

MONITORING TRIBOMEHANIČKOG SISTEMA PREKO SREDSTVA ZA PODMAZIVANJE - SA OSVRTOM NA PQ INDEX

Dražen Sarjanović, email: sarjanovicd@gmail.com

Fakultet za inženjerski menadžment, Beograd, Republika Srbija

Dušan Jesić

Međunarodna tehnološko menadžerska Akademija, Trg D. Obradovića 7, Novi Sad,
Republika Srbija

Pavel Kovač, email: pkovac@uns.ac.rs

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad,
Republika Srbija

Srećko Novaković

Visoka škola akademskih studija, Beograd-Čačak, Subotica, Đ Đakovića

Borislav Savković

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad,
Republika Srbija

Denisa Đorđević, email: denisa.djordjevic@pipelife.com

Građevinski fakultet, Beograd, Republika Srbija

Sažetak: Monitoring stanja tribomehaničkih sistema ima veoma veliki značaj u razvoju teorije i prakse o trenju i habanju kao i teoriji podmazivanja. U savremenim tribomehaničkim sistemima se primenjuju različite fizičko hemijske i tribološke metode. Iskustva iz eksploatacije tehničkih sistema pokazuju da je predviđanje otkaza najefikasnije na osnovu praćenja parametara procesa habanja i čestica koje nastaju u ovom procesu. Sredstvo za podmazivanje kao treći elemenat u tribomehaničkom sistemu je nosilac informacija o stanju celog sistema sa aspekta triboloških i drugih procesa starenja.

Ključne reči: monitoring, sredstva za podmazivanje, tribomehanički sistem

MONITORING OF TRIBOMECHANICAL SYSTEMS THROUGH LUBRICATION AGENTS - WITH OVERVIEW OF PQ INDEX

Abstract: Monitoring of tribomechanical systems conditions has very important role in development of friction theory and practice about friction, wear and lubrication. Experience in technical systems exploitation showed that the most effective failure prognosis is according to parameters, particles created as results of wear, which are reliable indicators of wear process. Lubricants are as the contacts elements of tribomechanical systems carry the information about the state of whole system from the aspect of ageing processes. Measurement of particles by PQ index is indicator of wear in tribomechanical system.

Key words: Monitoring, lubricants, tribomechanical system

1. UVOD

Automobil kao tehničko sredstvo predstavlja skup veoma složenih tribomehaničkih sistema koji se sastoje od velikog broja podsistema, koji takođe predstavljaju složene tribomehaničke sistema (slika 1). Njih čine svi sklopovi koji učestvuju u prenosu snage odnosno obrtnog

momenta od motora, preko sklopova transmisije (menjača, razvodnika pogona, diferencijala i ostalih sklopova) do izvršnih organa automobila.



Slika 1. Automobil je skup složenih tribomehaničkih sistema
Fig. 1. Auto is a collection of complex tribomechanical systems

Kontrola stanja maziva, za vreme eksploatacije ima dugu tradiciju i prvenstveno se odnosi na sredstva za podmazivanje s obzirom da je njihova potrošnja najveća. Stalna kontrola sredstva za podmazivanje u sistemu po unapred definisanom programu pruža korisniku mogućnost poboljšanja produktivnosti i profitabilnosti:

- Smanjenjem broja i dužine zastoja,
- Produženjem eksploatacionog veka sistema
- Smanjenjem troškova radne snage
- Smanjenjem količine i troškova odlaganja otpadnog maziva.

Na ovaj način se obezbeđuje kontrola habanja i degradacionih procesa u tribološkim sistemima. Savremeni koncepti održavanja prema stanju baziraju na monitoringu stanja, čiji je zadatak da se na bazi merljivih simptoma identifikuje postojanje ili razvoj otkaza. Koristeći analizu ulja, kao tehniku monitoringa dolazi se do saznanja o degradaciji komponenti tribomehaničkog sistema i sredstva za podmazivanje, preko produkata habanja i parametara kontaminacije.

S obzirom da se u najvećem broju slučajeva promena funkcionisanja složenog tribomehaničkog sistema vidi u promeni karakteristika sredstva za podmazivanje, promena karakteristika sredstva može se usvojiti kao parametar za ocenu stanja tribomehaničkog sistema.

2. METOD RADA

Opšte karakteristike sredstva za podmazivanje se mogu podeliti u dve grupe:

1. Fizičko-hemijske karakteristike: viskoznost (dinamička i kinematska), gustina, tačka paljenja, tačka zamućenja, tačka tečenja, isparljivost, penušanje, korozivnost itd.
2. Tribološke karakteristike: Sila trenja, koeficijent trenja, intenzitet habanja, temperatura kontakta, intenzitet rasta produkata habanja itd.

Danas postoji veoma razvijena oprema za ocenu i analizu fizičko hemijskih karakteristika sredstva za podmazivanje, ali za određivanje triboloških karakteristika to i nije tako slučaj.

Najveći dio triboloških karakteristika se određuje standardnim testovima sa strogo definisanom procedurom čiji je pregled dat u tabeli 1. U tu svrhu se primenju standardni komercijalni tribometri raznih proizvođača kao što su: Falex, Timken, Plint itd.

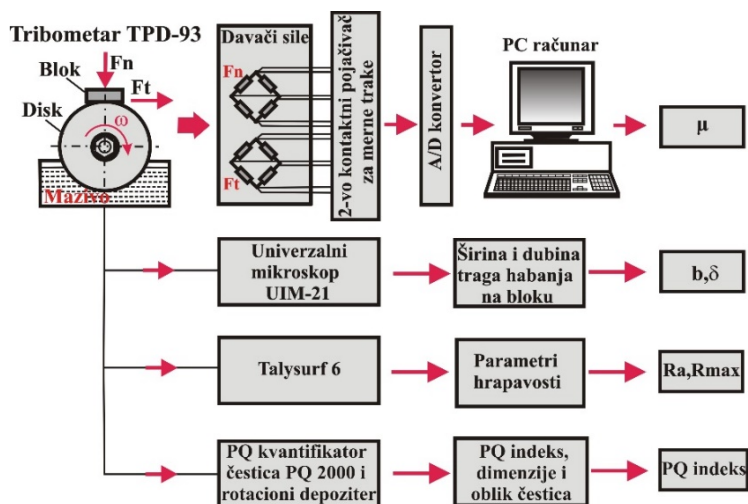
Tabela 1. Testovi triboloških karakteristika sredstva za podmazivanje

Table 1. Test of tribological characteristic of lubricants

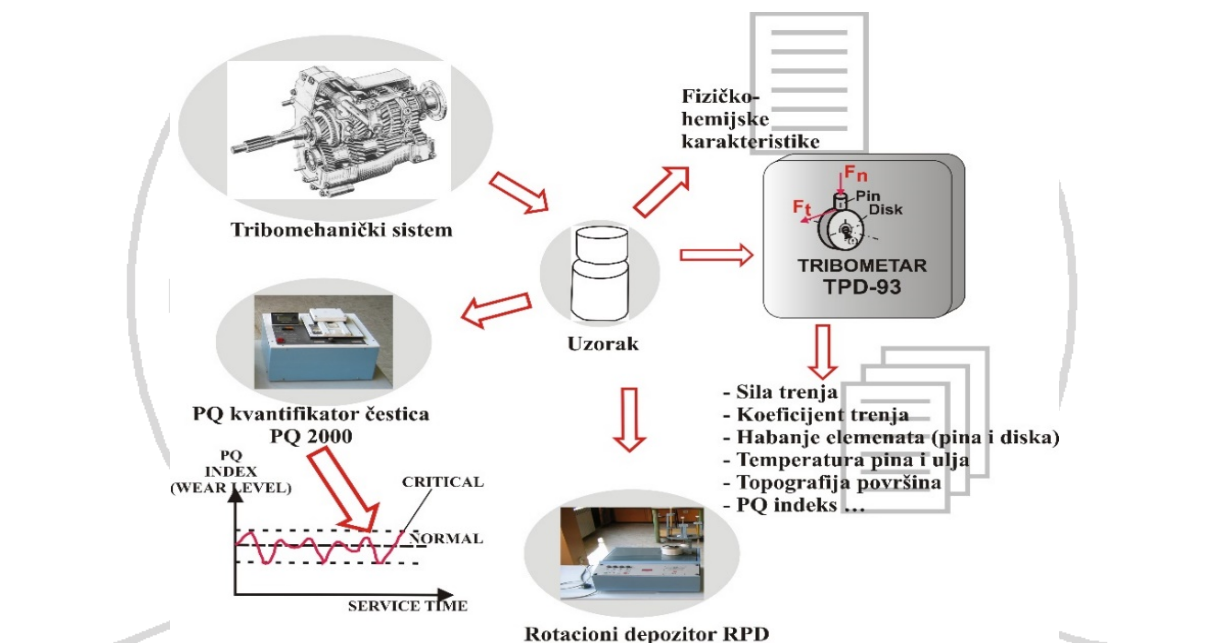
Standard Norms	Kontaktna geometrija Contacts geometry
Antihabajuće osobine Wear Preventive Characteristics	
ASTM D2670	Pin i V blok Pin and Vee Block
ASTM D4172	Četiri kuglice Four Ball
EP karakteristike Extreme Pressure Properties	
ASTM D2782	Blok i prsten Block on Ring
ASTM D2783	Četiri kuglice Four Ball
ASTM D3233	Pin i V blok Pin and Vee Block
IP 240	Blok i prsten Block on Ring
Frikcione karakteristike Friction characteristics	
ASTM D 5183	Četiri kuglice Four Ball
Tribološko ponašanje na uređajima sa realnim mašinskim elementima Tribological behaviour of real machinery elements	
ASTM D5182	Zupčasti par FZG – Gear Test Rig

Primer jednog mernog sistema za određivanje triboloških karakteristika elemenata (slika 2), se sastoji od:

- Tribometra za merenje habanja, normalne sile, sile trenja i koeficijenta trenja
- Termoparova za merenje temperature sredstva za podmazivanje i elemenata u kontaktu
- PQ 2000 kvantifikatora čestica za meranje PQ indeksa.
- Mikroskopa za merenje parametara pohabanosti (dužine, širine, i dubine pojasa habanja)
- Kompjuterizovanog uređaja za merenje parametara hrapavosti površine i parametara habanja



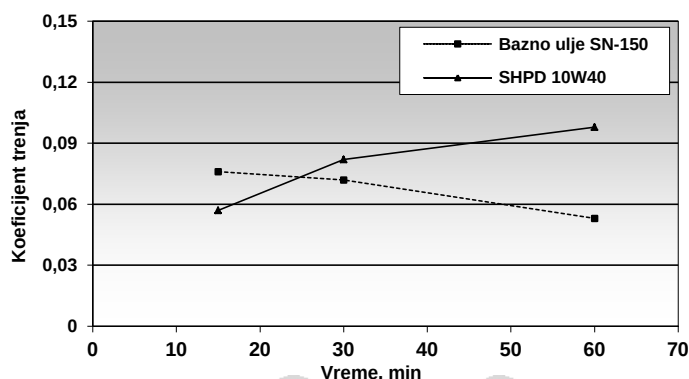
Slika 2. Merni lanac za merenje triboloških karakteristika
 Fig. 1. Measuring range for measuring the tribological characteristics



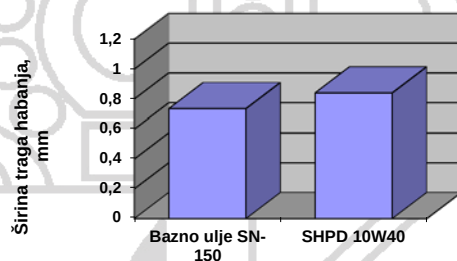
Slika 3. Model za ispitivanja triboloških karakteristika tokom eksploatacije
 Fig. 3. Model for tribological characteristics of testing during exploitation

Model za ispitivanja triboloških karakteristika tokom eksploatacije je na slici 3. Primer rezultata ispitivanja na tribometru je prikazan na slici 4. Pomoću ispitivanja na tribometru određen je koeficijent trenja u vremenu u zoni kontakta za bazno i ulje Sn 150 jednog proizvođača.

Na slici 5 je su prikazani rezultati ispitivanja širina traga habanja za pomenuta ispitivana ulja. Za bazno ulje širina traga habanja na bloku je bila 0,73 mm. Kod ulja SHPD 10W40 širina traga habanja je bila 0,84 mm.



Slika 4. Uporedni prikaz koeficijenta trenja u vremenu u zoni kontakta
 Fig. 4. Comparative review of the coefficients of friction at the time in the contact zone



Slika 5. Širina traga habanja uz primenu ispitivanih ulja
 Fig. 5. Tread of wear with the use of tested oil

Postupak ispitivanja triboloških karakteristika sredstva za podmazivanje u toku eksploatacije se sastoji u sledećem, slika 3.:

- Uzorkovanje ulja iz realnog tribomehaničkog sistema
- Utvrđivanje učešća produkata habanja u ulju
- Merenje triboloških karakteristika tribomehaničkog sistema u modelskim uslovima uz korišćenje uzorkovanog sredstva kao maziva.

3. PROGRAM ANALIZE SREDSTVA

Program analize sredstva za podmazivanje obuhvata pet standardizovanih koraka:

- Projektovanje programa analize ulja,
- Postupak uzorkovanja
- Evidencija podataka i laboratorijsko ispitivanje,
- Dijagnozu i prognozu i
- Praćenje performansi i analiza troškova

3.1. Projektovanje programa analize ulja

Projektovanje programa analize ulja bazira na izboru sistema ili njegovih komponenti koje će se pratiti analizom ulja. Optimizacija programa analize ulja može da se realizuje samo ako se identifikuju potencijalni uzročnici ili vrste pojave otkaza, kao i kritičnost pojedinih sistema, podsistema ili njihovih komponenti. Za procenu rizika koristi se procedure stabla otkaza i FMEA. Stablo otkaza je logički sistem sličan porodičnom stablu.

Analiza načina i posledica otkaza (Failure Mode and Effects Analysis) je analitička sistemska i kvalitativna metoda kojom se identifikuju otkazi koji su od najvećeg uticaja na performanse sistema.

3.2. Postupak uzorkovanja ulja

Dobijanje korisnih informacija analizom uzoraka ulja zavisi dobrim delom i od postupaka uzimanja uzorka. Bez obzira na reprezentativnost uzorka, rezultai analize mogu dati više štete nego koristi. Zbog toga je neophodno pridržavati se sledećih pravila uzorkovanja:

- Odrediti mesta uzimanja uzorka iz sistema koji je predmet praćenja;
- Uzorkovanje vršiti za vreme rada sistema ili neposredno nakon zaustavljanja;
- Uzorkovanje vršiti na radnoj temperaturi;
- Uzorkovanje vršiti pre dolivanja novog ulja;
- Za uzorkovanje koristiti nove, čiste flaše i pribor. Ovo je značajno naročito za određivanje broja čestica u ulju (ISO 4406);
- Označiti uzorak uz registraciju svih neophodnih podataka
- Dostaviti uzorak laboratoriji odmah nakon uzorkovanja, vodeći računa da ne dođe do njegove naknadne kontaminacije.

3.3. Evidencija podataka i laboratorijska ispitivanja

Evidencija i ispitivanja se vrši usaglašenim metodama i procedurom ispitivanja.

3.4. Dijagnoza i prognoza

U načelu postupak dijagnoze i prognoze obuhvata sledeće aktivnosti:

- Prikupljanje informacija
- Obrada i analiza
- Donošenje odluka i prognoza

Sve evidentirane veličine i rezultai ispitivanja koriste se za formiranje baze podataka. Obradom informacija se vrši poređenje izmerenih vrednosti sa dozvoljenim ili predhodno izmerenim. Na osnovu ovih informacija i analize utvrđuje se mera ili obim radova u cilju uspostavljanja optimalnih uslova rada i sistema i sprečavanje većih otkaza. U današnje vreme ovi poslovi su povezani sa primenom računara koji omogućuju akumuliranje servisnih informacija, statističke analize i primenu ekspertnih sistema i sistema veštačke inteligencije.

3.5. Praćenje performansi i analiza troškova

Veoma je važno utvrditi korelaciju između monitoringa sredstva za podmazivanja i postignutih performansi sistema, kao i ocenu troškova tj efektivnost programa analize.

4. PRODUKTI HABANJA U SREDSTVU ZA PODMAZIVANJE

Habanje je nepoželjan u svim uslovima prisutan proces u svim tribomehaničkim sistemima i predstavlja složen fenomen koji uzrokuju različiti faktori. Na početku je proces

uhodavanja gde postepeno dolazi do povećavanja količine produkta habanja u sistemu. Normalno habanje karakterišu produkti habanja koji su mali po dimenzijama ali je njihov priraštaj uvek konstantno prisutan u jedinici vremena. Intenzivno habanje se odlikuje naglim porastom količine čestica u sredstvu kao i rastom produkata habanja većih dimenzija u odnosu na male.

Analizom sredstva za podmazivanje dolazi se do saznanja o vrsti, količini, veličini, obliku i distribuciji čestica habanja. Određivanje broja metalnih čestica u ulju (ISO 4406), vrši se pomoću uređaja koji se zove brojač čestica. Neophodan uzorak sredstva za ispitivanje je 100 ml, dok se čistoća ulja iskazuje pomoću skale definisane standardom (ISO 4406), koji sadrži četiri broja prilikom čega;

- Prvi broj označava broj čestica po 1 ml sredstva dimenzija jednakih ili većih od 4 μm
- Drugi broj označava broj čestica po 1 ml sredstva dimenzija jednakih ili većih od 6 μm
- Treći broj označava broj čestica po 1 ml sredstva dimenzija jednakih ili većih od 14 μm

Korišćenje brojača čestica i ISO koda za određivanje broja čestica predstavlja kvantitativnu metodu kojom se ne može identifikovati poreklo čestica. Ovome metodom se međutim može identifikovati prisutnost čestica većih od 30 μm , koje ukazuju na prisustvo abnormalnog habanja koje dovodi do havarije u sistemu.

Sadržaj različitih metala u sredstvu za podmazivanje se određuje emisijom spektrofotometrijskom analizom. Svaki metal emituje svetlosnu energiju određene talasne dužine. U motornim uljima poreklo različitih hemijskih elemenata može biti iz aditiva, od habanja, iz goriva, iz vazduha i tečnosti za hlađenje. Od habanja potiču različiti metali; Fe, Pb, Cu, Cr, Al, Mn, Ag, Sn, što ukazuje na povećano habanje u pojedinim sklopovima (tabela 2). Elementi koji potiču iz rashladne tečnosti su: Na i B a njihov sadržaj pokazuje prodor rashladne tečnosti u sistem za podmazivanje. Povećan sadržaj Si i Ca koji potiču iz vazduha, ukazuje na neispravnost filtera za vazduh.

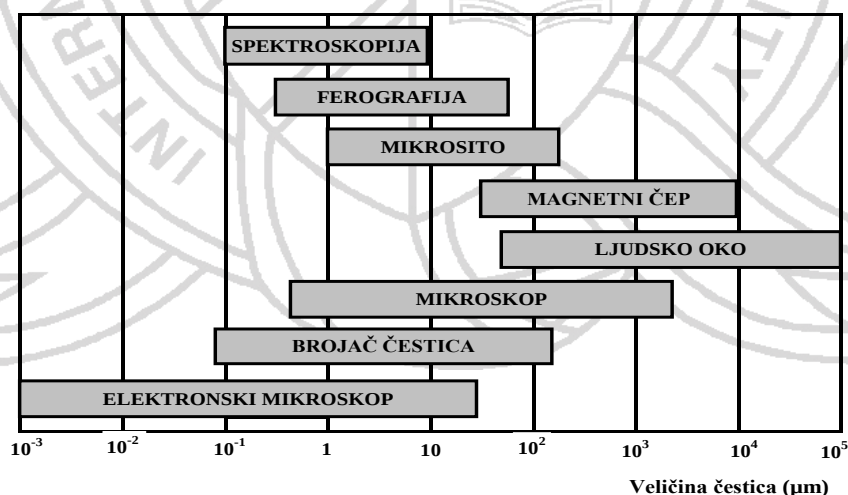
Promena mera i oblika delova u procesu eksploatacije traktora, dovodi do preraspodele postojećih opterećenja i povećanja kontaktnih pritisaka, pri čemu se javlja sve jača lupa (dinamički udari) na mestima dodira, koja ubrzavaju habanje delova. Usled dodatnih dinamičkih opterećenja dolazi do znatnijeg povećanja zazora što može da uzrokuje i lom delova.

Tabela 2. Dozvoljene količine elementa u korišćenom motornom ulju
Table 2. The permissible amount of elements in engine used oil

Elementi Elements	mg/kg (ppm)	Poreklo Origin
Fe	100	Cilindri, klipovi, ležajevi, zupčanici, podizači ventila, bregasta osovina, kolenasto vratilo, osovine Cylinders, pistons, bearings, gears, valve lifters, cam shafts, crankshafts, axles
Al	20	Klipovi, Al-Sn ležajevi, turbokompresor Pistons, Al - Sn bearings, turbocharger
Ag	2-3	Posrebrani delovi, ležajevi,

		Silver plated parts, bearings, pins
Cr	30	Hromirani delovi, klipovi, cilindri, podizači ventila, izduvni ventili, klipnjača Chrome parts, pistons, cylinders, valve lifters, exhaust valves, connecting rods
Cu	40	Cu-Pb ležajevi, čaure, hladnjak ulja, bregasta osovina, razvodni mehanizam (ventili sa sistemom za otvaranje i zatvaranje), brizgaljka, regulator Cu - Pb bearings, bushings, oil cooler, camshaft, valve train (valve with a system for opening and closing), nozzle, regulator
Pb	50	Cu-Pb ležajevi, benzin, aditivi Cu - Pb bearings, diesel, additives
Sn	25	Delovi od bronzе, ležajevi, klipovi Parts made from bronze, bearings, pistons
B	20	Antifriz Antifreeze
Na	20	Antifriz Antifreeze
Ca	50	Iz atmosfere Atmospheric
Si	40	Prašina iz atmosfere Dust from the atmosphere
Zn,Mg,Mo		Iz aditiva From aditives

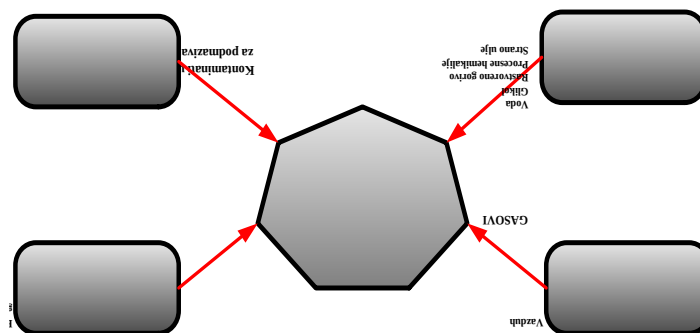
Pošto se odredi broj čestica koje su produkti habanja, vrši se njihova analiza. U skladu sa veličinom čestica zavisice i primenjena metoda ispitivanja. Na slici 5. su prikazane različite metode pomoću kojih se mogu identifikovati čestice u zavisnosti od njihove veličine.



Slika 5. Uticaj veličine čestice na metodu ispitivanja [8]

Fig. 5. The effect of particle size on the test method [8]

Prisustvo raznovrsnih kontaminata u sredstvu za podmazivanje prikazano je na slici 6.



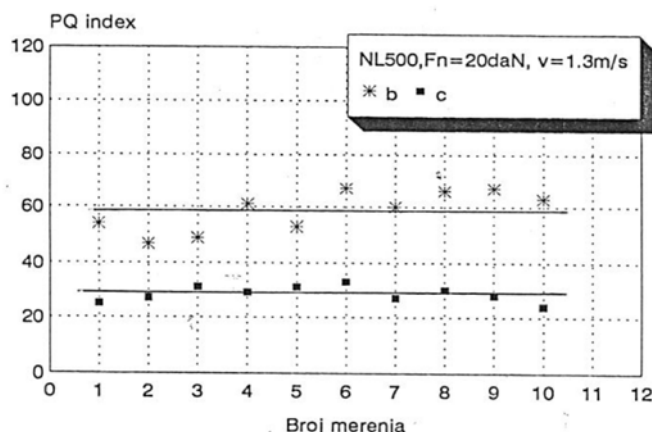
Slika 6. Kontaminanti ulja za podmazivanje
 Fig. 6. The lubricating oil contaminants

Merenje PQ Indeksa se vrši pomoću kvantifikatora čestica slika 7. Koristi se za: brzu numeričku procenu PQ Indeksa nakupina u uljima za podmazivanje i hidrauličkim tečnostima. Merenje se vrši pomoću indukcionog magnetskog momenta nakupina kao naslaga na osnovi ili sadržaj unutar određene zapremine tečnosti. Kao i pri proceni progressa habanja sa vremenom izraženim PQ Indeksom.



Slika 7. PQ 2000 čestica analizator
 Fig. 7. PQ 2000 Particle Quantifier

Na slici 8. su prikazani rezultati merenja PQ indekasa ulja korišćenih za podmazivanje diskova od nodularnog liva NL 500, (pseudobinarna legura gvožđa i ugljenika sa većinskim sadržajem ugljenika) od kojih je jedan bio poboljšan izotermalnim postupkom (c) a drugi klasičnim postupkom (b). Maksimalna odstupanja od srednje vrednosti nisu veća od 10 % u oba smera sto pokazuje na zadovoljavajuću pouzdanost merenja PQ indekasa. Sa povećanjem broja merenja greška merenja može da se značajno smanji čime se povećava pouzdanost dobijenih rezultata.



Slika 8. Rezultati merenja PQ indeksa

Fig. 8. The results of the PQ Index measurements

5. ZAKLJUČAK

Za vreme eksploatacije dolazi do promena radnih i triboloških osobina svih komponenti sklopova vozila, pri čemu brzina i stepen degradacionih procesa zavise od radnih uslova. Promene koje se javljaju kod komponenti sklopova vozila i maziva nastaju pod istim okolnostima i međusobno su u korelaciji. Zbog smanjenja troškova održavanja i lakše kontrole radnog procesa, sve veća pažnja se poklanja dijagnostici maziva, koja u dobroj meri daje informacije o stanju kompletnog tehničkog sistema. Efikasan program ispitivanja stanja maziva sadrži ispitivanje fizičko-hemijskih osobina maziva, ispitivanje sadržaja kontaminata, ispitivanje sadržaja i vrste produkata habanja.

Primenjuje se više metoda za ocenu stepena habanja. Metoda identifikacije habanja putem produkata habanja u mazivu najviše se primenjuje zbog svoje jednostavnosti, velike tačnosti i ponovljivosti. Takođe, pojedine vrste habanja daju karakteristične oblike čestica, koje mogu signalizirati na potencijalni uzrok habanja. Iz navedenog sledi da je neophodno praćenje količine, vrste, oblika i distribucije produkata habanja u mazivu, jer rezultati analize čestica omogućavaju praćenje i dijagnostiku stanja kontaminiranosti maziva, stanja i prirode habanja kritičnih kontaktnih površina i elemenata, te nivoa aditiva u ulju.

6. LITERATURA

- [1] Babić M. 2004. Monitoring ulja za podmazivanje, Kragujevac.
- [2] Golubović D, Kovač P, Ješić D, Gostimirović M, Pucovski V. 2012. Wear Intensity of Different Heat Treated Nodular Iron, Journal: Metalurgija, No. 4, Vol. 51, Zagreb, ISBN 0543-5846, 518-520.
- [3] Golubovic D, Kovač P, Jesic D, Gostimirović M. 2012. Tribological properties of ADI material, Journal of the Balkan Tribological Association, No. 2, Vol. 18, Sofia, ISSN 1310-4772, 165-173.
- [4] Ješić D, Pulić J, Kovač P, Savković B, Kulundžić N. 2014. Application of Nodular Castings In The Modern Industry of Tribomechanical Systems Today and Tomorrow, Journal of Production Engineering, No.1, Vol. 17, Novi Sad, ISSN 1821-4932, 55-58.

- [5] Golubovic D, Kovač P, Savkovic B, Jesić D, Gostimirović M. 2014. Testing the Tribological Characteristics of Nodular Iron Austempered by Conventional and an Isothermal Procedure, *Materials and Technology*, No. 2, Vol. 48, Ljubljana, ISSN 1580-2949, 57-312.
- [6] Kovač P, Ješić D, Gvozdenović N, Gostimirović M, Pucovsky V. 2015. Istraživanje triboloških karakteristika različitih ulja primenjenih u tribomehaničkom systemu, 14th International Conference on Tribology - SERBIATRIB '15. 13-15 May, Belgrade.
- [7] Kovač P, Ješić D, Kirin S, Savković B. 2015. Zagađenje voda uzrokovano uljima koje potiču od sredstava za čišćenje i odmašćivanje. *Savremena poljoprivredna tehnika*, No. 1, Vol. 41, Novi Sad, ISSN 0350-2953, 1-24.
- [8] Beuf D. 2001. Used Oil Analysis and Equipment Monitoring, Texaco Training, Chevron-Texaco Technology, Ghent.

