje koncentratori naprezanja. Pri tome ciklus opterećenja se karakteriše maksimalnim, minimalni i srednjim naprezanjima (granica izdržljivosti pri izvijanju i uvijanju). Pod delovanjem opterećenja dešava se akumulacija i pretvaranje energije, pri čemu neki elementi mogu da otkazu pri nižim značenjima sakupljene energije. Parametri stanja (pritisak, protok, frekvencija obrtanja i dr.) su uzajamno povezani, usled čega mogu da se ograniče sa jednim ili sa dva parametra stanja, koji se nazivaju uopšteni, jer karakterišu celokupnost osobina i karakteristika instalacije.

6. LITERATURA

- [1] Adamović, Ž., Josimović, Lj., Tehnička dijagnostika, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2020.
- [2] Adamović, Ž., Josimović, Lj., Hidraulika i pneumatika, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2021.
- [3] Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
- [4] Siricin, T., Nadežnost, Mašinstroenie, Moskva, 1980.
- [5] Siricin, T., Ekspluatacija i nadežnost gidro i pneumoprivodov, Mašinstroenie, Moskva, 1990.
- [6] Vulović, S., Otić, G., Radovanović, Lj., Adamović, Ž., Spasić, D., Vibrations of turborotor aggregate Smederevo iron works caused by oil film bearings, Journal of the Balkan Tribological Association, Book 4, Vol. 22, Sofia, Bulgaria, 2016.
- [7] Otić, G., Jovanov, G., Adamović, Ž., Proactive maintenance Model Based on the Law on change of Mechanic Vibration, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 18, №4, 2021, Budapest.
- [8] Adamović, Ž., Petrović, Lj., Golubović, D., The Models of Failure and Diagnostic of Hydraulic Systems, Majski skup održavalaca Srbije, Beograd, 2003.
- [9] Josimović, Lj., Adamović, Ž., Direktive i standardi u zaštiti životne sredine, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2020.
- [10] Adamović, Ž., Ašonja, A., Metodologija naučno-istraživačkog rada, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2014.
- [11] Adamović, Ž., Joković, N., Jevtić, N., Electro hydraulic system for automatic gage control (age) for andem cold mill plant in Sartid Smederevo, International journal of fluid mechanics research, Institute of Hydromechanics, Kiev, 2000.
- [12] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.
- [13] Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Paunjorić, P., Teledijagnostika mašina, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.
- [14] Adamović, Ž., Vulović, S., Menadžment održavanja u industriji, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2011.
- [15] Adamović, Ž., Vuković, V., Dinamika motornih vozila, Fakultet primenjenih nauka, Niš, 2022.
- [16] Adamović, Ž., Jevtić, N., Uljna hidraulika, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2014.