

Christian D. Neveu, Michael J. Alibert, Franco Camera

ISSN 0350-350X

GOMABN 49, 2, 147-174

Stručni rad/Professional Paper

UDK 621.892-822 : 621.018.7 : 621.83.032 : 532.13 : 539.57

## UTJECAJ ZAHTJEVA VISKOZNOSTI SVJEŽIH ULJA I ULJA NAKON SMICANJA KOD FORMULACIJE HIDRAULIČKIH TEKUĆINA

### Sažetak

Već se godinama odabir hidrauličkih ulja obavlja na temelju ISO 3448 klasifikacije viskoznosti razvijene sredinom sedamdesetih godina, koja definira određeni broj diskontinuiranih gradacija viskoznosti na temelju minimalne i maksimalne kinematičke viskoznosti kod 40 °C. Aktivnošću ASTM-a 1997. godine uvedena je ASTM D 6080-97 klasifikacija koja uključuje nekoliko zahtjeva za viskoznošću svježeg ulja i ulja nakon smicanja. U posljednje vrijeme predložene su dvije nove postavke viskoznosti i ograničenje indeksa viskoznosti kod svježih ulja i ulja nakon smicanja kako bi se poboljšala učinkovitost opreme u usporedbi s konvencionalnim HM uljima. Definirana je maksimalna djelotvornost hidrauličke tekućine (MEHF) i National Fluid Power Association (NFPA) smjernice za odabir viskoznosti hidrauličkih tekućina. Svaki dodatni viskometrijski zahtjev za određivanje ISO gradacije viskoznosti uvodi nova ograničenja na kinematičku viskoznost i indeks viskoznosti kod formulacije. Korištenjem velikog broja mješavina temeljenih na poboljšivačima indeksa viskoznosti s različitim smičnom stabilnosti, ispitan je utjecaj ograničenja viskoznosti, uključen u MEHF i NFPA smjernice, na područje formulacije tri najčešće ISO gradacije viskoznosti. Utvrđeno je da stupanj preklapanja smjernica, takozvano "područje formulacije", ovisi o ISO gradaciji viskoznosti i smičnoj stabilnosti poboljšivača indeksa viskoznosti kojeg se razmatra. Ovaj rad pruža okvir za poboljšanu sposobnost odabira ciljeva formuliranja s obzirom na spomenute nove smjernice.

### 1. Klasifikacija i smjernice za odabir hidrauličkih tekućina

Trenutačno se kod odabira hidrauličkih tekućina koristi nekoliko smjernica i sustava klasifikacija viskoznosti koji dobavljačima maziva, korisnicima i proizvođačima opreme pružaju zajedničku, suvislu osnovu za odabir maziva za uporabu. Ovi sustavi kreću se od jednostavne ISO 3448 klasifikacije viskoznosti, koja klasificira ulja samo na temelju njihove kinematičke viskoznosti pri 40 °C, do složenije ASTM D 6080-97 [1], koja klasificira ulja prema viskoznostima kod više temperatura, indeksu

viskoznosti i smičnoj stabilnosti. Godine 2002., NFPA T2.13.13-2002 [2] je prepoznala potrebu da klasificira ulja prema kinematičkoj viskoznosti pri 100 °C, budući da je ona bliža vršnoj temperaturi ulja koja se susreće kod pokretne hidrauličke opreme. Klasifikacija definira postupak odabira hidrauličkih tekućina na temelju zahtjeva vodećih proizvođača pumpi i raspona temperatura kojima je tekućina izložena. Kod niske temperature koristi definiciju L gradacije prvi put uvedene u ASTM D 6080-97 klasifikaciju.

Od uvođenja NFPA preporuka 2002. godine pojavila su se dva područja poboljšanja: smična stabilnost i energetska djelotvornost.

### 1.1) Smična stabilnost

NFPA preporuke iz 2002. godine nisu uzele u obzir smicanje poboljšivača indeksa viskoznosti (VII) korištenih kod formuliranja hidrauličkih tekućina visokog indeksa viskoznosti, koje u primjeni rezultiraju padom viskoznosti.

Tijekom razvoja norme ASTM D 6080-97 [3], zaključeno je da viskoznost ulja kod temperature na usisu pumpe nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti u trajanju od 40 minuta (ASTM D 5621), najbolje korelira s volumetrijskom djelotvornošću krilne pumpe kod srednjeg tlaka. Kombinirajući ovo saznanje s opažanjem da pokretna oprema radi pri povišenoj temperaturi, NFPA definira gradacije viskoznosti kod visokih temperatura na temelju viskoznosti ulja nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti u trajanju od 40 minuta [4]. Minimalna viskoznost za pojedinu gradaciju temelji se na minimalnoj kinematičkoj viskoznosti te ISO gradacije viskoznosti kod 40 °C preračunate na 100 °C pomoću indeksa viskoznosti 100. Maksimalna viskoznost za NFPA gradaciju je nešto niža od minimalne viskoznosti za sljedeću višu NFPA gradaciju. U NFPA klasifikaciji, prikazanoj u tablici 1, gradacije su kontinuirane dok su u ISO 3448 klasifikaciji viskoznosti diskontinuirane.

Tablica 1: NFPA gradacije viskoznosti kod visoke temperature

NFPA gradacija	Kinematička viskoznost kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti, mm <sup>2</sup> /s	
	minimum	maksimum
15	3,2	<4,0
22	4,0	<5,0
32	5,0	<6,3
46	6,3	<8,1
68	8,1	<10,5
100	10,5	<14,0
150	14,0	<18,2

### 1.2) Postizanje visoke djelotvornosti opreme

Opsežna ispitivanja [5, 6, 7] pokazuju da djelotvornost hidrauličkih sustava ovisi o viskoznosti hidrauličke tekućine u stvarnoj primjeni. Količina goriva potrebna za obavljanje određene količine rada s pokretnim hidrauličkim sustavom može se značajno smanjiti zamjenom smično stabilne tekućine visokog indeksa viskoznosti s

monogradnom hidrauličkom tekućinom preporučenom od OEM-a. Uštede energije za više od 18 % [8, 9] rezultat su poboljšane volumetrijske djelotvornosti, dokazane primjenskim ispitivanjem.

U uvjetima niske temperature, djelotvornost hidrauličke opreme ovisi o mehaničkoj djelotvornosti pumpi i motora. Posljedica visoke viskoznosti ulja su visoki gubici mehaničke energije zbog trenja, a prema tome i niska djelotvornost.

Zato, kako bi se postigla visoka djelotvornost opreme u svim radnim uvjetima, predložena je definicija maksimalne djelotvornosti hidrauličke tekućine (MEHF). Za najčešće korištene gradacije hidrauličkih ulja (ISO VG 32, 46 i 68), MEHF uključuje zahtjeve za viskoznost kod niske i visoke temperature i minimalni indeks viskoznosti svježeg ulja. Također se uvodi i minimalna viskoznost kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti. Razlozi uvođenja i opis MEHF smjernica prvi su put predstavljani u ožujku 2005. godine [7].

NFPA je 2008. godine predložila nadogradnju svojih smjernica iz 2002. godine za izbor hidrauličkih tekućina [4]. Najvažnije dopune su bile a) definicija gradacije kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti (tablica 1) i b) zahtjev za minimalni indeks viskoznosti od 160 nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti. Ove dopune su napravljene da se prepozna utjecaj viskoznosti nakon smicanja i indeksa viskoznosti na uštedu goriva i učinkovitost hidrauličke opreme.

## 2. Mogućnosti izbora hidrauličkih ulja

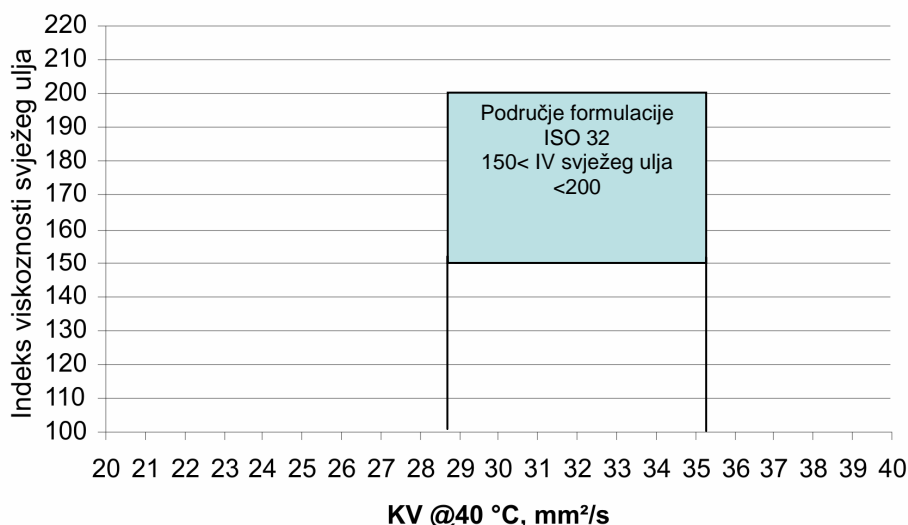
Na temelju prethodnog pregleda klasifikacija viskoznosti i smjernica, izbor hidrauličkih ulja može se temeljiti na tri kriterija: viskoznosti, indeksu viskoznosti i Sonic smičnoj stabilnosti. Zahtjevi viskoznosti mogu se definirati kod jedne ili više temperatura, prije ili nakon smicanja. Zahtjevi za indeks viskoznosti također se mogu postaviti za svježe ulje i/ili ulje nakon smicanja.

S toliko mogućih kombinacija vrlo je teško odrediti onu koja pruža najbolji način odabira hidrauličkih ulja koja omogućuju visoku učinkovitost opreme u danom rasponu temperatura. Da bi se riješilo ovaj problem, odlučili smo procijeniti u kojoj mjeri skup viskometrijskih kriterija utječe na područje formulacije ulja. Područje odgovara svim mogućim kombinacijama svježeg ulja s kinematičkom viskoznosti kod 40 °C (KV) i indeksom viskoznosti (IV) za danu ISO gradaciju viskoznosti. Slika 1 predstavlja područje koje odgovara gradaciji ISO 32 i indeksu viskoznosti svježeg ulja između 150 i 200.

Dodavanjem ograničenja smanjuje se područje formulacije. Zbog preblagih ili preoštrih ograničenja koja određuju preveliko ili premalo područje formulacije, područje uključuje sva ili nijedno komercijalno mazivo.

Kako bi se dobio grafički prikaz utjecaja zahtjeva iz NFPA i MEHF smjernica na područje formulacije, pripremljeno je 216 formulacija koristeći bazna ulja grupe I prema planu opisanom u tablici 2. Indeks viskoznosti varira između 150 i 200. Donja granica odabrana je jer odgovara minimalnom indeksu viskoznosti svježeg ulja u

skladu s MEHF. Gornja granica od 200 je odabrana budući da neka komercijalna hidraulička ulja formulirana s baznim uljima grupe I prelaze tu vrijednost.



Slika 1: Područje formulacije za ISO VG 32 i IV svježeg ulja između 150 i 200

Za svaku formulaciju određena su sljedeća tri svojstva:

- Kinematička viskoznost ulja kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti (ASTM D 5621).
- Indeks viskoznosti ulja nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti.
- Temperatura kod koje svježe ulje postiže viskoznost od 750 mPa·s određenu Brookfieldovim viskozimetrom prema ASTM D 2983.

Tablica 2: Plan ispitivanja

Parametar	Broj razina	Opis razina
ISO gradacija viskoznosti	3	32, 46, 68
Kinematička viskoznost svježeg ulja kod 40 °C	3	Gornja i donja granica i srednja vrijednost ISO gradacije viskoznosti
Indeks viskoznosti svježeg ulja	6	150 do 200 u razmacima od 10
Indeks viskoznosti poboljšivača indeksa viskoznosti	4	Indeks smične stabilnosti nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti u području od 10 do 43

Linearnom regresijskom analizom ovih podataka određena je jednadžba koja opisuje ovisnost tri navedena svojstva o kinematičkoj viskoznosti kod 40 °C i indeksu viskoznosti svježeg ulja. Analiza je provedena za sva četiri poboljšivača indeksa viskoznosti i za svaku od tri ISO gradacije viskoznosti. Dobivena je sljedeća jednadžba:

$$\text{Svojstvo} = a + b \cdot \text{KV @ 40 °C svježeg ulja} + c \cdot \text{IV svježeg ulja}$$

Preciznost ovih 36 modela je bila odlična s koeficijentom determinacije ( $R^2$ ) u rasponu od 0,9926 - 0,9999. Najveće i najmanje pogreške između stvarnih i izračunatih svojstava prikazane su u tablici 3.

Tablica 3: Preciznost modela

ISO VG	Pogreška u procjeni KV kod 100 °C nakon Sonic testa, %		Pogreška u procjeni indeksa viskoznosti		Pogreška u procjeni temperature za postizanje viskoznosti od 750 mPa·s, °C	
	najmanja	najveća	najmanja	najveća	najmanja	najveća
32	-0,8	1,1	-1	1	-0,1	0,1
46	-0,9	0,9	-1	1	-0,1	0,0
68	-0,9	1,0	-1	1	-0,1	0,1

### 3. Utjecaj zahtjeva na područje formulacije

Za svakog od četiri poboljšivača indeksa viskoznosti ocijenjen je utjecaj zahtjeva iz tablice 4 na područje formulacije.

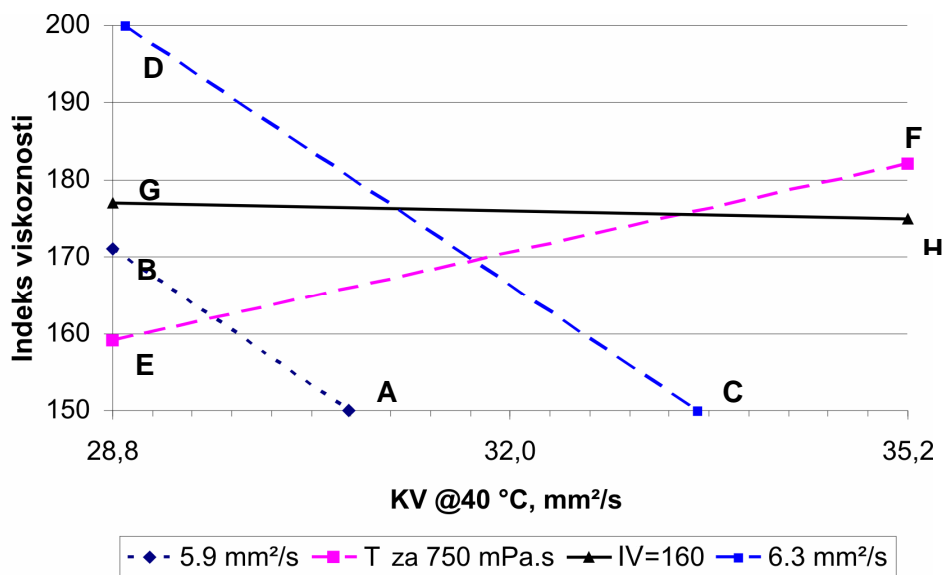
Tablica 4: Ograničenja području formulacije

Zahtjev	Jedinica	ISO gradacija	Granica	Podrijetlo
Indeks viskoznosti svježeg ulja		sve	>150	MEHF
Indeks viskoznosti ulja nakon smicanja		sve	>160	NFPA
KV kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti	mm <sup>2</sup> /s	32	>5,9	MEHF
KV kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti	mm <sup>2</sup> /s	32	>6,3	NFPA
KV kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti	mm <sup>2</sup> /s	46	>7,5	MEHF
KV kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti	mm <sup>2</sup> /s	46	>8,1	NFPA
KV kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti	mm <sup>2</sup> /s	68	>10,0	MEHF
KV kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti	mm <sup>2</sup> /s	68	>10,5	NFPA
Temperatura za T = 750 mPa·s	°C	32	<-15	D 6080
Temperatura za T = 750 mPa·s	°C	46	<-8	D 6080
Temperatura za T = 750 mPa·s	°C	68	<-2	D 6080

#### 3.1) Područje formulacije za ISO VG 32 s VII 1

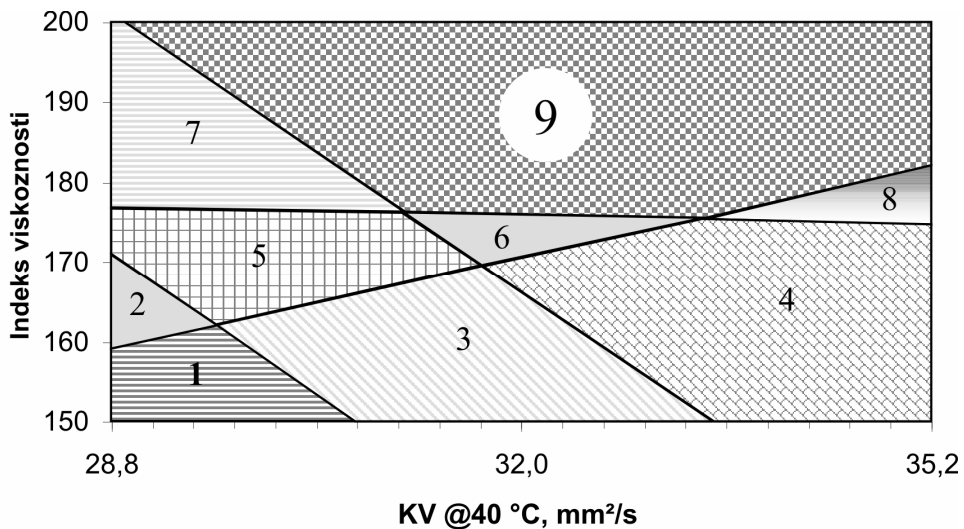
Koristeći jednadžbe koje opisuju ovisnost karakterističnih svojstava o kinematičkoj viskoznosti kod 40 °C i indeksu viskoznosti svježeg ulja, za svako svojstvo povučena je linija koja dijeli područje formulacije na dva polja u kojima se dana ograničenja ili zadovoljavaju ili ne, što je prikazano na slici 2.

Zahtjev za kinematičku viskoznost kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti od minimalno 5,9 mm<sup>2</sup>/s, prema MEHF smjernicama za gradaciju viskoznosti ISO 32, dijeli područje formulacije na dva polja odvojena linijom AB. U donjem polju formulacije imaju viskoznost nakon smicanja nižu od 5,9 mm<sup>2</sup>/s, a u gornjem višu od 5,9 mm<sup>2</sup>/s.



Slika 2: Područje formulacije za ISO VG 32 s VII 1

Na sličan način, i linija CD koja odgovara minimalnoj viskoznosti kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti od 6,3 mm²/s za NFPA gradaciju 32, odvaja područje formulacije na dva polja. Povećanje zahtjeva viskoznosti nakon smicanja s 5,9 na 6,3 mm²/s odbacuje sve formulacije u ABDC polju.



Slika 3: Polja određena sa četiri zahtjeva viskoznosti – ISO VG 32 s VII 1

Linija GH odgovara formulaciji s indeksom viskoznosti od 160 nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti kao što zahtijeva NFPA. Sve formulacije ispod ove linije imaju niži indeks viskoznosti nakon smicanja.

Konačno, linija EF odgovara formulaciji s viskoznošću prema Brookfieldu od 750 mPa·s kod -15 °C. Formulacije ispod ove linije imat će viskoznost veću od 750 mPa·s kod -15 °C pa će pasti u gradaciju L32 prema ASTM D 6080. Formulacije iznad linije će biti gradacija L22 što je zahtjev MEHF za gradaciju 32.

Ove četiri linije dijele područje formulacije u devet polja koja odgovaraju različitim kombinacijama četiriju zahtjeva što je prikazano na slici 3.

Formulacije koje zadovoljavaju zahtjeve viskoznosti padaju u jedno od devet polja i detaljno su opisane u tablici 5.

Tablica 5: Zahtjevi viskoznosti zadovoljeni s devet polja područja formulacije

Područje	L gradacija	NFPA gradacija kod 100 °C	Zadovoljava MEHF KV od 5,9 mm <sup>2</sup> /s kod 100 °C	Zadovoljava MEHF L22 zahtjev	Zadovoljava NFPA IV >=160
1	32	32	Ne	Ne	Ne
2	22	32	Ne	Da	Ne
3	32	32	Da	Ne	Ne
4	32	46	Da	Ne	Ne
5	22	32	Da	Da	Ne
6	22	46	Da	Da	Ne
7	22	32	Da	Da	Da
8	32	46	Da	Ne	Da
9	22	46	Da	Da	Da

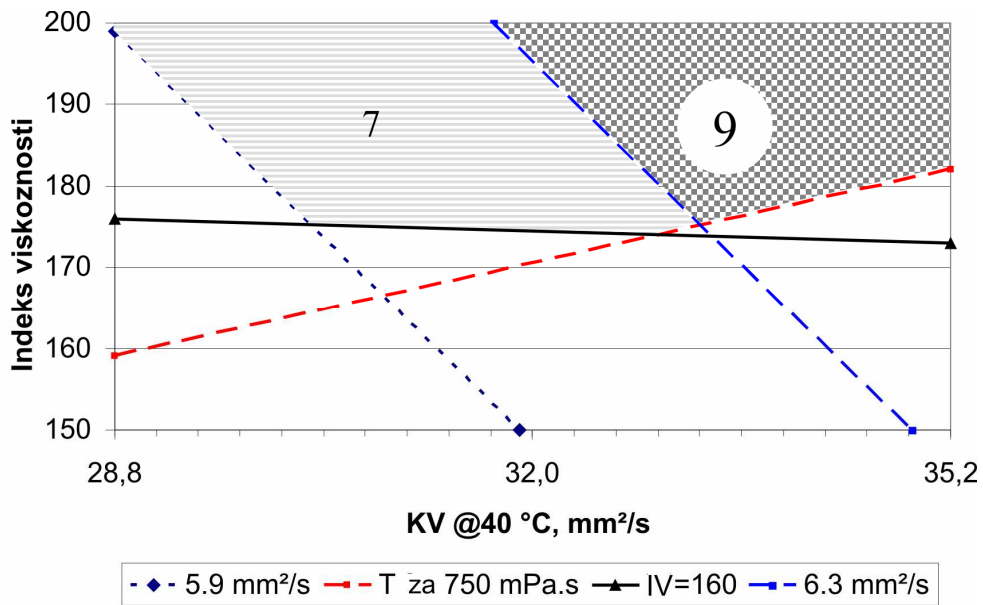
Jedino formulacije iz polja 7 i 9 sa slike 3 zadovoljavaju i MEHF i NFPA zahtjeve. Međutim, ulja iz polja 9 su multigradna ulja sa širokim rasponom gradacija L22-46 dok su ulja u polju 7 isključivo gradacije L22-32.

Multigradna ulja sa širokim rasponom gradacija osiguravaju najbolju ukupnu djelotvornost opreme u širokom području radnih uvjeta. Ulja iz polja 9 su gradacije L22-46, s viskometrijskim svojstvima koja daju najbolju ukupnu učinkovitost opreme i produktivnost u okviru područja ispitivanih baznih ulja, indeksa viskoznosti, kinematičke viskoznosti i poboljšivača indeksa viskoznosti.

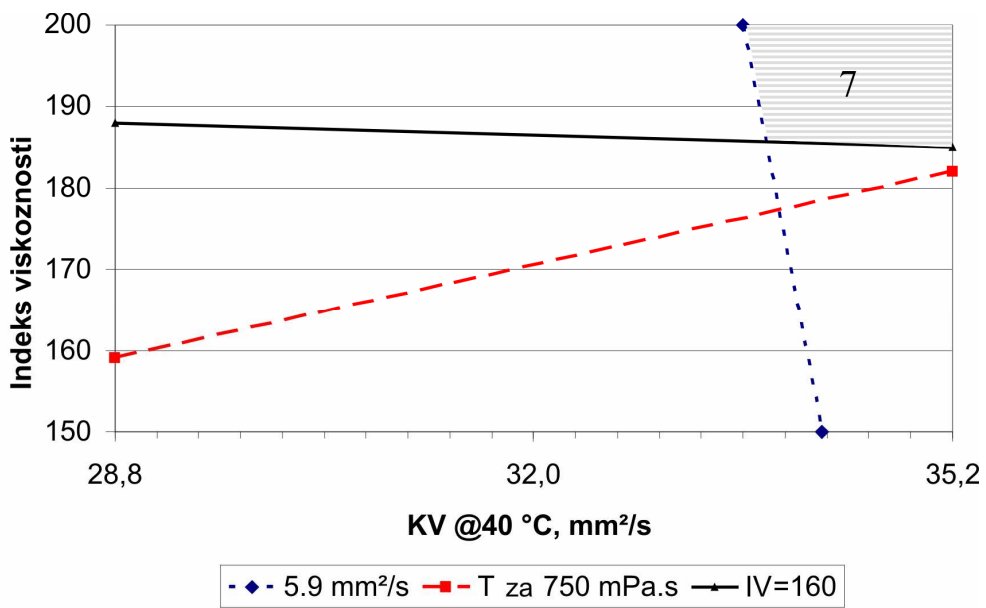
### 3.2) Područje formulacije za ISO VG 32 s VII 2, 3 i 4

Povučene su linije koje odgovaraju četirima viskometrijskim zahtjevima za ostala tri poboljšivača indeksa viskoznosti korištena u ovom ispitivanju. Kao što je prikazano na slici 4, krećući se od smično stabilnijeg poboljšivača indeksa viskoznosti 1 do manje smično stabilnog poboljšivača indeksa viskoznosti 2 imamo dramatičan utjecaj na veličinu područja koje odgovara L22-46 gradaciji.

Korištenjem manje smično stabilnih poboljšivača indeksa viskoznosti, smanjuje se područje u kojem se zadovoljavaju viskometrijski uvjeti, što je prikazano na slikama 5 i 6.



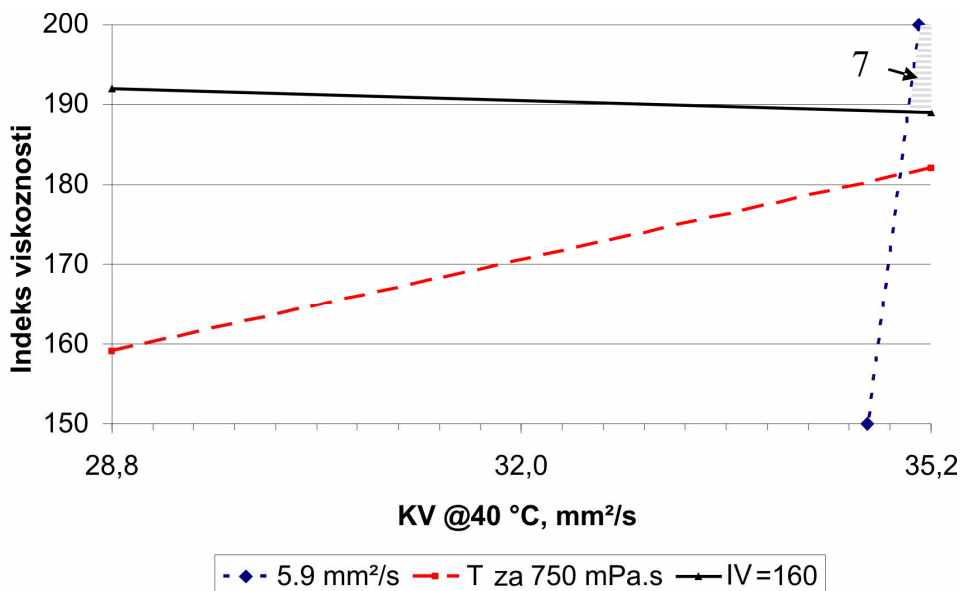
Slika 4: Polja određena sa četiri zahtjeva viskoznosti – ISO VG 32 s VII 2



Slika 5: Polja određena s četiri zahtjeva viskoznosti – ISO VG 32 s VII 3



Kada se koriste poboljšivači indeksa viskoznosti 3 ili 4, nemoguće je postići viskoznost nakon smicanja kod 100 °C od 6,3 mm<sup>2</sup>/s. Dakle, polje 9 ne postoji za ova dva poboljšivača indeksa viskoznosti u okviru našeg ispitivanja. Međutim, još uvijek je moguće formulirati ulja koja zadovoljavaju MEHF smjernice i upadaju u NFPA L22-32 gradaciju (polje 7). Veličina ovog polja smanjuje se sa smanjenjem smične stabilnosti korištenog poboljšivača indeksa viskoznosti.

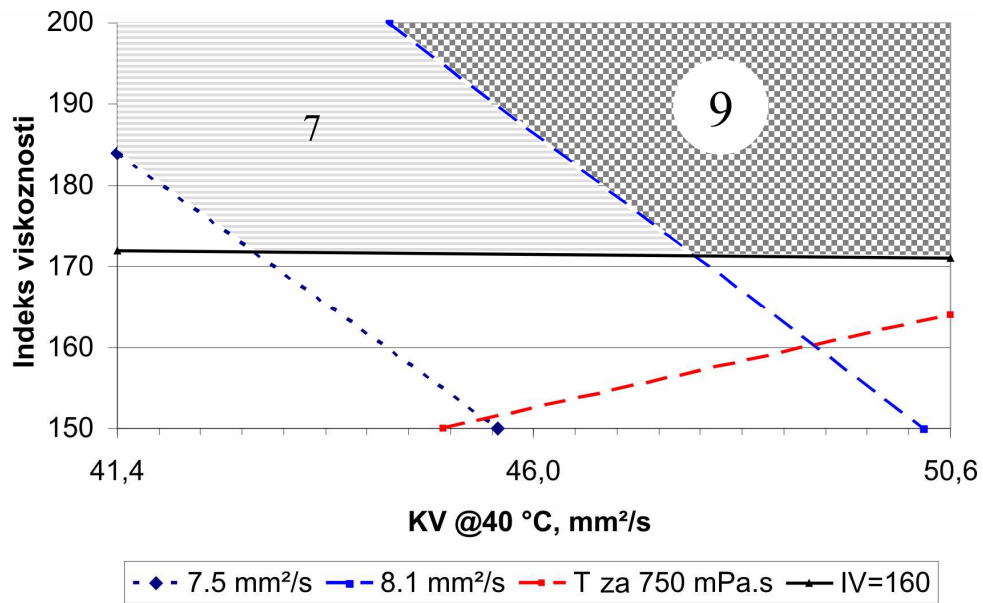


Slika 6: Polja određena s četiri zahtjeva viskoznosti – ISO VG 32 s VII 4

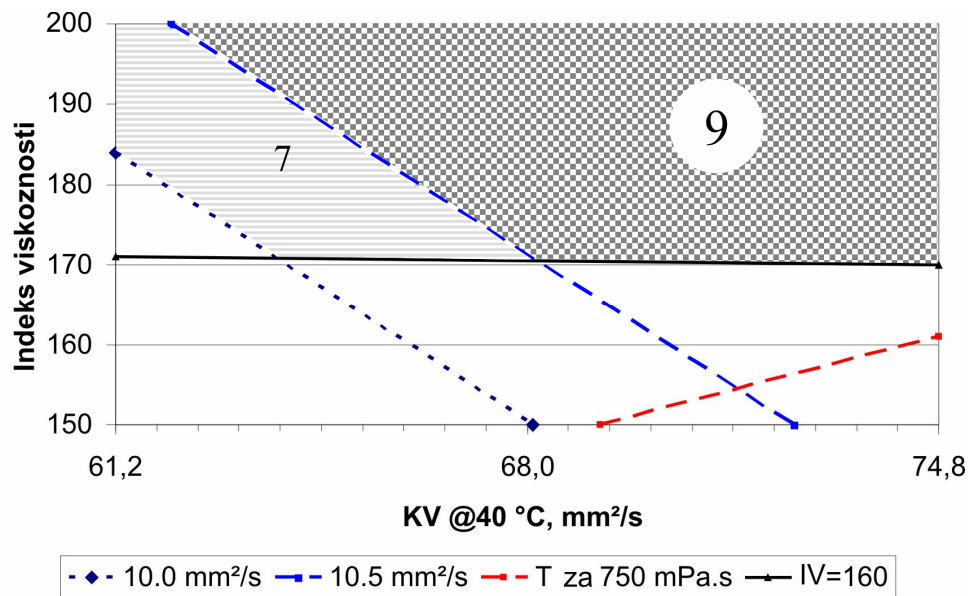
#### 4. Formuliranje multigradnih ulja sa širokim rasponom gradacija s VII 2

Prethodni rezultati pokazuju da je multigradna ulja sa širokim rasponom gradacija L22-46 moguće formulirati korištenjem poboljšivača indeksa viskoznosti 1 i 2. Podaci dobiveni za formulacije ISO gradacija viskoznosti 46 i 68 i poboljšivača indeksa viskoznosti 2, analizirani su da bi se utvrdilo područje koje odgovara formulacijama L32-68 i L46-100, a koje zadovoljavaju i NFPA i MEHF zahtjeve. To je područje formulacije označeno brojem 9, što prikazuju slike 7 i 8.

Uspoređujući područje formulacije koje odgovara polju 9 za tri ISO gradacije viskoznosti s poboljšivačem indeksa viskoznosti 2 vidi se da se veličina tog polja povećava s povećanjem ISO gradacije viskoznosti. Ovo može biti rezultat činjenice da što je viša ISO gradacija viskoznosti, veća je razlika između gornje i donje granice viskoznosti kod 40 °C.



Slika 7: Polja određena s četiri zahtjeva viskoznosti – ISO VG 46 s VII 2

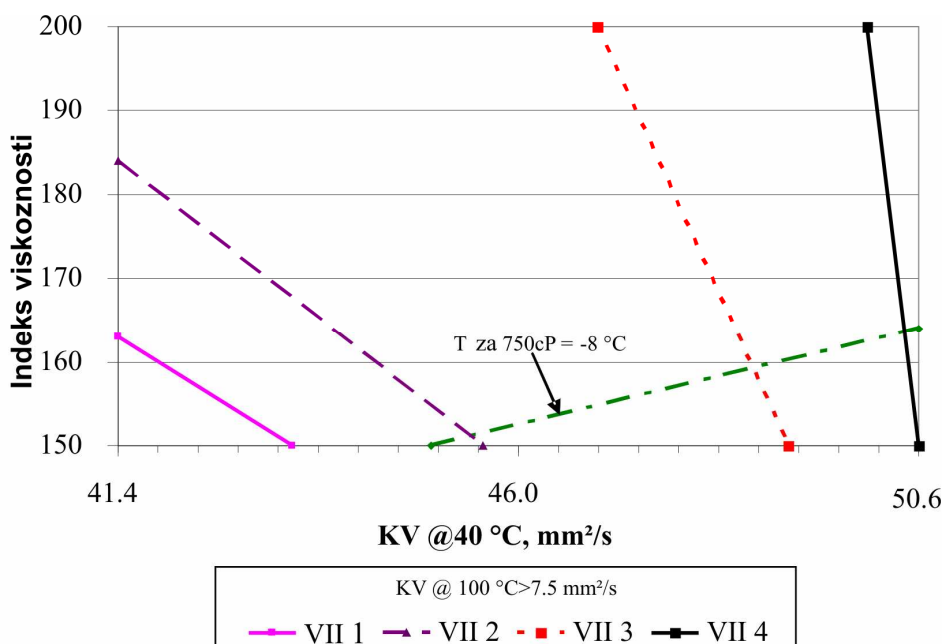


Slika 8: Polja određena sa četiri zahtjeva viskoznosti – ISO VG 68 s VII 2

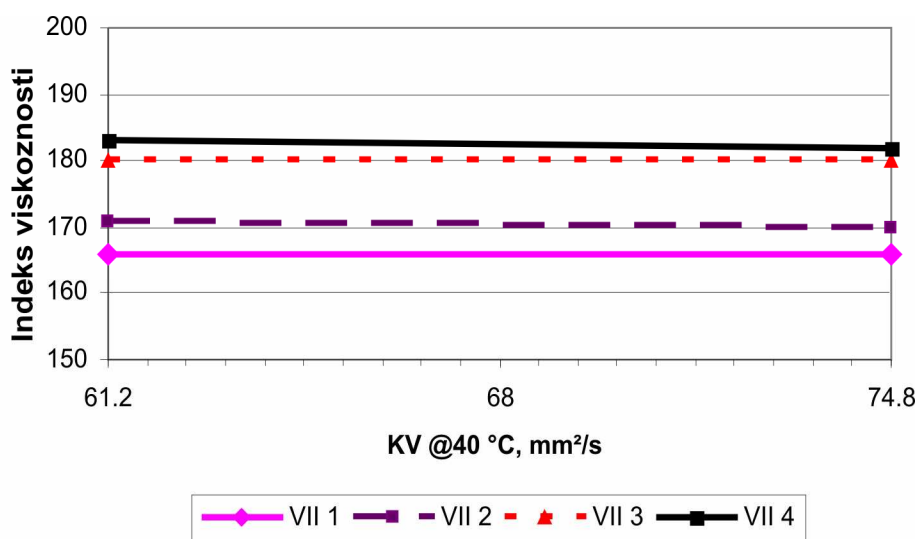
Veličina polja 7 za MEHF gradacije L32-46 i L46-68 s poboljšivačima indeksa viskoznosti 3 i 4 također se povećava u odnosu na MEHF gradaciju L22-32. Međutim, ovi poboljšivači indeksa viskoznosti ne mogu se koristiti za formuliranje MEHF i NFPA gradacija L32-68 ili L46-100 budući da je viskoznost ulja kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti manja od minimalno definirane od NFPA za gradaciju 68 i 100.

### 5. Utjecaj smične stabilnosti poboljšivača IV na područje formulacije

Prethodni rezultati pokazuju da se područje koje odgovara jednom od četiriju viskometrijskih zahtjeva razmatranih u ovom ispitivanju, smanjuje sa smanjenjem smične stabilnosti polimera. Na slici 9 prikazano je područje formulacije koje odgovara MEHF zahtjevu za minimalnu kinematičku viskoznost kod 100 °C od 7,5 mm<sup>2</sup>/s za gradaciju 46. Za svaki poboljšivač indeksa viskoznosti, povučena je linija koja dijeli područje na gornji dio s kinematičkom viskoznosti kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti većom i donji dio s manjom od 7,5 mm<sup>2</sup>/s. Poboljšivači indeksa viskoznosti 3 i 4 ne mogu se koristiti za proizvodnju ulja gradacije viskoznosti ISO 46 s kinematičkom viskoznošću kod 100 °C nakon smicanja od 7,5 mm<sup>2</sup>/s, jer ne ispunjavaju zahtjev NFPA za gradaciju 46 koji iznosi minimalno 8,1 mm<sup>2</sup>/s nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti.



Slika 9: Područje formulacije za ulje KV od 7,5 mm<sup>2</sup>/s i ISO VG 46 na temelju različitih VII



Slika 10: Područje formulacije za IV nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti veći od 160 za ulje ISO VG 68 s različitim VII

Linije koje odgovaraju minimalnom indeksu viskoznosti od 160 nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti su u osnovi horizontalne linije. Što je viša smična stabilnost poboljšivača indeksa viskoznosti, niži je minimalni početni indeks viskoznosti svježih ulja. Međutim, razlike između poboljšivača indeksa viskoznosti manje su važne od viskoznosti nakon smicanja. Indeks viskoznosti svježeg ulja mora biti između 166 i 183 za najviše i najmanje smično stabilne poboljšivače indeksa viskoznosti, odnosno da bi dosegao indeks viskoznosti od 160 nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti, kako je navedeno u NFPA smjernicama.

## 6. Zaključci

Dugotrajan rad koji su u posljednjih trideset godina proveli ISO, ASTM i NPFA dokazao je potrebu da se industriji hidrauličke opreme omogući da na jednostavan, smislen i učinkovit način klasificira ulja. U tom smislu je za definiranje ulja s poboljšanom djelotvornosti kod niske i visoke temperature nedavno predložen sustav tzv. maksimalne učinkovitosti hidrauličkih tekućina (MEHF).

Analiza zahtjeva NFPA i MEHF smjernica omogućila je ocjenu njihovog utjecaja na veličinu područja formulacije za tri ISO gradacije viskoznosti (32, 46 i 68) na temelju četiri najčešće korištena poboljšivača indeksa viskoznosti s različitim razinom smične stabilnosti. U tu svrhu napravljeno je 216 mješavina s baznim uljem grupe I i indeksom viskoznosti u rasponu između 150 i 200.

U obzir su uzeta tri kritična svojstva:

- Temperatura kod koje ulje postiže viskoznost od 750 mPa·s.

- Kinematička viskoznost ulja kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti.
- Indeks viskoznosti ulja nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti.

Za svaku vrijednost tih svojstava može se odrediti linija koja dijeli područje formulacije na dva polja u kojima jesu ili nisu ispunjeni zahtjevi.

Ograničenja za tri svojstva uključena u NFPA i MEHF smjernice za gradaciju ISO 32 su:

- Temperatura za 750 mPa·s = -15 °C (MEHF).
- Kinematička viskoznost kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti = 5,9 mm<sup>2</sup>/s (MEHF).
- Kinematička viskoznost kod 100 °C nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti = 6,3 mm<sup>2</sup>/s (NFPA).
- Indeks viskoznosti ulja nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti = 160 (NFPA).

Analize rezultata formulacija na temelju smično stabilnog poboljšivača indeksa viskoznosti pokazuju da četiri linije dijele područje formulacije na 9 polja. Pažljivi pregled je pokazao da samo jedna formulacija odgovara multigradnom ulju sa širokim rasponom gradacija L22-46, koje zadovoljava zahtjeve i NFPA i MEHF smjernica.

Korištenje manje smično stabilnog poboljšivača indeksa viskoznosti 2 u gradaciji viskoznosti ISO 32 dovodi do smanjenja veličine prethodno opisanog polja. Preostala dva manje smično stabilna poboljšivača indeksa viskoznosti pružaju manje mogućnosti formuliranja i ne mogu se koristiti za formuliranje multigradnih ulja sa širokim rasponom gradacija koja zadovoljavaju NFPA i MEFH smjernice.

Usporedba područja formulacija za poboljšivač indeksa viskoznosti 2 i gradacije viskoznosti ISO 32, 46 i 68 pokazala je, da što je viša gradacija viskoznosti, to veće je i područje koje odgovara formulacijama multigradnih ulja sa širokim rasponom gradacija, koje zadovoljavaju NFPA i MEHF smjernice.

Vidljivo je da samo podskup ulja koja zadovoljavaju MEHF i NFPA smjernice obuhvaća tri gradacije viskoznosti. Ovako široki raspon gradacija viskoznosti je najpoželjniji za visoku djelotvornost kod niske i visoke temperature.

Na temelju naših saznanja, optimalna definicija visoko učinkovitog hidrauličkog ulja za danu ISO gradaciju viskoznosti zahtjeva:

- Sljedeću nižu L gradaciju prema ASTM D 6080.
- Sljedeću višu NFPA gradaciju viskoznosti definiranu nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti kod 100 °C.
- Indeks viskoznosti nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti viši od 160.

Na primjer, u slučaju ISO VG 46 to odgovara L32-68 s indeksom viskoznosti nakon ispitivanja Sonic smične stabilnosti od 160.

**Literatura**

1. Stambaugh, R.L., Kopko, R.J., Roland, T.F., "Hydraulic Pump Performance – A Basis for Fluid Viscosity Classification", SAE 901633. International Off-Highway & Powerplant Congress and Exposition, Milwaukee, Wisconsin, September 10-13, 1990.
2. NFPA/T2.13.13-2002. Recommended Practice - Hydraulic fluid power – Fluids - Viscosity selection criteria for hydraulic motors and pumps.
3. Herzog, S.N., Neveu, C.D., Hyndman, C.W., Simko, R.P., "Effect of Operation Time on Oil Viscosity and Pump Efficiency", presented at Lubricants and Fluid Power Expo, May 4-8, 2005, Las Vegas, USA.
4. Herzog, S.N., Marougy T.E., Michael, P.W. "Guidelines for Hydraulic Fluid Viscosity Selection to Improve Equipment Fuel Economy and Productivity", presented at the NFPA conference 9-12/3/08, Las Vegas. NCFP I08 - 2.1
5. Placek, D. G., Herzog, S.N., Neveu, C.D. "Reducing Energy Consumption with Multigrade Hydraulic Fluids", presented at the 9th Annual Fuels & Lubes Asia Conference and Exhibition, January 21-24, 2003, Singapore
6. Herzog, S.N., Neveu, C.D., Placek, D.G., "Boost Performance and Reduce Costs by selecting the Optimum Viscosity Grade of Hydraulic Fluid", presented at Lubricants and Fluid Power Expo, May 4-8, 2003, Indianapolis, IN, USA.
7. Hamaguchi, H., "Introducing Maximum Efficiency Hydraulic Fluids", in *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual Fuels and Lubes Asia Conference*, March 2005, Beijing, China.
8. Neveu, C.D., Herzog, S.N., Hyndman, C.W., Simko, R.P., "Achieving Efficiency Improvements through Hydraulic Fluid Selection: Laboratory Prediction and Field Evaluation", presented at the STLE annual meeting (Society of Tribologists and Lubrication Engineers), May 2007, Philadelphia, PA, USA
9. Herzog, S.N., Gregg, D., "Improving Fuel Economy and Productivity of Mobile Equipment through Hydraulic Fluid Selection: A Case Study", presented at the NFPA conference 9-12/3/08, Las Vegas. NCFP I08 – 2.4

UDK	ključne riječi	key words
621.892-822	hidraulički fluid maksimalne učinkovitosti MEHF	maximum efficiency hydraulic fluid MEHF
621.018.7	energetska učinkovitost	energy efficiency
621.83.032	hidraulički prijenosnici	hydraulic transmissions
532.13	viskoznost	viscosity
539.57	smična postojanost	shear stability

**Autori**

Christian D. Neveu, e-mail: christian.neveu@evonik.com; Michael J. Alibert, Franco Camera  
Evonik RohMax Oil Additives, Germany

**Primljeno**

1.7.2009.

**Prihvaćeno**

6.5.2010.