

## STRUČNI ČLANCI

### SAVREMENE METODE ANALIZE ULJA U TEHNIČKIM SISTEMIMA

Perić R. *Sreten*, Vojna akademija – Katedra vojnih  
mašinskih sistema, Beograd

UDC: 623.3.054.237

#### Sažetak:

*Analiza ulja na osnovu pravilno definisanog programa predstavlja veoma efikasan metod monitoringa stanja tehničkih sistema koji obezbeđuje rane upozoravajuće znake potencijalnih problema, koji vode ka otkazu i zastoju tehničkih sistema. Ova analiza je veoma efikasan alat programa za monitoring stanja tehničkih sistema. Mnogobrojni uređaji i testovi za analizu ulja omogućavaju kvalitetan monitoring i dijagnostičiranje problema koji nastaju u procesu podmazivanja.*

*Korišćenjem programa za analizu motornih ulja: skraćuje se neplanirano vreme otkaza vozila, poboljšava pouzdanost vozila, produžava radni vek motora, optimizira interval zamene ulja i smanjuju troškovi održavanja vozila.*

*Ključne reči: monitoring, održavanje tehničkih sistema, analiza ulja.*

#### Uvod

Za određivanje vrste maziva, učestalost podmazivanja i količinu potrebno je poštovati zahteve proizvođača tehničkih sistema, iskustvo, laboratorijska ispitivanja ili savete stručnjaka isporučilaca maziva. Racionalizacija potrošnje maziva predstavlja značajan zadatak, koji se uspešno može ostvariti pravovremenom zamenom maziva. Time se obezbeđuje maksimalni period zamene, uz istovremeno dovoljno kvalitetno podmazivanje. S obzirom na primarnu ulogu maziva da redukuje negativne efekte triboloških procesa u pogledu trenja, habanja i rasta

temperature u tribomehaničkim sistemima, svi vidovi održavanja uključuju podmazivanje kao veoma važan deo ukupne procedure. S druge strane, mazivo je, kao kontaktni element sistema, nosilac informacija o stanju celog sistema sa aspekta triboloških i drugih procesa starenja. Zbog toga analiza ulja na bazi pravilno definisanog programa predstavlja veoma efektivan metod monitoringa stanja tehničkih sistema koji obezbeđuje rane upozoravajuće znake potencijalnih problema, koji vode ka otkazu i zastoju tehničkih sistema [1]. U strukturi sistema, osim mehaničkih komponenti, stanje menja i samo mazivo, što vodi gubitku podmazujućih svojstava.

Postoje brojne mogućnosti za kontaminaciju ulja, a time i za njihovu degradaciju. Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji ne mogu se potpuno sprečiti, ali se mogu znatno usporiti, što je veoma važno i za ulje i za tehnički sistem. Brzina i stepen degradacije ulja upravo su proporcionalni brzini i stepenu kontaminacije. Zbog toga je važno sprečiti brzu kontaminaciju ulja, pre i u toku upotrebe. Spektar kontaminanata ulja dosta je širok. Svaki kontaminant utiče destruktivno na ulje, umanjujući mu fizičko-hemijske i radne osobine, a konačne posledice su skraćenje veka ulja i tehničkog sistema.

*U toku eksploatacije ulja menjaju se:* hemijski sastav i osobine baznog ulja, hemijski sastav i osobine aditiva, a to znači i hemijski sastav ulja u celini, kao posledica kontaminacije i degradacije.

*Najznačajniji kontaminanti ulja su:* degradacioni proizvodi baznog ulja, degradacioni proizvodi aditiva, čestice metala usled procesa habanja, čvrste čestice koje u ulje dospevaju iz okoline, voda i produkti sagorevanja goriva.

*U toku eksploatacije dešavaju se sledeće promene:* kontaminacija ulja proizvodima sopstvene degradacije, nesagorelim gorivom, proizvodima nepotpunog sagorevanja goriva i kontaminantima različitog porekla.

Na osnovu analize veoma velikog broja otkaza složenih tribomehaničkih sistema može se zaključiti da je kod sistema kod kojeg je došlo do otkaza, takođe i kod maziva (odnosno ulja za podmazivanje) došlo do određenih promena. Naime, otkaz tribomehaničkog sistema može nastupiti usled promene svojstava ulja za podmazivanje ili promena karakteristika ulja za podmazivanje, kao i usled otkaza pojedinih ostalih elemenata tribomehaničkog sistema.

Mnogobrojni uređaji i testovi za analizu ulja su razvijeni i nastavljaju se razvijati, kako bi se omogućio što kvalitetniji monitoring i dijagnostičiranje problema nastalih u procesu podmazivanja. Razvojem računara i opreme, moderni program analize ulja postaje jednostavan za sprovođenje. Mnoge kompanije koriste softvere za analizu ulja.

U poslednje vreme mnogo se govori o razvoju novih tehnika za analizu podmazivanja i povećanju sposobnosti određivanja stanja tehničkog sistema, maziva i nečistoća u ulju.

## Kontaminacija i degradacija ulja za podmazivanje

Činjenica je da mazivo ulje odmah po punjenju u sistem koji podmazuje biva mehanički, termički i hemijski opterećeno i naprezano. To postepeno doводи do promene osnovne i prvobitne strukture ulja. Neophodno je istaći da su ova opterećenja sve oštrija, jer savremeni agregati imaju sve manje zapremine, radne temperature su sve više, a mehanička opterećenja ulja su sve veća.

Zbog toga što su danas radni uslovi za ulje sve teži, za novija konstruktivna rešenja, preporuke za interval zamene ulja se više ne uklapaju i ne slažu sa prvobitnim.

Postoje brojne mogućnosti za kontaminaciju ulja, a time i za njihovu degradaciju.

### *Kontaminacija ulja pre upotrebe*

Na relaciji od proizvođača do korisnika ulja, postoji niz mogućnosti za njegovu kontaminaciju i degradaciju, često i do stepena neupotrebljivosti. Mogući kontaminanti su: benzin, dizel gorivo, neka druga ulja, voda, prašina i drugi atmosferski kontaminanti.

Železničkim i autocisternama prenose se i goriva i maziva. Često se dešava da se prethodno transportovana roba ne istovari u potpunosti, pa će njome biti kontaminirana sledeća. Nije redak slučaj da u cisterni zaostane i izvesna količina vode posle pranja koja vrlo destruktivno utiče na ulje. Preventivne mere su: stručna i redovna kontrola čistoće cisterne pre utovara i obavezna kontrola kvaliteta ulja pre istovara (izgled, boja, miris, gustina, sadržaj vode, tačka paljenja, viskoznost).

Prilikom pretakanja ulja iz cisterne u skladište kupca, postoji mogućnost za kontaminaciju ulja, ako je oprema za pretakanje zaprljana. U toku skladištenja, ako je filter na odušku rezervoara oštećen, kroz njega će ući prašina, pesak ili slični abrazivni materijali. Zbog toga se filter mora često kontrolisati i po potrebi menjati.

U skladišnim rezervoarima, u njihovom praznom prostoru, uvek se sa vazduhom nalazi i vlaga. Sa promenom temperature vlaga se kondenzuje, sliva se niz zidove i sakuplja se na dnu rezervoara. U kontaktu sa uljem kondenzovana voda može lako i brzo da degradira ulje i da ga učini neupotrebljivim i pre upotrebe. Preventivnu meru predstavlja ugradnja grejača i održavanje temperature ulja do 40°C. Na toj temperaturi vlaga se neće kondenzovati. Međutim, i pored toga, nivo vode u rezervoarima treba redovno kontrolisati i po potrebi ih drenirati.

Ako se bačve sa uljem skladište na otvorenom prostoru, u uspravnom položaju, može se dogoditi da „usisaju“ vodu od kiše ili snega. Sa

promenom temperature bačve „dišu“, u njima se stvara vakuum, što je uslov za usisavanje vode ako se ona nalazi na poklopcu oko čepova.

Preventivne mere su: skladištenje bačava u zatvorenim skladištima ili u horizontalnom položaju, tako da zapušači budu na horizontalnoj osi. Prilikom istakanja ulja iz bačava u kante ili druge posude, koje su vrlo često „sumnjive“ čistoće, može doći do kontaminacije različitim zagađivačima. Prema tome, posude kao primitivan način distribucije ulja po radionici ili pogonima, treba zameniti savremenim uređajima ili obavezno proveravati njihovu čistoću.

### *Kontaminacija ulja u toku upotrebe*

Tokom upotrebe menjaju se tribološke osobine svih elemenata tribomehaničkog sistema. Čvrsti elementi trpe fizičke, a mazivo, fizičke i hemijske promene. Brzina degradacionih procesa i promena na svim elementima sistema zavisi od ukupnih uslova pod kojima se odvijaju tribološki procesi u tribomehaničkom sistemu. Pošto su trenje i habanje, dva glavna tribološka procesa, svih elemenata tribomehaničkog sistema (i maziva) uslovljeni istim okolnostima, postoji i može se utvrditi funkcionalna povezanost između njih i uslova rada. To je upravo faktor na kome se zasniva dijagnostika stanja maziva, a preko nje i dijagnostika stanja delova tehničkog sistema.

Habanje čvrstih elemenata sistema je spor proces pa ga je teško pratiti, a osim toga teško je često zaustavljati sistem i rasklopiti ga radi merenja pohabanosti. Kontrola promena ulja mnogo je lakša. Treba samo naći korelacije između promena pojedinih elemenata. To se može uraditi posmatranjem (eksperimentisanjem) na jednom karakterističnom sistemu. Za to je potrebno imati opremljenu laboratoriju i stručno osposobljene izvršioce.

Ulje, vršeći svoje funkcije u sklopu vozila, tokom eksploatacije postepeno menja svoje fizičke i hemijske karakteristike. Uzroci promena u ulju su fizičko-hemijski i tribološki procesi u sistemu tokom eksploatacije, uslovi pod kojima ulje obavlja svoju funkciju i uslovi koji vladaju u okolini datog sistema.

Tokom eksploatacije usled delovanja različitih činioca mehaničkog, fizičkog i hemijskog karaktera odvijaju se procesi starenja, odnosno degradacije ulja kao sredstva za podmazivanje kod motornog vozila. Različitim mehanizmima degradacionih procesa izloženi su svi elementi motora, elementa za prenos snage kako mehaničke kontaktne komponente (sprega zupčastog para), tako i ulje za podmazivanje [2]. Ti degradacioni procesi izazivaju promenu osnovnih, funkcionalnih karakteristika, što ima za posledicu da vremenom nastaje otkaz. Pod otkazom se u ovom smislu podrazumeva promena karakteristika komponente sistema koja izaziva prekid kontinuiteta eksploatacije.

Pri tome kod ulja dolazi do promene njihovih *fizičko-hemijskih svojstava, trošenja aditiva, narušavanja oksidacione i termičke stabilnosti, te smanjenja sposobnosti nošenja uljnih slojeva* [3]. Te promene vremenom dostižu kritični nivo sa stanovišta pojedinih svojstava relevantnih za dati sistem koji se podmazuje, što ima za posledicu neprihvatljivost dalje upotrebe ulja u sistemu.

Međutim, te promene kod transmisionih ulja nisu tako izražene kao što je slučaj sa motornim uljima, a i sama formulacija transmisionih ulja je tako podešena da ona mogu vršiti svoje dobre funkcije u mnogo dužim vremenskim periodima.

Na promenu svojstava ulja najizraženiji uticaj imaju [4]:

- temperatura,
- pritisci,
- brzine u sistemu podmazivanja,
- prisustvo vlage,
- prisustvo kiseonika iz vazduha,
- čvrsti kontaminati i dr.

Vrsta, osobine i poreklo kontaminanata ukazuju na prirodu i stepen promena. Ljuspičasti opiljci metala npr. ukazuju na habanje, dok zrnca različite veličine ukazuju na zamor materijala. Analiza hemijskog sastava metalnih čestica ukazuje na habanje određenog elementa tribomehaničkog sistema.

U odnosu na dominantan mehanizam habanja i uslove ostvarivanja kontakta između elemenata sistema razlikuje se:

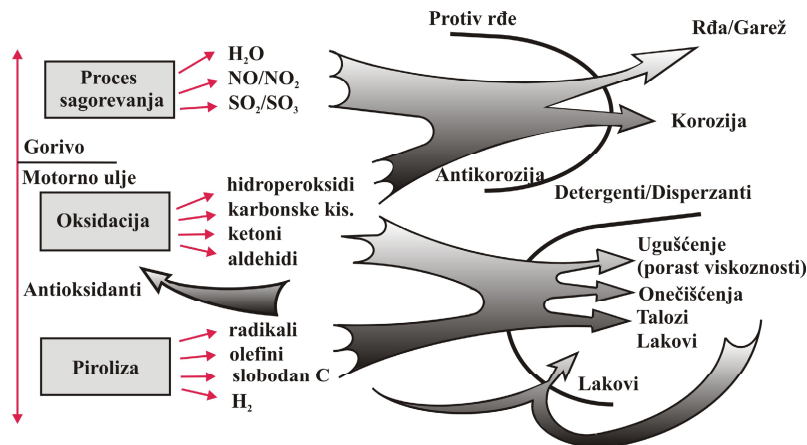
- adhezivno habanje,
- abrazivno habanje,
- habanje usled površinskog zamora (zamorno habanje),
- erozivno habanje,
- kavitaciono habanje,
- vibraciono habanje (fretting),
- habanje kao posledica oksidacije (oksidaciono habanje) i
- habanje usled procesa korozije (koroziono habanje).

Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji ne mogu se potpuno sprečiti, ali se mogu znatno usporiti, što je veoma važno i za ulje i za tehnički sistem. Brzina i stepen degradacije ulja upravo su proporcionalni brzini i stepenu kontaminacije. Zbog toga je važno sprečiti brzu kontaminaciju ulja pre i u toku upotrebe. Spektar kontaminata ulja dosta je širok. Svaki kontaminant utiče destruktivno na ulje, umanjujući mu fizičko-hemijske i radne osobine, a konačne posledice su skraćenje veka ulja i sistema koji se podmazuje.

Neispunjavanje bilo koje od brojnih funkcija ulja za podmazivanje, usled *kontaminacije* i *degradacije*, direktno se odražava na pojavu i intenzitet različitih mehanizama degradacije komponenti tehničkog sistema.

U skladu s tim:

- prisustvo vode u ulju za podmazivanje uzrokuje korozivne procese na kontaktnim površinama,
- prisustvo čvrstih kontaminata u ulju uslovljava intenzivno abrazivno habanje kontaktnih površina,
- promena fizičko-hemijskih karakteristika i razgradnja aditiva izazivaju gubitak osnovne funkcije ulja, koja se odnosi na razdvajanje direktnog kontakta površina radi smanjenja trenja i habanja.



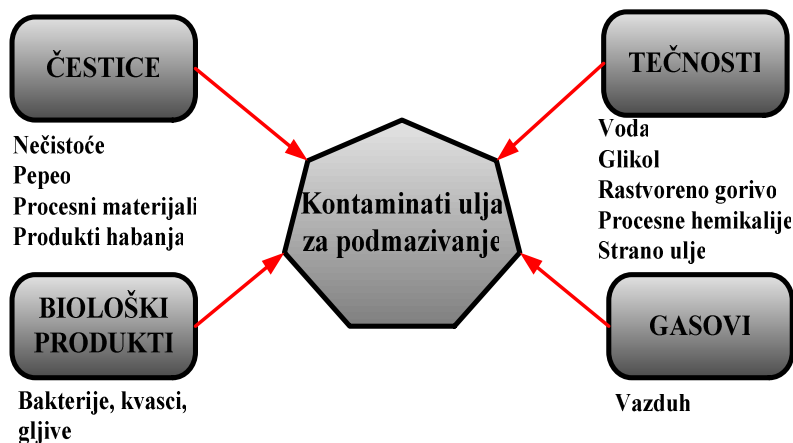
Slika 1 – Fizičko-hemijske aktivnosti i reakcije kod jednog motornog ulja

Dakle, u osnovi svi procesi koji narušavaju svojstva ulja tokom eksploatacije mogu se razvrstati u dve grupe:

- degradaciju i
- kontaminaciju.

Degradacioni procesi predstavljaju sve procese usled kojih ulje za podmazivanje gubi mogućnost uspešnog obavljanja brojnih funkcija u sistemu. U tom slučaju i kontaminacija se posmatra kao element degradacije.

Materije koje izazivaju kontaminaciju dospevaju u ulje spolja ili se generišu unutar sistema koji se podmazuje što ima za posledicu skraćenje eksploatacionog veka kako elementa sistema, tako i samog ulja. Pored ovoga, pojedini vidovi kontaminacije direktno pogoduju izazivanju degradacionih procesa.



Slika 2 – Kontaminati ulja za podmazivanje [5]

Prisustvo raznovrsnih kontaminata u ulju prikazano je na slici 2. Pregled kontaminirajućih materija sa osnovnim uzrocima kontaminacije i posledicama po sistem i ulje date su u tabeli 1.

Tabela 1

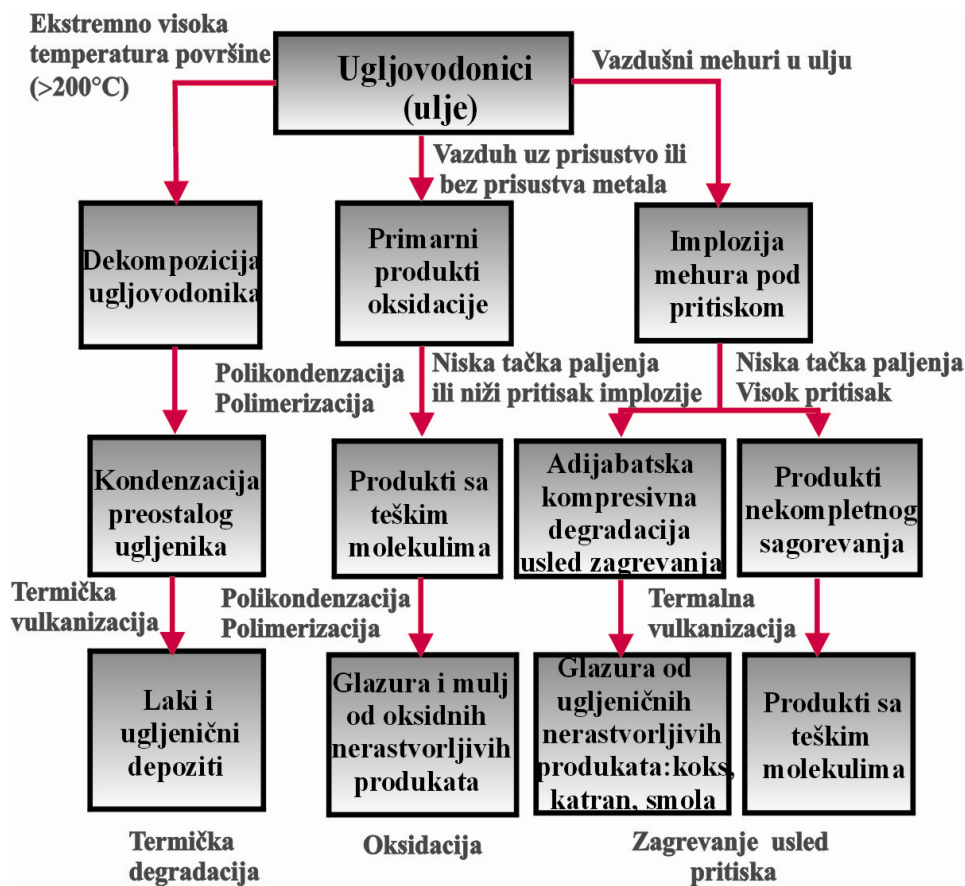
Kontaminacija ulja za podmazivanje

Degradaciona pojava	Uzrok pojave	Posledice
<b>Čvrstim materijalom</b>		
<b>Prljavština</b>	Okruženje	Pospešuje habanje, pogoršava svojstva maziva
<b>Metalni produkti habanja</b>	Odmakao stadijum procesa trenja i habanja u sistemu	Smanjenje pouzdanosti i veka trajanja sistema koji se podmazuje, pojačana oksidacija ulja
<b>Rđa</b>	Interakcija kiseonika, vode i gvožđa	Pospešuje habanje
<b>Produkti karbonizacije</b>	Pregrevanje ulja	Deponovanje u razvodima ulja i njihovo zapušenje
<b>Mulj i lak</b>	Produkti oksidacije postaju nerastvorljivi	Nastaju deponovani slojevi na kontaktnim elementima i kontrolnim ventilima
<b>Tečnostima</b>		
<b>Voda i procesni fluidi</b>	Curenje zaptivki i kondenzacija	Smanjuje efikasnost podmazivanja i pospešuje propadanje maziva
<b>Oksidacioni produkti</b>	Ekscesno visoke temperature i predug interval zamene	Preteče stvaranja čvrstih kontaminata
<b>Druga sredstva za podmazivanje</b>	Od drugih nekompatibilnih ulja i masti	Može dovesti do promene karakteristika maziva
<b>Dodaci mazivima</b>	Eventualno se dodaje pri održavanju	Može dovesti do promene karakteristika maziva
<b>Gasovima</b>		
<b>Vazduh</b>	Mešanje sa vazduhom iz okruženja	Penušanje, aeracija, nepouzdan odziv sistema, kavitacija

*Degradacija baznih ulja*, bez obzira na činjenicu da li su mineralnog ili sintetičkog porekla, odvija se u toku eksploatacije pod dejstvom:

- oksidacije,
- visokih temperatura i
- efekata zagrevanja pod pritiskom.

Mehanizmi degradacije ugljovodonika baznih ulja prikazani su na slici 3.



Slika 3 – Mehanizmi degradacije ugljovodonika baznih ulja

Degradaciju ulja ne izazivaju samo hemijske promene u baznom ulju, već i proces progresivnog gubitka osnovnih (podmazujućih) svojstava ulja, jer je najveći broj aditiva koncipiran da se troši ili menja tokom eksploatacije kako bi se sprečili procesi trenja i habanja [5]. Osim toga, neki aditivi su osetljivi na temperature, te dolazi do njihovog isparavanja ili uništavanja u uslovima pri kojima ulje vrši funkciju na temperaturama iznad propisanih. Najposle, zagrevanje, kontaminacija i gubitak svojstava aditiva može izazvati oštećenje samog baznog ulja.

Gubitak efikasnosti aditiva ima za posledicu gubitak mazivih svojstava ulja, prvenstveno aditiva koji inhibiraju neželjene pojave oksidacije rđe, aditiva koji štite kontaktne površine od habanja (antihabajući i EP aditivi) i aditiva namenjenih povećanju disperzivnosti. U tabeli 2 prikazane su vrste degradacije aditiva, njihovi uzroci i posledice.



Posebnu pažnju prilikom izbora i zamene ulja treba usmeriti na period uhodavanja sklopova. U tim uslovima, usled prelaska tehnoloških u radne reljefne površine, nastaje intenzivno abrazivno i adhezivno trošenje, uz kontaminaciju ulja sitnim česticama abraziva. Da bi se one uklonile i obezbedilo normalno podmazivanje, ulje se mora zameniti već nakon 500 do 1000 km, a samo u izuzetnim slučajevima i nakon više kilometara. Ovo isto se mora izvršiti i za slučaj da se iz bilo kog razloga moraju zameniti zupčanici u sklopu transmisije.

Tabela 2

Degradacija aditiva, uzroci i posledice

Gubitak svojstava	Uzrok pojave	Posledice
<b>Oksidacione kontrole</b>	Degradacija aditiva koji inhibiraju pojavu oksidacije	Promena reoloških osobina maziva, generisanje depozita, kiseli produkti izazivaju koroziju metala
<b>Inhibicije rđe</b>	Degradacija aditiva koji inhibiraju pojavu rđe	Mazivo gubi mogućnost daljnjeg sprečavanja nastanka rđe
<b>Nošenja visokih pritisaka</b>	Degradacija EP aditiva	Mazivo gubi mogućnost daljnjeg sprečavanja pojava adhezivnog habanja kontaktnih površina
<b>Disperzivnosti</b>	Disperzant biva preopterećen tečnim i čvrst. kontaminatima	Formiranje čvrstih kontaminata (mulj, lak)

Osnovna uloga maziva koja se manifestuje sprečavanjem direktne interakcije površina u relativnom kretanju i neposredno učešće u kontaktnim procesima, daje mu poseban značaj sa stanovišta funkcionisanja, održavanja i veka elemenata i sistema kojima ti elementi pripadaju.

Dakle, za vreme procesa eksploatacije dolazi do promene radnih i triboloških osobina svih komponenti tehničkog sistema, pri čemu čvrsti elementi trpe fizičke, a mazivo i fizičke i hemijske promene. Brzina i stepen degradacionih procesa zavise od radnih uslova (opterećenje, brzina elemenata u kretanju, temperatura i dr.). Činjenica da trenje i habanje svih elemenata sklopova tehničkog sistema kao tribomehaničkih sistema nastaju pod istim okolnostima iskorišćen je za uspostavljanje funkcionalne veze između radnih uslova i triboloških procesa. Upravo na ovoj činjenici bazira se dijagnostika stanja maziva, a na osnovu nje i dijagnostika svih elemenata pojedinih sklopova sistema.

U skladu sa prethodno izloženim promene koje se javljaju u ulju mogu se podeliti na:

- hemijske promene u baznom ulju,
- fizičko-hemijske promene u aditivima i
- promene u ulju usled pojave kontaminata.

## Osnovni ciljevi analize i monitoringa ulja tokom eksploatacije motornog vozila

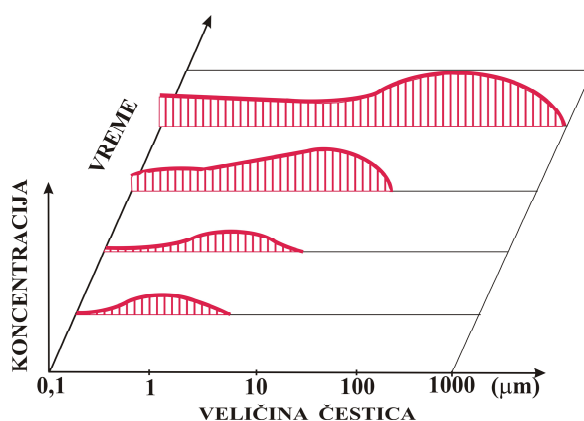
Osnovni ciljevi analize i monitoringa ulja tokom eksploatacije motornog vozila su:

- analiza procesa habanja elemenata sistema,
- analiza procesa kontaminacije maziva,
- praćenje promena u svojstvima maziva radi optimizacije veka upotrebe i kontrole funkcionalnosti sistema (npr. prodor kontaminata, stanje temperature i pritiska, efikasnost prečistača i dr.) i
- utvrđivanje stanja oštećenja i uzroka otkaza.

### *Analiza procesa habanja*

S obzirom na to da se radi o neizbežnom procesu rada sklopova i elemenata vozila, habanje kao složen fenomen predstavlja osnovni i najvažniji uzročnik pojave oštećenja i kvarova kod ovih sistema.

Za dijagnostiku stanja sklopova vozila ocena početka intenzivnog habanja je od bitnog značaja za prognoziranje težih oštećenja. Osim toga, istraživanjima je utvrđeno da se intenzivno habanje karakteriše naglim porastom količine metala u ulju i porastom sadržaja produkata habanja većih dimenzija, što predstavlja prvu indikaciju za oštećenje površina. U oblasti normalnog habanja čestice metala, produkti habanja, su male po svojim dimenzijama i priraštaj količine je konstantan u toku jedinice vremena. Ilustracije radi na slici 4 je prikazana promena koncentracije i veličine čestica u toku vremena [6].



Slika 4 – Promena koncentracije i veličine čestica u toku vremena

Vrsta habanja se može proceniti na osnovu karakterističnog oblika čestice. Tako se adhezivno habanje pri normalnim uslovima rada manifestuje pločastim česticama malih dimenzija, dok su kod abrazivnog habanja produkti slični strugotini pri rezanju metala i mogu imati oblik spirale, uvijene žice i sl. Habanje usled zamora materijala uopšteno, daje čestice loptastog oblika.

Pored toga, dimenzije čestica utvrđuju dijagnozu stanja podmazanosti dodirnih površina slika 4, tako da čestice sledećih dimenzija ukazuju na:

- < 5  $\mu\text{m}$  – hidrodinamičko podmazivanje,
- < 15  $\mu\text{m}$  – granično podmazivanje i
- < 150  $\mu\text{m}$  – razaranje uljnog filma i pojava čvrstih adhezivnih mikrospojiva i
- < 1000  $\mu\text{m}$  – izrazitno veliko (havarijsko) habanje.

Na osnovu prethodnih razmatranja sledi da je za procenu habanja i prognoziranje mogućih oštećenja neophodno da se prate: *količina i vrsta metala u ulju, oblik, koncentracija i distribucija čestica po veličini*.

Dozvoljene količine elemenata u motornom ulju [7], koje se uzorkuje, prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3

Dozvoljene količine elemenata u motornom ulju koje je uzorkovano

Elementi	mg/kg (ppm)	Poreklo
Fe	100	Cilindri, klipovi, ležajevi, zupčanici, podizači ventila, bregasta osovina, kolenasto vratilo, osovine
Al	20	Klipovi, Al-Sn ležajevi, turbokompresor
Ag	2–3	Posrebrani delovi, ležajevi, osovine
Cr	30	Hromirani delovi, klipovi, cilindri, podizači ventila, izduvni ventili, klipnjača
Cu	40	Cu-Pb ležajevi, čaure, hladnjak ulja, bregasta osovina, razvodni mehanizam (ventili sa sistemom za otvaranje i zatvaranje), brizgaljka, regulator
Pb	50	Cu-Pb ležajevi, benzin, aditivi
Sn	25	Delovi od bronzne, ležajevi, klipovi
B	20	Antifriz
Na	20	Antifriz
Ca	50	Iz atmosfere
Si	40	Prašina iz atmosfere
Zn, Mg, Mo		Iz aditiva

Analiza sadržaja različitih metala prisutnih u mazivu je veoma značajna. Čestice metala su abrazivne, a ponašaju se i kao katalizatori oksidacije ulja. U motornim uljima, poreklo elemenata može biti iz aditiva, od habanja, iz goriva, iz vazduha i iz tečnosti za hlađenje. Metali iz aditiva mogu biti Zn, Ca, Ba, ili Mg i ukazuju na potrošenost aditiva. Metali koji potiču od habanja

su: Fe, Pb, Cu, Cr, Al, Mn, Ag, Sn i ukazuju na povećano habanje u tim sklopovima. Elementi koji potiču iz rashladne tečnosti su Na i B, a povećani sadržaj ukazuje na prodor rashladne tečnosti u mazivo. Povećan sadržaj Si ili Ca, koji potiču iz vazduha, ukazuje na neispravnost filtera za vazduh.

Habanje (trošenje) delova je glavni uzročnik neispravnosti u procesu eksploatacije mehaničkih sklopova vozila. Karakteristično za habanje je promena oblika i dimenzija delova odnosno onih njegovih površina koje se međusobno dodiruju (radnih površina). Zbog trenja dolazi do trošenja dodirnih površina što se odražava kroz povećanje zazora pokretnih spojenih delova i promeni međusobnih odnosa, a to ima za posledicu narušavanje propisanih međusobnih odnosa kako sklopova, tako i vozila u celini.

Promena mera i oblika delova u procesu eksploatacije tehničkih sistema, dovodi do preraspodele postojećih opterećenja i povećanja kontaktnih pritisaka, pri čemu se javljaju 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.

Pri realizaciji radnog ciklusa u cilindru motora oslobađa se određena količina toplote koja se koristi za dobijanje rada. Sam proces transformacije hemijske energije goriva u toplotnu i toplotne energije u mehanički rad, praćen je povećanim mehaničkim i termičkim naprežanjem delova koji čine radni prostor motora (cilindar, klipna grupa, cilindarska glava, i dr.). Kod dizel-motora maksimalna temperatura tokom procesa sagorevanja se kreće do 2000–2300°C dok kod oto-motora i do 2500–2800°C.

### *Analiza procesa kontaminacije maziva*

Kontaminati predstavljaju destruktivne produkte dospele u mazivo iz vana zbog neefikasnosti sistema prečišćavanja ili njegove kontaminiranosti. Kontaminati, se takođe mogu pojaviti zbog fizičko-hemijskih procesa koji se javljaju u ulju tokom eksploatacije. Veoma su destruktivni i negativno utiču na funkcionalnost elemenata sistema.

Blagovremenim uočavanjem kontaminata metodama monitoringa ulja mogu se prognozirati oštećenja i kvarovi komponenta sistema, što opet omogućava smanjenje destruktivnog delovanja i visok stepen uštede izdvajanja sredstava za održavanje.

U motornom ulju prisutne su različite vrste kontaminata, kao što su:

– **čad**: povećava viskoznost i gustinu, troši velike količine disperzanta, sa toplim talozima gradi koks, ponaša se abrazivno, dovodi do zaribavanja motora,

– „**topli talozi**“: povećavaju viskoznost i gustinu ulja, sa česticama čađi grade koks, troše detergente i disperzante, pogoršavaju podmazivanje i dovode do zaribavanja motora,

- **nesagorelo gorivo**: spira uljni film sa površine radnih elemenata i smanjuje viskoznost ulja, snižava tačku paljenja, pogoršava podmazivanje i zaptivanje motora, omogućuje veće prodivavanje gasova u karter, degradira ulje i dovodi do zaribavanja motora,
- **oksidacioni proizvodi goriva**: većina je kisela i korozivna; smanjuju baznu rezervu ulja (TBN) i ubrzavaju degradaciju,
- **sumporni i azotni oksidi ( $SO_2$  i  $NO_x$ )**: anhidridi jakih kiselina, drastično smanjuju baznu rezervu ulja i veoma su korozivni,
- **voda**: hidrolizuje neke aditive i degradira ih, gradi emulziju i penu, povećava viskoznost i gustinu ulja, brzo i potpuno degradira ulje i
- **opiljci metala**: ponašaju se abrazivno, katalizuju oksidaciju ulja. Zrna-sti oblik ovih opiljaka ukazuje na zamor materijala, a ljuspasti na habanje.

### *Praćenje promena u svojstvima maziva*

U toku eksploatacije ulje za podmazivanje je izloženo brojnim promenama koje utiču na režim eksploatacije i vek tehničkog sistema. Uza-jamni efekti su povratni usled čega promene kvaliteta ulja utiču na uslove eksploatacije. U pogledu analize ulja može se pokazati u kakvom se stanju nalaze delovi, odnosno:

- kakvi su uslovi rada,
- verovatnoća eventualnih oštećenja delova u uslovima nenormalnog habanja,
- da li je ulje koje se primenjuje usaglašeno sa uslovima rada sistema, i
- da li je vreme dolivanja i interval zamene ulja prilagođen uslovima rada, itd.

Analiza svojstava maziva koristi se radi utvrđivanja osnovnih karakteristika ulja za podmazivanje. Kontrolom maziva tokom eksploatacije vrši se procena nastalih promena upotrebljavanog maziva u odnosu na referentnu veličinu za koje je uzeto neupotrebljavano ulje. Analizom ulja se određuje optimalan period zamene i stanja elemenata sistema što direktno utiče na produženje veka njegovih elemenata i maziva. Za analizu stanja ulja za podmazivanje koriste se standardne metodologije i uređaji i to najčešće za ispitivanje fizičko-hemijskih karakteristika, a to su: viskoznost, tačka paljenja, tačka stinjavanja, totalni bazni broj, neutralizacioni broj, sadržaj nečistoća i dr. Destruktivne primese u ulju, odnosno kontaminati, mogu biti uzrok otkaza elemenata tehničkog sistema. Uprkos preduzetim merama zaštite (pre svega zaptivanje) različiti kontaminati poput vlage, različiti kiselinski produkti, kao i čvrsti kontaminati mogu se pojaviti u sklopovima sistema. Zato je potrebna njihova kontrola, primenom standardnih metoda i procedura kako bi se neželjeni efekti izbegli ili sprečili.

Potreba za brzom i relativno tačnom kontrolom ulja rezultuje primenom ekspresnih (brzih) metoda. Međutim, treba istaći da se na ovaj način više prati uticaj tehničkog sistema na ulje nego uticaj ulja na sistem.

Tri su osnovna načina kojima se vrši analiza ulja:

1. brze elementarne analize kojima se proveravaju promene u ulju,
2. potpune kontrole, kao što je spektrometrija, filtracija i
3. standardne analize i testovi.

Promene stanja u ulju tokom upotrebe mogu biti registrovane sa nekoliko testova koji ukazuju na:

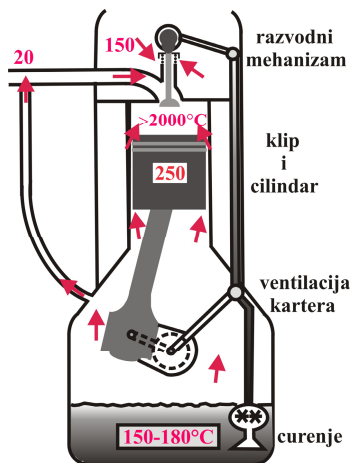
- količinu taloga u ulju,
- sposobnost ulja da razbije ovaj talog (važno kao pokazatelj efikasnosti i prisustva aditiva),
- razređivanje ulja gorivom (motorna ulja),
- hemijske promene u ulju, uzrokovane oksidacijom ili korozijom i
- stepen istrošenosti raznih metalnih delova.

Intenzivna pohabanost delova motora praćena je gubitkom ulja, padom pritiska podmazivanja i prodorom gasova u karter. Na veličinu svakog od ovih pokazatelja i karakter njihove promene u većoj ili manjoj meri utiče habanje delova glavnog motornog mehanizma, tj. cilindarske košuljice i klipne grupe.

U sasvim očigledne, ali i među najteže merljive kriterijume za gubitak pogonskih i upotrebnih karakteristika vozila i motora spada porast potrošnje ulja.

U početnom periodu rada novog motora potrošnja ulja je povećana. Ulje uvek dospeva u cilindar i uvek jednim delom sagoreva i termički se razlaže na zidovima cilindarske košuljice. Tokom eksploatacije, kako se uzajamno prilagođava rad delova, tako se i potrošnja ulja ustaljuje na jednu minimalnu vrednost za taj tip konstrukcije i tu vrstu radnih uslova.

Za današnje četvorotaktne motore 95% potrošnje maziva je u sklopu klipna grupa-cilindar. Preostalih, manje od 5%, se troši kroz zatore ventila, kroz odušku kartera, na slabo zaptivnim mestima i ako postoje u turbo-grupama. Unutrašnja cirkulacija ulja u motoru je prikazana na slici 5. Na slici 5 su date prosečne temperature u °C kako bi se prikazali uslovi rada maziva.



Slika 5 – Unutrašnja cirkulacija ulja u motoru

## *Utvrđivanje uzroka oštećenja ili otkaza*

U postupku analize uzroka oštećenja elemenata sklopova vozila značajan doprinos daju i informacije dobijene analizom habanja, ispitivanjem karakteristika ulja, zatim podaci o trenutnom tehničkom stanju sistema i potrošnja ulja. Postotak tačnosti se povećava ako su ispitivanja ostvarena permanentno u određenom vremenskom intervalu, odnosno uspešnost dijagnostike sistema se povećava sveobuhvatnom analizom svih relevantnih faktora.

Efikasni program praćenja maziva sadrži tri osnovne kategorije ispitivanja a to su:

- ispitivanje svojstava fluida,
- ispitivanje sadržaja kontaminata i
- ispitivanje sadržaja, vrste, oblika i veličine produkata habanja.

Monitoringom ulja, odnosno analizom dobijenih rezultata na osnovu utvrđenih dijagnostičkih parametara, može se oceniti trenutno stanje i/ili prognozirati potencijalni hronični problem pojedinog dela vozila, ili pak da se upotpuni zaključak i iznađe razlog zbog koga je došlo do otkaza komponente vozila.

Tako, na primer, pad viskoznosti i tačke paljenja kao jedne od veličina dijagnostičkih parametara posledica je prodora goriva u uljni sistem, što ukazuje na nepravilnosti u sistemu za napajanje ili na neadekvatne uslove eksploatacije motora.

Ocena uspešnosti realizacije procedure analize ulja zavisi od njegove formulacije, odnosno definisane strategije, od njegovog permanentnog i decidnog sprovođenja, te na kraju stručne interpretacije dobijenih rezultata, što pruža mogućnost donošenja ispravnog tehno-ekonomskog zaključka. Pomenuta konstatacija pokazuje da se opravdanost ulaganja finansijskih sredstava u analizu ulja ogleda u povećanju pouzdanosti i ekonomičnosti motornih vozila. To znači da uspešno i precizno implementirana procedura opravdava aktivnosti i uložena finansijska sredstva.

Procedura dijagnostike stanja ulja motornih vozila sa aspekta fizičko-hemijskih i triboloških karakteristika sadrži niz neophodnih koraka od izbora sklopova, prikupljanja tehničkih podataka i informacija, tribološke analize stanja, izbora metoda ispitivanja uzoraka ulja, pa do obrade dobijenih informacija, interpretacije dobijenih rezultata i izvođenja zaključaka.

## Monitoring stanja kroz testove analize ulja

Postoji veliki broj različitih testova u okviru analize ulja koji se primenjuju pri proceni njegovog stanja. Testovi moraju pokriti tri oblasti od interesa: stanje tehničkog sistema, stanje nečistoća u mazivu i stanje maziva.

Sa aspekta *stanja tehničkog sistema* posebnu pažnju treba obratiti na pojavu i trend promene broja metalnih čestica u ulju. Drugi fokus bi bilo *stanje maziva*, gde je pažnju potrebno usmeriti na promenu viskoznosti, povećanje oksidacije i trošenja aditiva. Treći fokus bi bilo *stanje nečistoća* u ulju, gdje je potrebno pažnju usmeriti na brojnost čestica, sadržaj vode i metalnih nečistoća. Teoretski, analize ulja podeljene su u tri klase. U stvarnosti sve tri klase monitoringa stanja su međusobno povezane i moraju se posmatrati kao celina. Tako na primer, povećanje viskoznosti može biti smernica procesa oksidacije maziva. Međutim, to može biti pogrešan zaključak, ako nema pokazatelja trenda povećanja oksidacije dobijenih preko analize vrednosti kiselinskog broja (Acid Number-AN) i infracrvene analize na principu Furijerove transformacije (FTIR).

Vršeci monitoring stanja maziva, u mogućnosti smo izvršiti osveženje ili zamenu maziva pre nego što nastupe ozbiljnija oštećenja tehničkog sistema.

Ako je oštećenje primećeno u toku rada, zbog nečistoća u ulju ili problema vezanih za mazivo, stanje tehničkog sistema se može kontrolisati i odmah izvršiti prekid njenog rada u cilju smanjenja oštećenja.

Postoje dva tipa alarma tj. upozorenja koja se koriste u analizi ulja: apsolutni i statistički alarm. Efikasna analiza ulja zasniva se na kombinaciji oba tipa.

Granica upozorenja predstavlja apsolutni alarm. Statistički trend, uzima u obzir promenljivost, koja je posledica uzorkovanja ulja, zaprljanja ulja i sl., te predstavlja standardnu devijaciju (odstupanje). Odstupanje od ove normalne promenljivosti signalizira pojavu ozbiljnijih problema. Ovo odstupanje predstavlja prvi znak za poduzimanje mera u cilju rešavanja nastalog problema. Kako se trend odstupanja približava granici upozorenja potrebno je poduzeti mere kao što je zamena ili prečišćavanje ulja ili pregled tehničkog sistema.

Test može obuhvatiti kontrolu sadržaja metalnih čestica, kontrolu viskoznosti ili neke druge parametre. Oblast normalne promenljivosti uzima u obzir male varijacije nastale usled analitičke tačnosti, homogenosti uzorka, itd. Uspostavljanje statističkih alarma, koji obezbeđuju najranije moguće upozorenje, bez lažnih alarma, je teško ostvariti. Faktori kao što su dodavanje ili zamena ulja, zamena filtera i tehnika uzorkovanja utiču na tačnost rezultata.

Testovi koji su najčešće korišćeni, prilikom monitoringa stanja tehničkog sistema, jesu:

- spektrometrijska analiza,
- analitička ferografija,
- Rotrode Filter Spektroskopija (RFS),
- infracrvena analiza (FT-IR),
- viskoznost,
- ukupni kiselinski broj (TAN),
- ukupni bazni broj (TBN),
- količina vode i čestica.

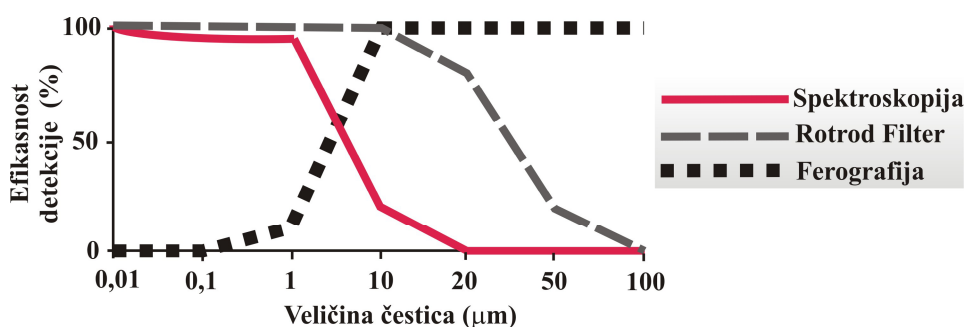


## Spektrometrijska analiza

Poslednjih 40 godina ili približno toliko, spektrometrijska analiza se primenjivala za analizu uzoraka korišćenog ulja kao tehnika za monitoring stanja sistema (uslovi režima monitoringa i prediktivnog održavanja koji se danas uobičajeno koristi). Spektrometrijska analiza određuje elementarnu koncentraciju raznovrsnih habajućih metala, kontaminata, i aditive koji se pojavljuju u uzorcima korišćenog ulja. Rezultati su obično izraženi u ppm. Komercijalne laboratorijske analize ulja daju podatke za oko 20 različitih elemenata. Atomska emisiona spektroskopija usmerena je na pripremu uvida u nenormalnu brzinu habanja, mada uostalom tehnike koje su poznate ukazuju na uvećanu osetljivost u pogledu veličine čestica.

Spektrometrijska analiza je tehnika za utvrđivanje i kvantificiranje metalnih čestica nastalih habanjem, zaprljanjem i sl. Uzorak ulja se pobuđuje tako da svaki element emituje ili apsorbuje određenu količinu energije što ukazuje na koncentraciju elemenata u ulju.

Rezultati predstavljaju koncentraciju svih rastvorenih metala i čestica. Oprema za spektrometrijsku analizu danas predstavlja standardnu opremu laboratorija za analizu ulja, a daje relativno brzo i tačno informaciju o stanju tehničkog sistema, zaprljanju i habanju.



Slika 6 – Efikasnost detekcije

Nekoliko vrsta habanja (habanje kao posledica raspadanja materijala pod uticajem toplote, klizna habanja i režno habanje) generiše velike čestice koje se ne mogu otkriti spektroskopijom. Veličina čestice pri kojoj spektrometri počinju da gube sposobnost detekcije zavisi od brojnih faktora kao što su vrsta i tip spektrometra. Gledajući generalno spektrometri gube sposobnost detekcije čestica prečnika između 1 i 10 μm (slika 6). Ovo je glavni nedostatak spektrometrijske analize.

Standardni elementi kod analize čestica habanja motornog ulja

Ispitani standardni elementi kod analize čestica habanja				
Kontaminat ili aditiv	Habajući metali	Rashladno sredstvo ili aditiv	Aditivi ulja	Kontaminat ili habajući metal
Silicijum (Si)	Gvožđe (Fe) Aluminijum (Al) Hrom (Cr) Bakar (Cu) Olovo (Pb) Kalaj (Sn) Nikal (Ni) Srebro (Ag)	Natrijum (Na) Bor (B)	Cink (Zn) Fosfor (P) Kalcijum (Ca) Magnezijum (Mg) Barijum (Ba) Molidben (Mo)	Vanadium (Va)

### *Analitička ferografija*

Analitička ferografija je tehnika koja izdvaja pohabane magnetne čestice iz ulja. Ove čestice se sležu na staklenoj površini poznatoj kao ferogram. Mikroskopsko ispitivanje omogućava da odredimo tip habanja, a verovatno i izvor habanja u tehničkom sistemu. Analitička ferografija je izuzetan indikator izrazito povećanog habanja delova od nebojenih metala, ali je neprikladna u slučaju habanja delova od obojenih metala.

Test je od izuzetne koristi kod već uspostavljenog procesa habanja. Rezultati uključuju izvještaj o veličini, morfologiji i količini čestica od nebojenih metala i nečistoća.

Ferografija je dosta rasprostranjena tehnologija analize pohabanih čestica. Predstavlja dijagnostičko-prognozirajuću tehniku koja nudi pogodan način tačnog procenjivanja on-line stanja podmazivanih delova u kontaktu bez isključivanja tehničkog sistema. Jedna automatizovana verzija ove tehnike je DR (Direct Read) ferografija koja meri odnos krupnih i sitnih čestica u ostacima uljnog uzorka. Mala količina uzorka se razređuje rastvaračem i pušta da teče kroz malu kapilarnu cev koja se kreće kroz magnetno polje. Dva optička senzora su nezavisno jedan od drugog postavljeni na ulaz i neznatno usmereni niz kapilarnu cev mereći gustoću čestica nebojenih metala sabranih na oba mesta. Ovi podaci se mogu koristiti pri određivanju koncentracije pohabanih čestica i indeksa ozbiljnosti situacije.

Kada se sedamdesetih godina pojavio DR ferogram, doživeo je veliki uspjeh, zahvaljujući sposobnosti da otkriva kako velike tako i male čestice nebojenih metala u ulju, kao i sposobnošću određivanja njihovog odnosa koji karakteriše pojavu povećanog habanja kod sistema sa rotacionim delovima. DR ferografija je i dalje bazirana na magnetnom odvajanju, tako da se ovaj princip ne može koristiti u slučaju čestica od obojenih

metala bilo koje veličine, kao i u slučaju anorganskih nemetalnih čestica (pesak, nečistoće, i sl.). Ovaj nedostatak dolazi do izražaja posebno kod monitoringa opreme sa kritičnim dijelovima od obojenih metala. Zbog toga, tradicionalna spektroskopija, ostaje sastavni deo analize ulja upravo zbog sposobnosti da otkrije sitne čestice obojenih metala.

Kombinacija DR ferografije i spektrometra je do pojave Rotrode Filter Spektroskopije (RFS) bila popularna metoda ekranizacije uljnih uzoraka radi detekcije povećanog habanja. Međutim, čak i u kombinaciji, ove metode ne mogu otkriti krupnije čestice obojenih metala.

### *Rotrod filter spektroskopija (RFS)*

Rotrod filter spektroskopija je prvi put predstavljena 1992. godine. Ova spektrometrijska tehnika detektuje krupne metalne čestice i nečistoće u uljnom uzorku. Prečnik ovih čestica je do 25  $\mu\text{m}$ . Ove krupne čestice su od posebnog značaja, jer predstavljaju prve indikatore povećanog intenziteta habanja.

RFS predstavlja jednu poboljšanu spektroskopsku metodu analize korišćenog ulja za monitoring stanja odnosno predviđanja potrebnog održavanja, bez ograničenja po veličini ili tipu čestice kao u slučaju kombinovane spektrohemijske metode i DR ferografije. Superiornija je u odnosu na DR ferografiju, jer ima mogućnost detekcije čestica kako neobojenih metala tako i obojenih, kao i nečistoća. Efikasnost detekcije opada sa porastom prečnika čestica iznad 25  $\mu\text{m}$ . Metoda koristi spektrometar sa elektrodom u obliku rotacionog diska, poznat kao RDE (Rotating Disk Emission) spektrometar, koji obezbeđuje spektrografijsku analizu ulja (SOA).

RDE spektrometar sastoji se od karbonskog diska koji je pritisnut na kraj rotirajućeg vratila. Povišen stepen habanja prouzrokuje značajno povećanje koncentracije i veličine pohabanih čestica. Koristeći poroznu grafičku „rotrodu“ kao filtrirajući medij krupne čestice se apsorbuju i podvrgavaju RDE spektroskopiji dobijajući više-elementnu analizu uljnog uzorka. Prvenstveno se meri koncentracija i veličina ovih apsorbovanih krupnih čestica nezavisno od sitnih i rastvorenih čestica nečistoća u uzorku. Kombinujući rezultate analize krupnih čestica sa konvencionalnom RDE analizom rastvorenih i sitnih čestica u uljnom uzorku može se dobiti kompletna slika analize pohabanih čestica određenog tehničkog sistema.

### *Infracrvena analiza (FT-IR)*

Infracrvena spektroskopija furijerovom transformacijom (FT-IR) je spektrometrijska tehnika za detekciju organskih nečistoća, vode i produkata degradacije ulja u uljnom uzorku. Vršiti se kontrola degradacije

maziva (oksidacija, nitracija, sulfatacija, trošenje aditiva) i tečnih nečistoća (voda, glikol, razblaživanje maziva gorivom). Tokom radnog veka maziva, akumuliraju se produkti oksidacije, prouzrokujući degradiranje ulja i u većini slučajeva lagani porast njegove kiselosti. Ako se oksidacija pojavi u većoj meri, mazivo će prouzrokovati koroziju kritičnih površina uređaja. Povećanje oksidacije dovodi do većeg „oksidacionog broja“. Slično tome, „nitracioni broj“ ukazuje na nivo jedinjenja nitrogena u ulju prouzrokovanih vezivanjem atoma azota (česta pojava kod motora na prirodni gas). Pojave kao što su beljenje ulja, taloženje mulja, lepljivi klipni prsteni i začepljenje filtera javljaju se u sistemima sa problemom oksidacije i/ili nitracije.

FT-IR spektroskopija takođe, utvrđuje kontaminaciju ulja vodom, glikolom antifrizom, naslagama čađi, razblaživanja ulja gorivom. Postoje preporuke proizvođača vezano za oksidacione brojeve i tečne nečistoće.

### Viskoznost

Viskoznost je veličina koja predstavlja meru unutrašnjeg otpora ili trenja koje se javlja u tečnosti prilikom strujanja a predstavlja osnovno fizičko svojstvo ulja za podmazivanje. Viskoznost direktno utiče na formiranu debljinu sloja maziva, gubitke usled trenja i zagrevanja. Od veličine viskoznosti, kod motora SUS, zavisi mogućnost zaptivanja uljem, potrošnja ulja, mogućnost pokretanja motora pri niskim temperaturama, itd.

Mazivo mora posedovati odgovarajuće karakteristike, kako bi osiguralo adekvatno razdvajanje kontaktnih površina koje se podmazuju pri različitim radnim temperaturama.

Izbor veličine viskoznosti ulja zavisi od više faktora kao što su: radna temperatura, temperatura okoline, opterećenje, brzina pokretnih delova i drugi zahtevi. U skladu sa time se u okviru istog kvaliteta jedne grupe ulja, ona proizvode sa različitim veličinama viskoznosti.

U praksi se fizičko hemijske karakteristike ulja određuju vrednostima *dinamičke viskoznosti* ( $\eta$ ), *kinematske viskoznosti* ( $\nu$ ) i *indeksa viskoznosti* (IV) koji predstavlja empirijski broj koji pokazuje tendenciju promene viskoznosti sa promenom temperature. Indeks viskoznosti (IV) je mera otpora maziva usitnjavanju njegovih molekula sa porastom temperature, a predstavlja važnu osobinu maziva na nižim temperaturama. Tako na primer, zbog pumpabilnosti maziva zahteva se njegova manja viskoznost, dok s druge strane zbog obezbeđenja potrebne moći nošenja mazivnog filma na radnoj temperaturi, zahteva se njegova dovoljna gustoća. U slučaju motornih ulja, ispunjenju ovih zahteva uspešno potpomažu poboljšivači indeksa viskoznosti bazirani na polimerima.

Uobičajeno se vrednost indeksa viskoznosti kreće u granicama od 0 do 100. Pri tome  $IV = 0$  označava da je promena veličine viskoznosti značajna, a  $IV = 100$  da su to ulja sa manje izraženom promenom viskoznosti u zavisnosti od promene temperature. Multigradna (višesezonska) motorna ulja i neke vrste sintetskih ulja imaju indeks viskoznosti i veći od 100. Uopšteno, veći indeks viskoznosti označava manju tendenciju promene viskoznosti sa promenom temperature, i obrnuto.

*Dinamička viskoznost (Dynamic-Absolute-Viscosity)* dobija se primenom Njutnovog zakona koji uspostavlja vezu između napona smicanja u tečnosti i gradijenta brzine, odnosno:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \Rightarrow \eta = \frac{\tau}{\left(\frac{du}{dy}\right)} \quad (1)$$

gde je:

$\tau$  – napon smicanja u fluidu,

$du/dy$  – gradijent brzine u pravcu normalnom na pravac strujanja fluida,

$\eta$  – dinamička viskoznost.

Izvedene jedinice su: Paskal sekunda,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ , i milipaskal sekunda,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ , dok se ranije primenjivala jedinica centi Poaz:  $\text{cPa} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , a meri se po ASTM D 2983.

*Kinematska viskoznost (Kinematic Viscosity)* ( $\nu$ ) predstavlja odnos dinamičke viskoznosti ( $\eta$ ) i gustine ( $\rho$ ) maziva na posmatranoj temperaturi:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

Izvedene jedinice su:  $\text{m}^2/\text{s}$  i  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Ranije se koristila jedinica centi Stoks:  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

Kinematska viskoznost se određuje po ekvivalentnim metodama: ISO 3104; ASTM D445; DIN 51562; JUS B. H8.022.

Tečnosti čije strujanje je u saglasnosti sa navedenim zakonom nazivaju se *njutnovski fluidi*. Odlikuje ih stabilnost viskoznosti za određenu temperaturu i pritisak, odnosno kod njih je viskoznost funkcija samo od temperature i pritiska.

U tabeli 5 su, na osnovu preporuka, date orijentacione vrednosti viskoznosti za ulja različite namene.

Opseg viskoznosti ulja za različite namene

Namena ulja	Viskoznost na radnoj temperaturi [mm <sup>2</sup> /s]
Ulja za instrumente i satne mehanizme	5–20
Ulja za šivaće mašine	10–25
Motorna ulja	10–50
Ulja za turbinska postrojenja	10–50
Ulja za hidraulične sisteme	20–100
Ulja za kotrljajne ležaje	10–300
Ulja za klizne ležaje	20–1500
Ulja za zupčanike:	
– sporohodi cilindrični zupčanici sa pravim i kosim zupcima, konični zupčanici	200–800
– cilindrični zupčanici sa ravnim i kosim zupcima, konični zupčanici; srednje brzohodnosti	50–150 15–100
– zupčanici visoke brzohodnosti	50–600
– hipoidni zupčanici	200–1000
– pužni zupčanici	
Maziva za otvorene zupčanike	100–50000

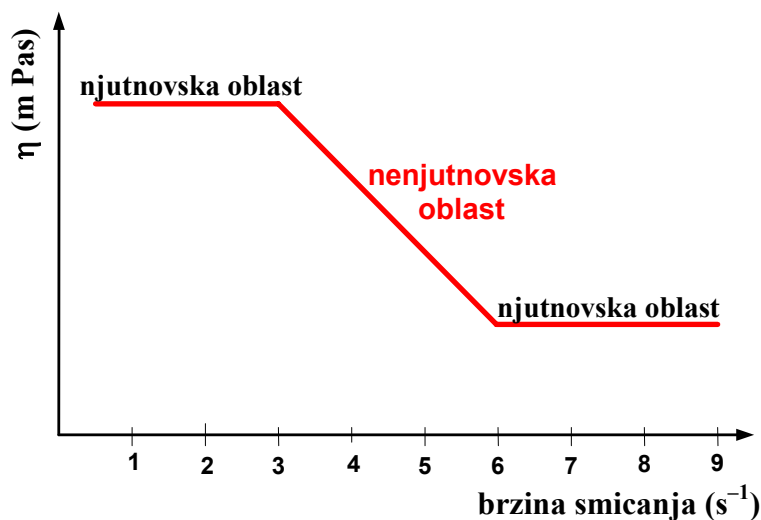
Viskoznost ulja opada sa porastom temperature brzo i po određenoj zakonitosti i obrnuto sa padom temperature viskoznost raste. U toku eksploatacije poželjno je da promena viskoznosti pri promeni temperature bude što manja, jer ukoliko su tokom rada temperaturni režimi promenljivi i izazivaju velike promene viskoznosti, mogu nastati poremećaji u funkcionisanju sistema, čija manifestacija je povećano trenje, habanje i oštećenje.

Nenjutnovske fluide predstavljaju ona maziva kod kojih je zavisnost između napona na smicanje i gradijenta brzine nelinearna, odnosno kod kojih viskoznost ne ostaje stalna veličina u uslovima zadate temperature i pritiska. To znači da viskoznost nije funkcija samo temperature i pritiska, već i promene brzine smicanja. Mnoga maziva pokazuju svojstvo nenjutnovskih fluida. Ovde spadaju razne emulzije i suspenzije, ulja sa polimernim aditivima (multigradna ulja) i mazive masti.

Veličina viskoznosti pri određenom gradijentu brzine smicanja označava se kao prividna viskoznost, a pad viskoznosti usled porasta brzine smicanja kao strukturna viskoznost. *Prividna viskoznost (Apparent Viscosity)*, opisuje ponašanje ulja na niskim temperaturama i određuje se na

uređaju koji oponaša startovanje u hladnim uslovima (CCS – *Cold Cranking Simulator* za motorna ulja ili po *Brookfield*-u za menjačka i ATF ulja). Opis uređaja prikazan je u standardnim ekvivalentnim metodama: DIN 51377 i ASTM D 2602. Za motorna ulja i ulja za zupčaste prenosnike posebno je značajna strukturna viskoznost, što je prikazano na slici 7.

Za vreme početnog rasta brzine smicanja multigradnja ulja zadržavaju svoj njutnovski karakter. Nakon toga ulaze u nenjutnovsku oblast koja karakteriše znatan pad viskoznosti. Ukoliko se rast brzine smicanja nastavi ponovo ulaze u njutnovsku oblast, koja se razlikuje od prvobitne. U ovoj oblasti ne dolazi do dalje deformacije prisutnih molekula polimera ili drugih velikih molekula, odnosno više se ne orjentišu u smeru povoljnog strujanja. Veličina ove reverzibilne promene viskoznosti uslovljena je pre svega strukturnom viskoznošću i zavisi od promena temperature i pritiska. Relativni pad viskoznosti raste sa snižavanjem temperature i rastom pritiska i kod nekih ulja može iznositi 10 ÷ 70%.



Slika 7 – Zavisnost viskoznosti multigradnih ulja od brzine smicanja

Prilikom iskazivanja vrednosti viskoznosti mora se uvek navesti temperatura na kojoj je određivana, upravo zbog izražene zavisnosti od temperature. Indeks viskoznosti se može odrediti metodama ASTM D2270, ISO 2909 ili JUS B. H8.024.

Kinematska viskoznost se određuje tako što se fluid stavlja u viskozimetar (kalibrisana kapilarna cev za precizno merenje protoka između dve obeležene tačke na cevi) i podgrejava na zadanu temperaturu u „viskoznoj kadi“ koja je najčešće napunjena uljem. Nakon što se ulje zagreje na određenu temperaturu, usled delovanja gravitacije počinje teći kroz viskozimetar. Meri se vreme potrebno da ulje protokne između dve kalibrisane tačke na cevi.

Smicanje maziva se javlja u slučaju cepanja njegovih molekula na manje molekule. Ovo se dešava iz dva osnovna razloga a to su: toplota i pritisak iz sistema. Viskoznost maziva znatno zavisi od njegove klasifikacije ili gradacije kao i od stepena oksidacije i zaprljanja tokom rada. Razlozi za povećanje viskoznosti maziva leže u sledećem: oksidacija maziva, kavitacija usled penušanja maziva, rastvaranje maziva s vodom, punjenje sistema mazivom veće viskoznosti od preporučene i zaprljanje maziva čvrstim česticama. S druge strane, razlozi za smanjenje viskoznosti maziva su: zaprljanje maziva gorivom, usitnjavanje molekula, zaprljanje maziva bez njegovog rastvaranja s vodom, punjenje sistema mazivom manje viskoznosti od preporučene i uticaj sredstva za hlađenje. Ako se viskoznost maziva razlikuje više od 10% od nominalne gradacije, proizvođači maziva preporučuju njegovu zamenu.

Tokom rada i vremena, očekuje se porast viskoznosti maziva. Smanjenje viskoznosti se smatra opasnijim od njenog povećanja. Stoga, je dozvoljena gornja granica +20% iznad nominalne vrijednosti, a donja – 10% ispod nominalne vrijednosti.

### *Ukupni kiselinski broj (TAN)*

Ukupni kiselinski broj je neutralizacioni broj namenjen za merenje svih kiselinskih i kiselinsko-aktivnih materijala u mazivu uključujući jake i blage kiseline. To je titraciona metoda koja pokazuje relativnu kiselost maziva. Uzorak se razblažuje razređivačem i alkalnom bazom, u obliku kalijum hidroksida (KOH) i dodaje u kontrolisanoj meri iz menzure dok se uzorak ne neutralizuje. Kalijum hidroksid je titrant. Neutralizacija se meri jedinicom volt ili pH faktorom. Tačka početka neutralizacije se kreće oko vrednosti faktora pH 11. TAN se određuje na osnovu utrošene količine KOH. Jake kiseline imaju tendenciju da postanu korozivne a njihova količina u mazivu mora se obavezno kontrolisati. Kiselinski broj koristi se kao pokazatelj oksidacione degradacije ulja tokom rada. Kada vrednost TAN-a dosegne određeni definisani nivo za dato mazivo i za njegovo mesto primene potrebno je izvršiti zamenu ulja. Neočekivani porast vrednosti TAN-a može ukazivati na abnormalne radne uslove (npr. pregrevanje) što zahteva traženje uzroka. Većina proizvođača maziva daje preporučene vrednosti TAN-a u katalozima.

Ova analiza je posebno bitna za hidraulična, kompresorska, turbinska i druga ulja koja se koriste kod opreme osetljive na koroziju. Dozvoljava se porast TAN za 50% od početne vrednosti. Određivanjem ukupnog kiselinskog broja meri se porast kiselosti maziva u toku upotrebe. U toku primene mazivo je često u kontaktu sa vazduhom i na visokim temperaturama se delimično oksiduje. Brzina oksidacije se smanjuje pogodnim antioksidantima. Kad se ulje degradira uglavnom oksidacijom, nusprodukti oksidacije su kiseli i daju kiselost ulju u poređenju sa početnom vrednosti, što pove-



ćava korozivnost. TAN je dobar indikator u pogledu pogodnosti ulja za dalju upotrebu i obično se povećava pregrevanjem ili kontaminacijom. Kod dizel motora, turbina i hidrauličnih sistema otpornost prema oksidaciji je vrlo bitna. Postepeno povećanje kiselinskog broja je uobičajena pojava, dok naglo povećanje ukazuje na spoljni izvor, odnosno kontaminaciju. Ukupan kiselinski broj predstavlja količinu kalijum hidroksida (KOH) potrebnu za neutralizaciju kiselina koje se nalaze u 1 gramu ulja (JUS ISO 6619). Kiselinski broj se određuje metodom ASTM D 664. Takođe se može odrediti i kolorimetrijskom metodom ASTM D 974 kod svetlijih ulja.

### *Ukupni bazni broj (TBN)*

TBN je neutralizacioni broj namenjen za merenje svih baznih (alkalnih) materija u mazivu. Suprotno od TAN-a, ova metoda titracije služi za određivanje rezerve alkalnosti maziva. Generalno posmatrajući, TBN predstavlja pokazatelj sposobnosti ulja da neutrališe štetne kiselinske produkte nastale sagorevanjem gasova u motoru. Uzorak se razblažuje razređivačem i kiselinom (hlorovodonična ili perhlorna) i dodaje u kontrolisanu meri iz menzure dok se uzorak ne neutrališe. Kiselina je titrant. Neutralizacija se meri na isti način kao i kod TAN-a, s tom razlikom da se tačka početka neutralizacije najčešće javlja oko vrednosti pH 4. TBN se određuje na osnovu utrošene količine kiseline. Vrednost TBN-a je najveća kod novog nekorištenog ulja, a smanjuje se sa vremenom provedenim u radu. Niska vrednost TBN ukazuje na skori kraj radnog veka ulja. Kiselina nastale sagorevanjem (sumporna kiselina) smanjuju vrednost TBN-a.

Sagorevanjem goriva u motoru i kondenzacijom formiraju se sumporasta ( $H_2SO_3$ ) i sumporna ( $H_2SO_4$ ) kiselina koje deluju agresivno na metalne površine povećavajući stepen korozivnog dejstva ulja. Da bi se one eliminisale, motornim uljima se, za vreme procesa proizvodnje, dodaju aditivi koji mu daju bazna svojstva. Vremenom, bazna svojstva ulja opadaju, pa se zato određuje ukupni bazni broj kao mera istrošenosti aditiva. Značaj TBN ogleda se u mogućnosti ocenjivanja stepena istrošenosti aditiva, koji se obavlja na osnovu razlike alkalnosti rabljenog i svežeg ulja. Određuje se metodama: ASTM D 2896 i 664; ISO 3771; IP 276 i 177; DIN EN 55.

Ova analiza je bitna samo za motorna ulja i smatra se da ulje treba zameniti ako TBN padne za 50% od početne vrednosti. Ukupan bazni broj označava alkalnu rezervu ulja koje treba da neutrališe kisele produkte sagorevanja. Nagli pad ukazuje na loš kvalitet goriva.

Produženje intervala upotrebe motornoga ulja bez kontrole stanja je vrlo rizično i može imati sledeće posledice: slepljivanje klipnih prstenova, izgorele i lakom prekrivene klipove, brzo trošenje ležajeva, izgorele ventile i konačno zaribavanje motora.

## Zaključak

Pri upotrebi maziva bitno je odabrati ispravno mazivo i održavati ga čistim, svežim i bez prisustva vlage. U praksi, to povlači za sobom brojne tehnologije i pravila koja osiguravaju ispunjenje prethodnih uslova, a što u znatnoj meri zavisi od vrste aplikacije i njene specifičnosti. To podrazumeva odabir ispravnog baznog ulja, ispravne viskoznosti i ispravnih aditiva za odgovarajuću namenu. Takođe, nužno je voditi računa o zaprljanju ulja sa aspekta udela vode i čestica što može imati izrazito štetne efekte na radni vek tehničkog sistema i maziva [8, 9].

Degradacija mazivih ulja može nastati pre eksploatacije, kontaminacijom na relaciji od proizvođača do korisnika, u toku transporta, skladištenja ili pretakanja i to nekada do stepena neupotrebljivosti.

U toku upotrebe menjaju se fizičko-hemijske osobine maziva. Brzina degradacije zavisi od ukupnih uslova pod kojima se odvijaju tribološki procesi.

Za utvrđivanje stepena degradacije koriste se laboratorijske analize, na osnovu kojih se donosi odluka da li je ulje za dalju upotrebu ili se mora zameniti. U slučaju da makar jedna karakteristika izađe iz dozvoljenih granica ulje se mora zameniti.

Ispravno održavanje maziva povećava radnu sposobnost tehničkog sistema, produžava njegov radni vek kao i vek maziva. Otkazi tehničkog sistema su smanjeni, kao i troškovi opravke. Takođe, umanjeni su troškovi nabavke maziva i njegovog skladištenja [10, 11].

Danas se za dijagnosticiranje tribomehaničkog sistema primenjuju različite fizičko-hemijske metode i tribološke metode. Iskustva iz eksploatacije tehničkih sistema su pokazala da je prognoziranje neispravnosti najefikasnije na osnovu parametara koji su pouzdani pokazatelji procesa habanja-čestica koje nastaju habanjem. Mazivo je, kao kontaktni element tribomehaničkog sistema, nosilac informacija o stanju celog sistema s aspekta triboloških i drugih procesa starenja.

### *Literatura*

- [1] Taylor, R. I., Coy, R. C., Improved fuel efficiency by lubricant design, 2001,
- [2] Piest, M., Taylor, C. M., Automobile engine tribology, 2000.
- [3] Troyer, D., Fitch, J., Oil Analysis Basics, Noria Corporation, 1999.
- [4] Practicing Oil Analysis, Put ZIP in Your Oil Analysis Program With Tribometrics VIP Analyzer, [www.noria.com](http://www.noria.com)
- [5] Babić, M., Monitoring ulja za podmazivanje, Kragujevac, 2004.
- [6] Perić, S., Uticaj načina eksploatacije menjačkog prenosnika guseničnog vozila na fizičko hemijske karakteristike sredstva za podmazivanje, magistarski rad, Mašinski fakultet Beograd, 2006.

[7] Perić, S., Pešić, Z., Krsmanović, M., Promena fizičko hemijskih karakteristika motornog ulja tokom eksploatacija sa aspekta dijagnostike stanja, Yutrib 05. Kragujevac 2005.

[8] Perić S., Vuruna M., Pešić Z., Nedić, B., Contribution to diagnostics of technical condition tribology assemblies transmitters of vehicles, 6<sup>th</sup> International conference on tribology BALKANTRIB '08, 12–14 June 2008, Sozopol, Bulgaria.

[9] Perić, S., Pešić, Z., Rakić, S., Grkić, A., Changes physically-chemical characteristics of transmission oil as parameter identification state and diagnostics of vehicle transmission gear, 11<sup>th</sup> International Automotive Conference SCIENCE AND MOTOR VEHICLES, 23–25 April, Belgrade 2007.

[10] Perić S., „Fizičko-hemijske i tribološke karakteristike motornog i menjačkog ulja kao parametar stanja tribomehaničkog sistema“, Vojnotehnički glasnik, broj 1/2008., str. 64– 73, Beograd, ISSN: 0042–8469.

[11] Perić S., „Analiza stepena kritičnosti tehničkih sistema“, Vojnotehnički glasnik, broj 2/2009, str. 46–60, Beograd, ISSN: 0042–8469.

## MODERN METHODS OF OIL ANALYSIS IN TECHNICAL SYSTEMS

### Summary:

*Different technical systems require an appropriate lubricant to be used at an appropriate place, at appropriate time and in appropriate quantity. Determination of technical systems condition has a very important role in the development of theory and practice of friction, wear and lubrication. Lubricant is, as a contact element of tribomechanical systems, a carrier of information about the state of the whole system, from the aspect of tribological and other ageing processes. The analysis of oils, based on a properly defined program, thus represents a very effective method for monitoring the condition of technical systems, which ensures early warning signals of potential problems that could lead to failure and break down of technical systems.*

### Introduction

*It is not always simple to determine a type of lubricant, frequency of lubrication and the quantity of lubricant to be used. The optimal recommendation would be to follow specifications of technical system manufacturers, experience, lab research or professional recommendation of lubricant suppliers.*

*Rational lubricant consumption can be obtained by timely oil replacement, which then enables a maximum possible period of use as well as high-quality lubrication. Since the primary role of lubricants is to reduce negative effects of tribological processes related to friction, wear and temperature increase in tribomechanical systems, all types of maintenance include lubrication as a very important part of the whole procedure.*

*On the other hand, lubricant is, as a contact element of the system, a carrier of information about the condition of the whole system, from the aspect of tribological and other ageing processes. Therefore, an analysis of oils, based on a properly defined program, represents a very effective method for monitoring the condition of technical systems, which ensures early warning signals of potential problems that could lead to failure and break down of technical systems. Besides mechanical components in a system structure, the condition of lubricant itself is also affected, which leads to a loss of lubricating properties.*

#### Contamination and degradation of lubricating oils

*There are numerous opportunities for contamination and degradation of lubricating oils. Contamination and degradation of oil exploitation cannot be completely prevented, but can be significantly reduced, which is very important both for oil and for a technical system itself. The rate and degree of degradation of oil are proportional to the rate and extent of contamination. It is therefore important to prevent rapid contamination of oil, before and during use. The spectrum of oil contaminants is considerably wide. Any contaminant destructive impact on oil, reducing its physical-chemical and working properties, results in shortening its service life as well as the service life of the technical system in question.*

*During oil exploitation, changes occur in: chemical compositions and properties of base oils, chemical compositions and properties of additives, and consequently chemical compositions of oils in general, as a result of contamination and degradation.*

*The most significant oil contaminants are base oils degradation products, additives degradation products, metal particles as a result of wear processes, solid particles from the environment, water and products of fuel combustion.*

*During the operation the following changes occur: contamination of oil by the products of its own degradation, by products of incomplete combustion of fuel and by contaminants of various origin.*

The main objectives of the analysis and monitoring of oil exploitation in vehicles

*The main objectives of the analysis and monitoring of oil exploitation in vehicles are:*

- analysis of system element wear processes,*
- analysis of lubricant contamination processes,*
- monitoring changes in the properties of lubricants in order to optimize the life of system functionality control (penetration of contaminants, temperature and pressure, filter efficiency, etc.) and*
- determining the extent of damage and causes of failure.*

*The analysis of the contents of different metals in lubricants is very important. Metal particles are abrasive, and act as catalysts in oil*

oxidation. In motor oils, they can originate from additives, wear processes, fuel, air and cooling liquid. Metals from additives may be Zn, Ca, Ba, or Mg and they indicate additive deterioration. Metals originating from wear are: Fe, Pb, Cu, Cr, Al, Mn, Ag, Sn, and they point to increased wear in these systems. The elements originating from cooling liquids are Na and B, and their increased content indicates the penetration of cooling liquid in the lubricant. The increased content of Si or Ca, which originate from the air, points to a malfunction of the air filter.

#### Condition monitoring through oil analysis tests

There are many different types of oil analysis tests that are used to evaluate lubricants. The tests must cover three areas: technical system condition, contamination condition, and lubricant condition.

From the technical system condition aspect, attention should be paid to the presence of any metal particles in oil and the tendencies in their change. The second focus would be the lubricant condition, especially viscosity change, increase in oxidation, and signs of additive depletion. The third focus would be impurities, where the emphasis should be placed on particle number, water content and metal impurities.

Theoretically, oil analyses are divided into three classes. In reality, all three condition-monitoring classes are interrelated and must be considered as a whole. For example, an increase in viscosity could be an indication that a lubricant is oxidizing. But oxidation could be an incorrect conclusion, if there is no indication of an increasing oxidation tendency obtained either by the acid number (AN) values analysis or the Fourier Transform-Infrared (FT-IR) analysis.

Lubricant monitoring enables its refreshing or replacement before serious technical system damage occurs.

If damage is noticed in the course of operation, and is caused by impurities or lubricant problems, the technical system condition can be monitored and the system may be shut down immediately to minimize damage.

There are the two types of alarms, i. e. warning signs used in oil analysis: absolute and statistical alarms. An effective oil analysis relies on the combination of both types.

The warning limit is the absolute alarm. The statistical tendency takes into account variability based on oil sampling and its contamination and represents the standard deviation. The deviation from the normal variability indicates serious problems, which is the first signal for taking action and dealing with the problem. As the deviation tendency approaches the warning limit, oil replacement, oil purification or a system inspection is required.

Metal particles content and viscosity or some other parameters can be tested. The normal variability range takes into account minor variations caused by analytical accuracy, sample homogeneity, etc. Statistical alarms, which provide the earliest possible warning without false alarms, are difficult to achieve. The factors such as oil adding or changing, filter changes and a sampling technique can distort the results.

*The following tests are most frequently used in technical system condition monitoring:*

- Spectrometric Analysis,*
- Analytical Ferrography,*
- Rotrode Filter Spectroscopy (RFS),*
- Infrared Analysis (FT-IR),*
- Viscosity,*
- Total acid number (TAN),*
- Total Base Number (TBN)*
- Water and Particle Count.*

*Key words: monitoring, maintenance of technical systems, Oil Analysis.*

Datum prijema članka: 17. 07. 2008.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 08. 10. 2009.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 12. 10. 2009.