

VPLIV INDEKSA VISKOZNOSTI RAZLIČNIH HIDRAVLICNIH TEKOČIN NA OBRATOVALNO TEMPERATURNO PODROČJE

Darko Lovrec

Izveček:

Viskoznost hidravlične tekočine spada med njene najpomembnejše snovne lastnosti. Izbira primerne viskoznosti tekočine za določen primer uporabe pa spada med najpomembnejše naloge hidravlika. Vrednost viskoznosti pri izbiri tekočine pa ni edini pomemben parameter. Izredno pomembno je poznati, kako se viskoznost spreminja s temperaturo – obnašanje viskoznost-temperatura. Slednje podaja VI – indeks viskoznosti.

Prispevek obravnava vpliv vrednosti indeksa viskoznosti različnih hidravličnih tekočin na širino obratovalnega temperaturnega področja hidravlične naprave. V uvodu sta podana pomen in način ugotavljanja indeksa viskoznosti ter prikazane dejanske vrednosti indeksa viskoznosti za običajna mineralna hidravlična olja kakovostne ravni HLP oziroma HM in različne ISO viskoznostne razrede. V nadaljevanju prispevka so za primerjavo obravnavane značilne vrednosti indeksa viskoznosti še drugih vrst hidravličnih tekočin: za mineralno olje vrste HV z izboljšanim obnašanjem viskoznost-temperatura ter za hidravlične tekočine vrste HE in HF. V zadnjem delu prispevka so predstavljene prednosti uporabe ionskih tekočin, ki so novejša, okolju prijazna in težko vnetljiva tekoča maziva, za katera je značilen visok indeks viskoznosti in posledično široko obratovalno temperaturno področje ter zelo nizka točka strdišča.

Ključne besede:

hidravlične tekočine, indeks viskoznosti, določanje, obratovalno temperaturno področje, mineralna olja, ionske tekočine

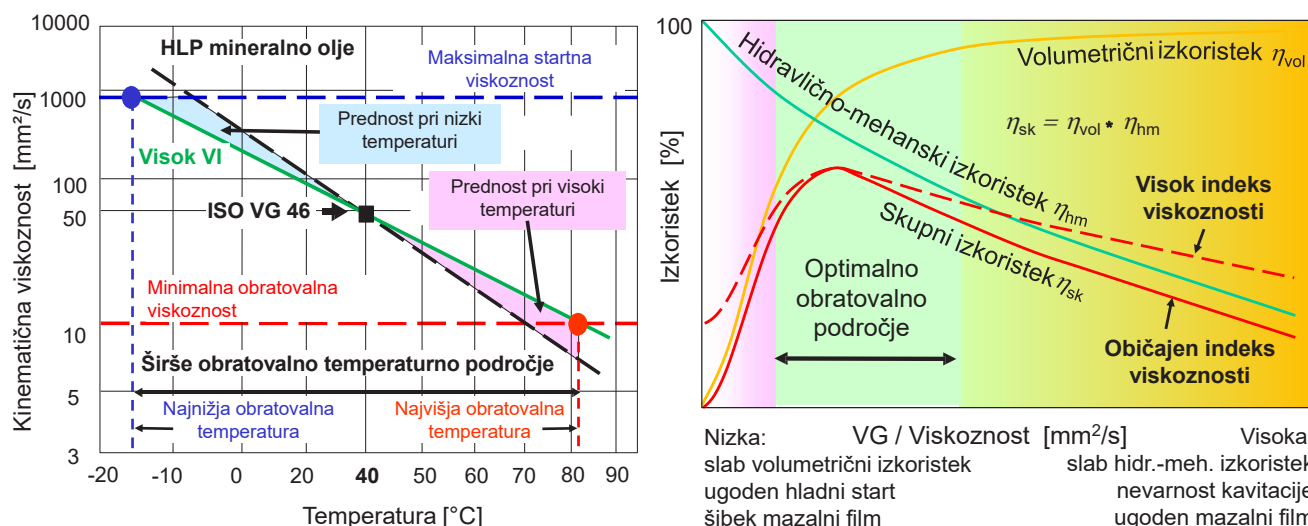
1 Uvod – pomen viskoznosti in indeksa viskoznosti

Viskoznost je zagotovo najpomembnejša snovna lastnost hidravlične tekočine (in tekočin maziv na sploh), saj »podaja« sposobnost tekočine oz. maziva, da vzpostavlja, zagotavlja in ohranja mazalni film ter zmanjšuje trenje in posledično obrabo sestavnih delov hidravličnih komponent. To nalogo mora opravljati oz. zagotavljati pri različnih obratovalnih temperaturah in različnih obremenitvah. Definirana je kot merilo za upor tekočine pod delujočim tlakom proti tečenju, njena vrednost pa je podana z razmerjem med delujočo strižno napetostjo in gradientom strižne hitrosti. Viskoznost tekočine je odvisna od vrste, možne kontaminacije z drugimi tekočinami, procesov staranja, glede obratovalnih pogojev pa od višine obratovalnega tlaka, strižne hitrosti, temperature in drugih pogojev.

Med omenjenimi vplivi je izrazita odvisnost viskoznosti od temperature, t. i. obnašanje viskoznost-temperatura (VT-obnašanje). Kako se viskoznost spreminja s temperaturo, podaja indeks viskoznosti – VI. Po definiciji je indeks viskoznosti brezdimenzijsko število, ki podaja, kako se viskoznost hidravlične tekočine spreminja s temperaturo, in načeloma velja za vsa tekoča maziva in tekočine, ki jih uporabljamo za prenos sil in gibanja. Tako velja: večja, kot je vrednost indeksa viskoznosti (visok indeks viskoznosti), manjša je sprememba viskoznosti tekočine za dano spremembo temperature in obratno. Pri tekočini z majhno vrednostjo indeksa viskoznosti (nizek indeks viskoznosti) se bo ob spreminjanju temperature občutno spreminjala tudi njena viskoznost. Nasprotno pa temperaturne spremembe ne bodo veliko vplivale na viskoznost tekočine z visokim indeksom viskoznosti.

Z naraščanjem temperature viskoznost upada in tekočina postaja vse bolj tekoča, kar zelo vpliva na lastnosti mazalnega filma, trenje in velikost puščanja komponent. Nasprotno pa pri nizkih temperaturah viskoznost narašča, kar vodi do problemov pri sesanju črpalk, do večjih uporov pri pretakanju, pri zelo

Prof. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo



Slika 1 : Vpliv višine indeksa viskoznosti na izkoristek in potencialne nevarnosti pri delovanju hidravlične naprave

nizkih temperaturah pa lahko v skrajnem primeru pride tudi do zaustavitve pretoka zaradi strditve tekočine (t. i. strdišče). Slednje lahko povzroči blokado filtra in posledično lom hidravličnega sistema ali naprave zaradi pojava intenzifikacije tlaka ali pa »suhi« tek črpalke in odpoved zaradi poškodb kavitacije. [1]

Razen teh skrajnih posledic pa v obratovalnem stanju tako prenizka kot previsoka viskoznost povzročata občutno poslabšanje izkoristka naprave, tako volumetričnega kot hidravlično-mehanskega in skupnega izkoristka. Pomembnost indeksa viskoznosti in vpliv viskoznosti na izkoristek hidravlične naprave prikazuje *slika 1*.

Višje vrednosti indeksa viskoznosti povzročajo ugodnejše obnašanje viskoznosti od temperature, t. i. ugodno VT-obnašanje, kar pomeni manjše spreminjanje viskoznosti s temperaturo. Gledano s stališča črpalke, ki ob startu hidravličnega sistema prva prične opravljati delo in je med obratovanjem najbolj in trajno obremenjena, visoka vrednost indeksa viskoznosti pomeni manj problemov tako ob zagonu kot med trajnim obratovanjem. To je še posebej pomembno, če gre za zaostrene obratovalne pogoje, kot so nizke temperature na eni strani in višje obratovalne temperature na drugi.

2 Določanje indeksa viskoznosti

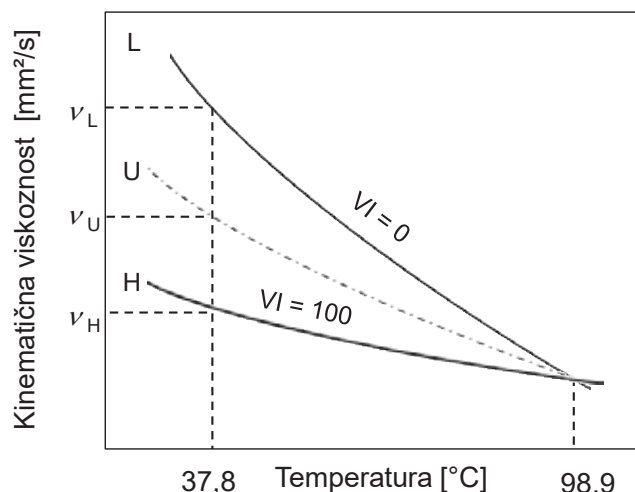
Določanje indeksa viskoznosti temelji na merjenju kinematične viskoznosti tekočine, ki jo običajno izvajamo s kapilarnimi viskozimetri, npr. s Cannon-Fenskejevimi viskozimetri, iz katerih tekočina izteka le zaradi lastne težnosti. Meritev je enostavna, hitra in natančna, postopek pa izvajamo skladno s standardom ASTM D-445. Standardni temperaturi merjenja sta 40 °C in 100 °C, potrebujemo pa približno 100 ml vzorca tekočine. Podatka za kinematično viskoznost pri obeh temperaturah sta tudi osnova za določanje indeksa viskoznosti. [2]

Viskoznost izračunamo na podlagi konstante viskozimetra K in s štoparico izmerjenega pretočnega časa t med oznakama na viskozimetru. Pretočni čas merimo v sekundah, z natančnostjo 0,1 sekunde. Za vsako določitev viskoznosti potrebujemo 2 ali 3 meritve oziroma meritve ponavljamo, dokler razlika dveh izmerjenih časov ni manjša od 0,2 %. Srednja vrednost meritev se uporablja za izračun kinematične viskoznosti po enačbi (1).

$$v = K t \quad (1)$$

v [mm²/s] – kinematična viskoznost
 K [mm²/s²] – konstanta viskozimetra
 t [s] – povprečna vrednost meritve časa

Indeks viskoznosti lahko obravnavamo tudi kot merilo za »stabilnost« viskoznosti pri temperaturnih spremembah hidravlične tekočine. Zaželen visok indeks viskoznosti oz. velika številčna vrednost pomeni, da ima tekočina boljšo viskozno stabilnost pri temperaturnih spremembah (= manjša sprememba viskoznosti pri spremembi temperature).



Slika 2 : Princip določanja indeksa viskoznosti [3]

Postopek določanja indeksa viskoznosti izhaja iz primerjave obnašanja viskoznost-temperatura različnih baznih mineralnih olj. Že leta 1920 je bilo znano, da so bila pennsylvanska bazna olja boljša od tekasaških. Pennsylvanska bazna olja so imela najboljše viskozno-temperaturne karakteristike, medtem ko so imela tekasaška najslabše, saj se je njihova viskoznost močno spreminjala s temperaturo. Da imajo različna olja različen potek oz. različen naklon krivulje (desetiška skala za vrednost viskoznosti) oz. premice (logaritmična skala za vrednost viskoznosti), prikazuje slika 2 – ASTM-diagram. [3]

Z vidika tehnike se je pojavila potreba po parametru, ki bi za določeno mineralno olje natančno podajal odvisnost viskoznosti od temperature. Leta 1929 je bil v ta namen vpeljan indeks viskoznosti. Indeks viskoznosti je empirični parameter, ki primerja določeno vrsto olja z dvema referenčnima oljema, katerih viskoznost se zelo različno spreminja s temperaturo. Referenčni olji sta bili izbrani tako, da imata eno od njiju indeks viskoznosti enak 0, drugo pa 100 pri temperaturi 100 °F (37,8 °C), vendar imata pri temperaturi 210 °F (98,89 °C) enako viskoznost kot olje, ki mu določamo indeks viskoznosti, kot prikazuje slika 2.

Ker sta pennsylvansko in tekasaško olje imeli enako viskoznost pri 210 °F (98,9 °C), sta bili izbrani kot referenčni olji. Baznemu olju iz Pennsylvanije je bila za indeks viskoznosti dodeljena vrednost VI = 100, medtem ko je bila tekasaškemu baznemu olju dodeljena vrednost VI = 0. Indeks viskoznosti lahko izračunamo z enačbo (2).

$$VI = \frac{(L - U)}{(L - H)} \cdot 100 \quad (2)$$

Kinematično viskoznost opazovanega olja najprej izmerimo pri temperaturi 40 °C (parameter U) in nato pri 100 °C. Nato iz tabele ASTM D 2270-4 določimo parametra L in H glede na viskoznost opazovanega olja pri 100 °C. Ko podatke vstavimo v enačbo (2), dobimo izračunano vrednost indeksa viskoznosti opazovanega olja [4]. Enak postopek določanja vrednosti indeksa viskoznosti uporabljamo tudi za druge vrste hidravličnih tekočin.

Indeks viskoznosti večine pridobljenih in uporabljenih rafiniranih mineralnih olj na tržišču je približno 100, medtem ko imajo večpodročna in sintetična

olja vrednost indeksa viskoznosti približno 150 (ali tudi več). Vrednosti indeksa viskoznosti za različne hidravlične tekočine so različne, prav tako so različni tudi poteki krivulj oz. premic.

3 Vrednosti indeksa viskoznosti običajnih mineralnih hidravličnih olj

Popolnoma formulirana hidravlična tekočina je sestavljena iz mešanice osnovne tekočine in dodatka/ov. V primeru mineralnih hidravličnih olj je to bazno olje in določen paket dodatkov. Pri tem je potrebno omeniti, da je kvaliteta baznega olja odvisna od nahajališča surove nafte, prav tako se razlikujejo tudi paketi dodatkov različnih proizvajalcev. Ameriški inštitut za nafto (API – American Petroleum Institute) osnovne tekočine razvršča v pet skupin – API 1509, Dodatek E. Razlika med skupinami temelji na metodi rafiniranja surove nafte, količini nasičenih snovi, viskoznosti in deležu žvepla. Proizvodi predelave surove nafte predstavljajo skupine od I do III v Tabeli 1. Standard API povzemajo tudi proizvajalci hidravličnih tekočin in proizvodov. [5]

Zaradi različnih proizvodnih postopkov, različnih baznih olj in paketov dodatkov imajo tekočine različno vsebnost nasičenih snovi in posledično tudi različne vrednosti indeksov viskoznosti. Tekočine iz skupine I do III imajo lahko tudi dodatke za izboljšanje indeksa viskoznosti, kar poveča njegovo vrednost. Skupini IV in V predstavljata sintetične tekočine. Pri tem vsebuje skupina IV polialfaolefinska (PAO) bazna olja in skupina V vse druge tekočine, ki ne sodijo v skupine od I do IV; sem spadajo na primer biološko hitreje razgradljive tekočine vrst HEES, HETG in HEPR.

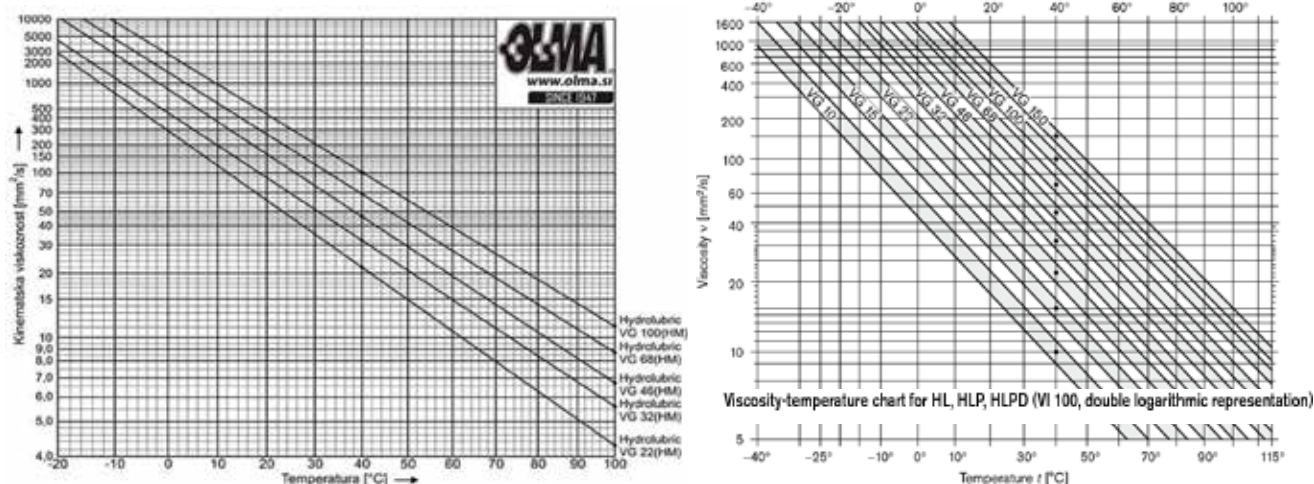
Na vrednost indeksa viskoznosti tako vpliva kar nekaj faktorjev, ki npr. pri mineralnem hidravličnem olju istega razreda viskoznosti (VG) pripeljejo do različnih nagibov linije v diagramu viskoznost-temperatura (VT) in posledično do širšega ali ožjega obratovalnega temperaturnega področja.

Splošna izjava, ki jo pogosto zasledimo v literaturi, da je vrednost indeksa viskoznosti za mineralna hidravlična olja okoli 100, je tako zelo »ohlapna«. Enako velja za linije, prikazane v VT-diagramu: te niso idealno vzporedne in enakomerno odmaknjene druga od druge, odvisno od razreda viskoznosti. Znan

Tabela 1: Specifikacija baznih olj po API [5]

Vrsta olja	Mineralna bazna olja			Sintetična bazna olja	
Skupina	I	II	III	IV ¹⁾	V
Zasičenje	<90 %	>90 %	>90 %	100 %	Vse druge vrste tekočin, vključno HEES, HEPG, HEPR
Indeks viskoznosti	80 do 120	80 do 120	>120	>135	
Žveplo	>0,03 %	<0,03 %	<0,03 %	-/-	
Način pridobivanja	rafinirano s topilom	hidrotretirano	hidrokrekirano	sintetizirano	
Polarnost	visoka	nizka	nepolarna	nizka	običajno visoka

¹⁾ Skupina IV – polialfaolefini



Slika 3 : VT-diagram proizvajalca olja (levo) oz. proizvajalca hidravličnih črpalk (desno)

podatek o (različni) številki šarže hidravličnega mineralnega olja istega viskoznostnega razreda (znano bazno olje in znan paket dodatkov) lahko pojasni, zakaj so izmerjene vrednosti indeksa viskoznosti za olje različne oz. kolikšne so za določeno šaržo. Ta podatek uporabniku olja praviloma ni znan.

Običajni videz VT-diagrama proizvajalca olja ali hidravličnih črpalk, kakršne običajno najdemo v njihovih podatkovnih listih, prikazuje *slika 3*.

Dejansko vrednost indeksa viskoznosti točno določenega proizvoda lahko ugotovimo z opisano meritvijo viskoznosti in izračunom indeksa viskoznosti. Za določanje vrednosti indeksa viskoznosti mineralnih hidravličnih olj z različno stopnjo viskoznosti in šarže smo uporabili hidravlična mineralna olja vrste Hydrolubric VG (proizvajalca OLMA, d. o. o.). Za merjenje smo uporabili olja različnih viskoznostnih razredov po ISO (VG 22, VG 32, VG 46, VG 68 in VG 100), pri čemer je bilo olje VG 46 dveh različnih šarž. Natančne vrednosti viskoznosti kot tudi gostote uporabljenih mineralnih olj, izmerjene v laboratoriju proizvajalca, so podane v *Tabeli 2*.

Za splošno rabo in obratovalne pogoje lahko za določanje širine temperaturnega obratovalnega področja uporabljamo VT-diagrame, ki jih podajajo proiz-

vajalci mineralnih olj ali črpalk, in tako uporabimo načelno izjavo oz. podatek, da znaša indeks viskoznosti mineralnega hidravličnega olja okoli vrednosti 100. Vsekakor pa je dobro poznati interpretacijo indeksa viskoznosti in ozadje pojavljanja razlik pri vrednosti indeksa viskoznosti.

V primerih, ko pa ne gre več za običajne obratovalne pogoje, bodisi za področje nizkih temperatur (hladni start črpalke) ali visokih temperatur (mejno področje mazanja), pa postanejo te podrobnosti pomembne. Problem lahko rešimo z dodatki za izboljšanje indeksa viskoznosti mineralnih hidravličnih olj (oz. obnašanja viskoznost-temperatura) ali pa z uporabo druge vrste hidravlične tekočine. Slednje se izkaže kot edina možnost ob dodatni zahtevi glede okoljske sprejemljivosti tekočine ali ob zahtevi zagotavljanja požarne varnosti sistema.

4 Indeks viskoznosti in VT-obnašanje poboljšanih mineralnih olj in drugih vrst hidravličnih tekočin

V poglavju 3 smo omenili, da so lahko vrednosti indeksa viskoznosti primerljivega hidravličnega mineralnega olja različne od šarže do šarže – razlika

Tabela 2 : Izmerjene vrednosti viskoznosti in gostot testiranih hidravličnih olj

Razred viskoznosti ISO	Viskoznost pri 40 °C [mm²/s]	Viskoznost pri 100 °C [mm²/s]	Indeks viskoznosti [-]	Gostota pri 20 °C [kg/m³]
VG 22 / Š1	21,18	4,27	107	856,80
VG 32 / Š1	34,91	6,04	114	862,30
VG 46 / Š1	46,98	6,97	104	876,20
VG 46 / Š2	47,07	7,37	119	879,40
VG 68 / Š1	70,07	8,83	98	881,00
VG 100 / Š1	94,01	10,66	96	888,30

Opomba: Š1 – šarža 1, Š2 – šarža 2

v vrednosti indeksa viskoznosti za olje ISO VG 46 je prikazana v Tabeli 2. Olje šarže Š2 ima višjo vrednost indeksa viskoznosti ($VI = 119$) kot olje šarže Š1 ($VI = 104$) ter pričakovano boljše VT-obnašanje in posledično širše obratovalno temperaturno področje, ki ga določa črpalka s svojima najvišjo in najnižjo dopustno vrednostjo viskoznosti. Vpliv vrednosti indeksa viskoznosti ter razliko v širini obratovalnega področja za primer treh različnih vrst hidravličnih črpalk v tržni kvaliteti prikazuje *slika 4*.

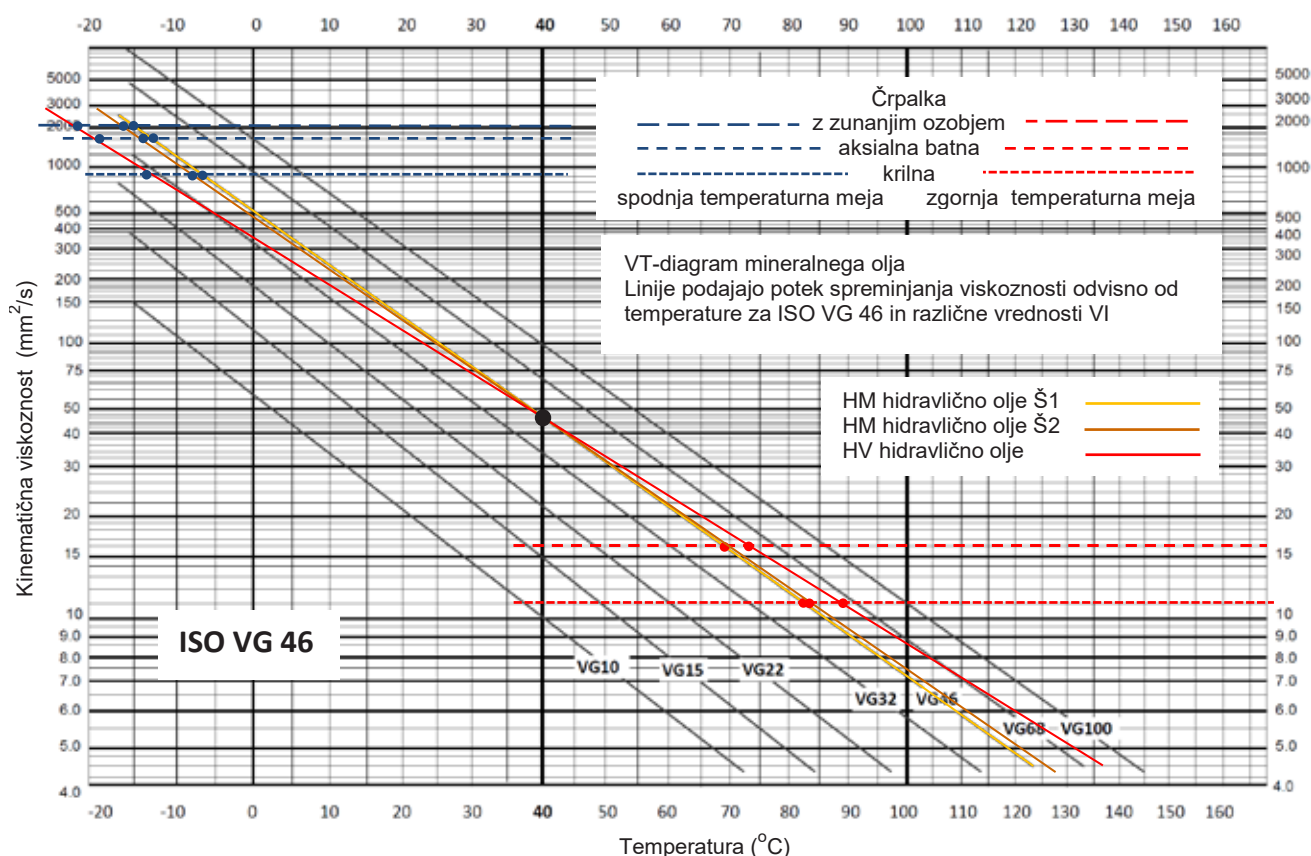
S praktičnega gledišča so razlike v vrednostih indeksa viskoznosti mineralnih olj istega kvalitetnega razreda, enakega razreda viskoznosti, a različnih šarž, glede širine temperaturnega obratovalnega področja malenkostne. Skladno s podatki navedenimi v Tabeli 2 te razlike zajemajo tudi vrednosti, podane v Tabeli 1, ter lastne izmerjene vrednosti mineralnih hidravličnih olj različnih viskoznostnih razredov. Tako tudi praktično za vsa mineralna hidravlična olja posplošeno velja, da vrednosti indeksa viskoznosti današnjih rafiniranih mineralnih olj na trgu znašajo približno 100. Z višjimi vrednostmi indeksa viskoznosti (>135 – Tabela 1) pa že pokrivamo temperaturno področje dveh ali treh gradacij viskoznosti – večpodročna olja. Na ta način lahko z oljem istega viskoznostnega razreda razširimo obratovalno temperaturno področje (mineralna olja vrste HV oz. HVLP).

Minimalne zahteve za hidravlična olja HV oz. HVLP predpisujejo standardi ISO 11158 oz. DIN 51523-3, DIN 51524 [6]. Skladno s standardom morajo tovrstna olja imeti indeks viskoznosti vsaj 140 ali višje. Pre-

gled ponudbe tovrstnih olj na tržišču razkriva dokaj velik razpon vrednosti indeksa viskoznosti: od vsaj 140, kot ga predpisuje standard, lahko tudi do 250. Slednjega proizvajalec označuje kot olje za uporabo v ekstremnih temperaturnih pogojih. Običajno so vrednosti med 150 in 180, podatek o vrednosti indeksa viskoznosti določenega olja je običajno naveden v podatkovnem listu proizvoda.

Načeloma velja, da dosežemo višje vrednosti indeksa viskoznosti z izbiro baznih olj, ki imajo že po naravi visoko vrednost indeksa viskoznosti (in tudi ceno), ter z ustreznim dodatkom. Ti pa so lahko različni. Dodatki, običajno so to polimerni aditivi, ki jih proizvajalci uporabljajo za izboljšanje vrednosti indeksa viskoznosti, so polimetakrilati (PMA), poliizobutilen (PIB), radialni poliizoprenski, olefinski sopolimeri (OCP) in drugi. Kot vidimo, obstaja več različnih vrst dodatkov in vsak bo imel svoj učinek.

Dodatki (imenovani tudi modifikatorji) za izboljšanje indeksa viskoznosti se običajno uporabljajo v večpodročnih motornih oljih, oljih za mazanje zobniških prenosnikov, oljih za mazanje samodejnih menjalnikov, oljih za servovolane, mazivih in nekaterih hidravličnih tekočinah. Pri nižji temperaturi ti dodatki omogočajo, da tekočina lažje teče in tako hitreje doseže ležaje ter jih zadovoljivo maže, pri hidravličnih črpalkah pa omogočajo lažje sesanje ob zagonu. Pri višji obratovalni temperaturi bo imela tekočina višjo viskoznost, kar zagotavlja potrebno debelino oz. trdnost mazalnega filma, ki zagotavlja nižje trenje.



Slika 4 : Vpliv vrednosti indeksa viskoznosti za hidravlična olja vrst HM in HV

Žal so ti modifikatorji običajno občutljivi na temperaturo. Pri nizkih temperaturah se polimerne verige v modifikatorjih strdijo ali zložijo in nimajo velikega vpliva na viskoznost tekočine. Pri višjih temperaturah se polimeri širijo, kar pomaga zvišati viskoznost in posledično ohraniti trdnost mazalnega filma. S tem je rešen problem zagotavljanja mazalnega filma pri višjih temperaturah, pri nizkih temperaturah pa problem hladnega starta črpalke ostaja in ga je potrebno reševati z drugimi vrstami dodatkov – npr. s t. i. izboljševalci točke tečenja (pour point depressant additives). [7], [8]

Ena glavnih težav pri dodatkih za izboljšanje VT-obnašanja je, da so občutljivi na mehanske strižne obremenitve. Te se pojavljajo pri toku tekočine skozi zaslonke in njim podobne oblike. Takšno delovanje lahko sčasoma razgradi polimere in zniža viskoznost tekočine. Strokovnjaki zato pogosto priporočajo dodatke, ki so stabilni na strižne obremenitve, da bi tako zagotovili, da tekočine z visokim indeksom viskoznosti učinkujejo, kot je bilo mišljeno. Odpornost dodatkov za izboljšanje indeksa viskoznosti na strižne obremenitve preverjajo z različnimi testi. [9], [10], [11]

Če je potrebno zagotoviti višjo požarno varnost hidravličnega sistema ali večjo biološko sprejemljivost hidravlične tekočine, mineralna hidravlična olja odpadejo. Potrebno je uporabiti druge vrste hidravličnih tekočin, npr. HF in HE. Druge vrste hidravličnih tekočin imajo druge značilne vrednosti viskoznosti

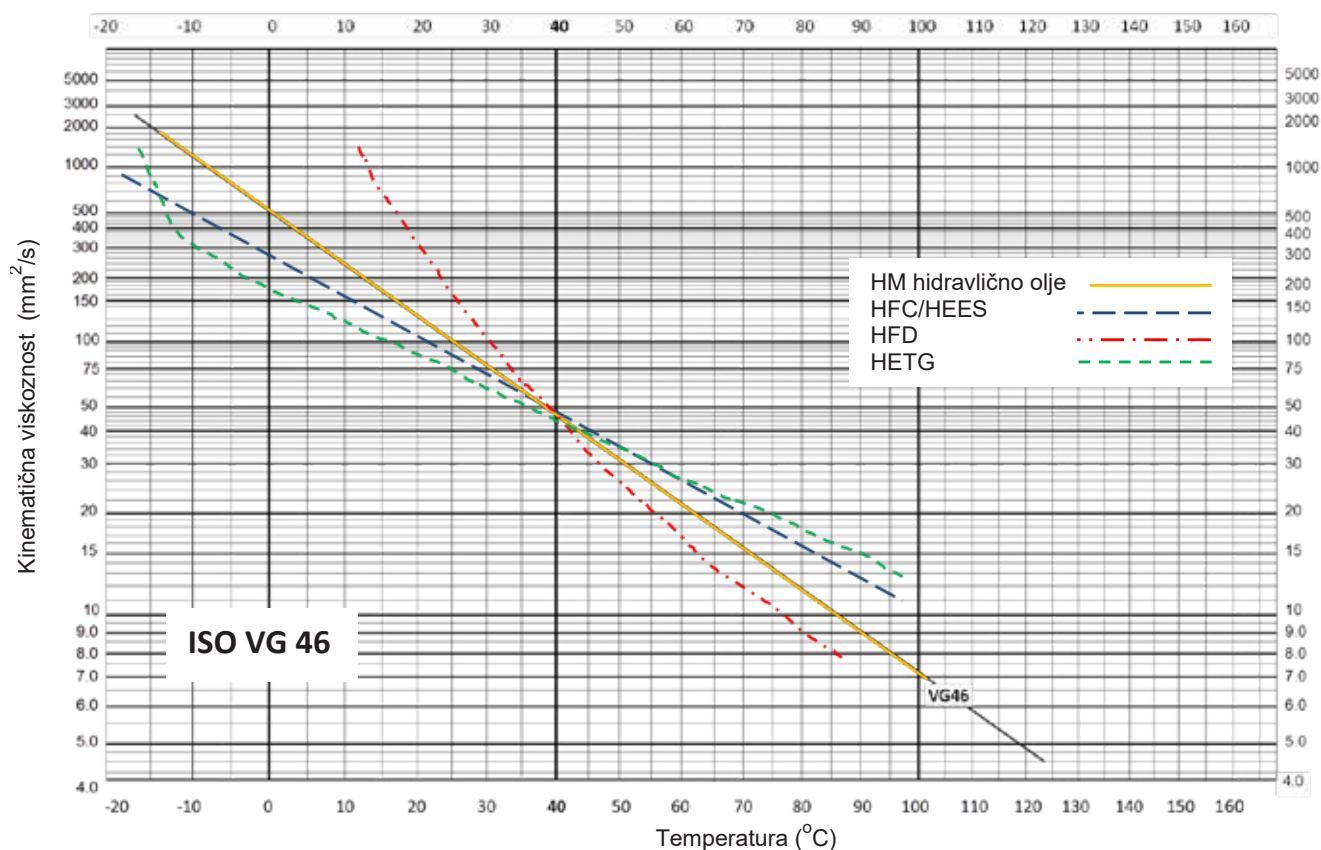
in drugačne poteke VT-obnašanja. VT-linija ni nujno premica, lahko je krivulja.

Potek VT-linij za različne vrste hidravličnih tekočin prikazuje *slika 5*. Pri mineralnem olju vrste HLP oz. težko vnetljivi tekočini vrste HFC poteka VT-linija preko relativno širokega področja temperature kot ravna premica. [12], [13]

V primeru tekočine HFD nimamo več opravka s premico, temveč s krivuljo. Ta narašča v spodnjem temperaturnem področju progresivno, njena viskoznost je tam veliko bolj temperaturno odvisna kot pri drugih vrstah tekočine. Pri biološko razgradljivih tekočinah HE prihaja pri nizkih temperaturah zaradi delne kristalizacije molekule do opaznega porasta viskoznosti sicer dokaj položnega poteka VT. Potek VT za estre naravnega izvora (HETG) ni linearen na celotnem področju temperatur. Zato potekov VT-linij, ki jih podajajo proizvajalci za različne tekočine, ne smemo avtomatično podaljšati izven podanega področja, če je npr. VT-diagram podan samo do 0 °C, izven področja morda premočrtna zakonitost ne velja več.

5 Indeks viskoznosti in VT-obnašanje ionskih tekočin

Vsaka od do sedaj omenjenih hidravličnih tekočin ni »idealna« in ima vsaj eno od »pomanjkljivosti«. Mineralnim oljem lahko npr. z dodatki (tudi občutno)



Slika 5: Odvisnost kinematične viskoznosti od temperature za različne hidravlične tekočine

izboljšamo VT-obnašanje, a samo v »smeri« višje viskoznosti pri višjih obratovalnih temperaturah. Za izboljšanje VT-obnašanja oz. možnost uporabe tekočine pri nižjih temperaturah (npr. pod cca $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) je potrebno dodati drugo vrsto dodatkov (za znižanje točke tečenja). Razen tega, da so potrebni dvojni različni dodatki, so dodatki za izboljšanje VT-obnašanja občutljivi na strižne obremenitve in sčasoma izgubijo svojo učinkovitost. Razen tega pa mineralna olja niso ognjevarna in najprijaznejša do okolja.

Hidravlične tekočine vrste HE imajo že v osnovi višji indeks viskoznosti (glej sliko 5) in bolj položne VT-linije kot mineralna olja, a pri tem moramo ostati, saj jih ni smiselno »doaditivirati«, ker potem izgubijo svojo okoljsko prijaznost. Naravni estri pa postanejo pri temperaturah pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lojasti – pojavljati se pričnejo voskasti kosmiči, ki povzročajo probleme pri delovanju hidravličnega sistema. Vse tekočine vrste HE na osnovi estrov tudi niso deklarirane kot ognjevarne.

Tudi določene HF-tekočine imajo ugodno VT-obnašanje, predvsem tiste na osnovi vode. Nekatere od teh lahko uporabljamo tudi pri temperaturah nekaj pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (npr. HFC nekje do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), druge pa ne (npr. HFA). V smeri višjih temperatur pa je obratovalno temperaturno področje omejeno zaradi problema izhlapevanja in nevarnosti kavitacije. Prav tako je potrebno biti pozoren na način in pogoje skladiščenja teh tekočin. Podobno velja za uporabo čiste vode kot alternativne hidravlične tekočine, za katero veljajo enake omejitve, dodatno k temu pa je potrebno z izbiro primernih materialov ali zaščitnih oblog na gradnikih obvladovati obseg puščanja in trenje. V primerjavi z drugimi hidravličnimi tekočinami pa je kinematična viskoznost vode tudi izredno nizka ($0,66\text{ mm}^2/\text{s}$ pri $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) [14], kar povzroča dodatne izzive pri izdelavi ozkih toleranc in rež v hidravličnih komponentah. Z energetskega vidika in trenda uporabe nižjeviskoznih hidravličnih tekočin je njena nizka viskoznost po eni strani prednost, prav tako je tudi zanemarljiva odvisnost viskoznosti od temperature.

V primeru uporabe visokohitrostnih črpalk, npr. pri mobilni hidravliki, ali v primeru uporabe hitrostno reguliranih konstantnih črpalk v stacionarnih hidravličnih sistemih, pa tudi pri dolgih hidravličnih ceveh, bo nižja viskoznost uporabljene hidravlične tekočine povečala učinkovitost delovanja celotnega sistema. Pri uporabi tekočine nižjega viskoznostnega razreda, npr. ISO VG 32 ali ISO VG 22, pride še posebej do izraza visok indeks viskoznosti. To še posebej velja za mobilne stroje in druge hidravlične naprave, ki obratujejo pri nizkih temperaturah.

Kot hidravlične tekočine, ki združujejo dobre lastnosti HV, HE in HF tekočin, a brez njihovih pomanjkljivosti, so ionske tekočine. V zadnjem obdobju so dobro prestale vse trajnostne teste in se vse bolj uveljavljajo v praktičnih rešitvah.

Ionske tekočine (IL) predstavljajo novo vrsto tekočih visokotehnoloških materialov, maziv, z izjemnimi snovnimi in obratovalnimi lastnostmi. V smislu dobrih mazalnih lastnosti imajo visoko točko zavaritve, majhno obrabno kaloto, glede drsnih lastnosti imajo nizek koeficient trenja tudi pri višjih obratovalnih temperaturah. S smiselno izbiro materialov in konstrukcijskih ukrepov, kakršne poznamo npr. pri nekaterih HF-tekočinah, ni problemov s protikorozijsko zaščito in združljivostjo z materiali, kakršne uporabljamo v hidravličnih sistemih. Razen tega so v primerjavi z drugimi vrstami hidravličnih tekočin tudi okolju prijazne, saj ionske tekočine sestavljajo ioni in kationi organskega izvora, imajo primerno (sintetizirano) osnovno viskoznost in (po naravi) visok indeks viskoznosti. Tako so brez kakršnih koli dodatkov temperaturno zelo stabilne, negorljive, viskoznost pa se s spreminjanjem temperature zelo malo spreminja. Dodatno k temu pa imajo izredno nizko točko tečenja, nižjo vsaj od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar omogoča start naprave in njeno delovanje pri izredno (ekstremno) nizkih temperaturah okolja. [15] do [19]

V *Tabeli 3* je podan le del rezultatov lastnih raziskav, ki se nanašajo na kinematično viskoznost in indeks viskoznosti za določene preizkušene ionske tekočine. Vrednosti so podane samo za tiste preizkušene IL, ki so izkazale vse prej omenjene snovne lastnosti, potrebne kot pogoj za uporabo v hidravličnih sistemih. Za neposredno primerjavo so prikazane tudi vrednosti za mineralno hidravlično olje vrste HM/HLP, za dva različna razreda viskoznosti.

Prva analizirana ionska tekočina IL1, o kateri pogosto poročajo v literaturi, je 1-etil-3-metilimidazoli-jev etilsulfat (EMIM-EtSO₄). Na podlagi rezultatov, podanih v *Tabeli 3*, je razvidno, da ima IL1 EMIM-EtSO₄ pri isti temperaturi nekoliko nižjo viskoznost kot mineralno olje (na spodnji tolerančni vrednosti razreda VG 46), vendar veliko višjo vrednost indeksa viskoznosti, kakršen je značilen že za mineralna olja vrste HV. To dokazuje, da je njeno VT-obnašanje veliko boljše kot pri klasičnem mineralnem olju. Vrednosti teh dveh parametrov že kažejo smer k tekočini s širokim razponom področja obratovalnih temperatur. Tudi za vse druge IL velja, da imajo že v osnovi višje vrednosti indeksa viskoznosti, kot ga imajo mineralna hidravlična olja.

S svojimi vrednostmi izstopa IL6, ki ima enako viskoznost kot mineralno olje razreda ISO VG 22, a veliko višji indeks viskoznosti. Izmerjena viskoznost pri $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ v primeru mineralnega olja ISO VG 22 znaša $4,41\text{ mm}^2/\text{s}$, v primeru IL6 pa $7,729\text{ mm}^2/\text{s}$. Takšna vrednost za najnižjo še dovoljeno kinematično viskoznost v primeru mineralnega olja odgovarja temperaturam med $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri enakih temperaturah je v primeru IL6 trdnost mazalnega filma večja kot v primeru mineralnega olja. Vpliv indeksa viskoznosti na širino območja delovne temperature je prikazan na *slikah 6* in *7*.

Slika 6 prikazuje širino območja obratovalne temperature pri uporabi standardnega mineralnega hi-

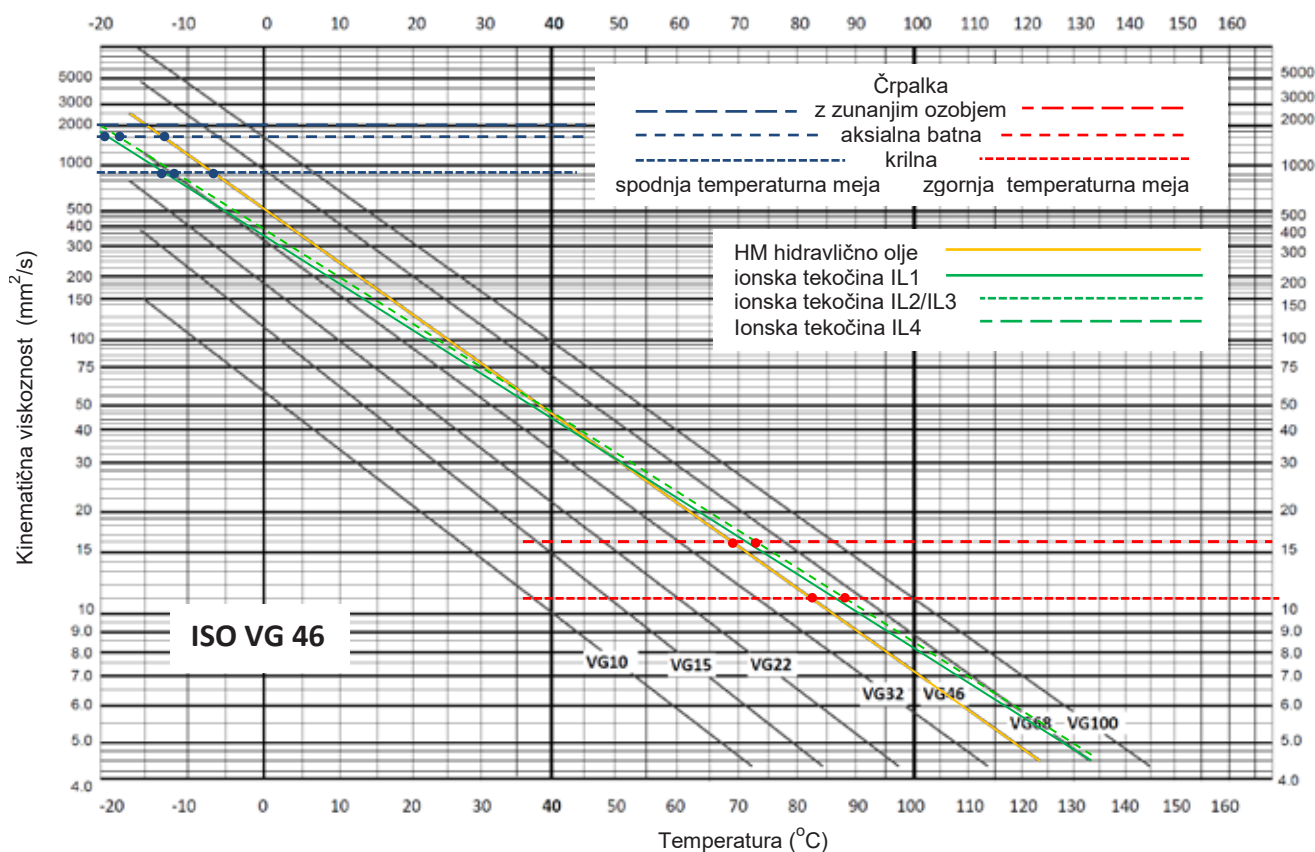
Tabela 3 : Primerjava vrednosti kinematične viskoznosti in indeksa viskoznosti za mineralni olji in nekaj testiranih IL

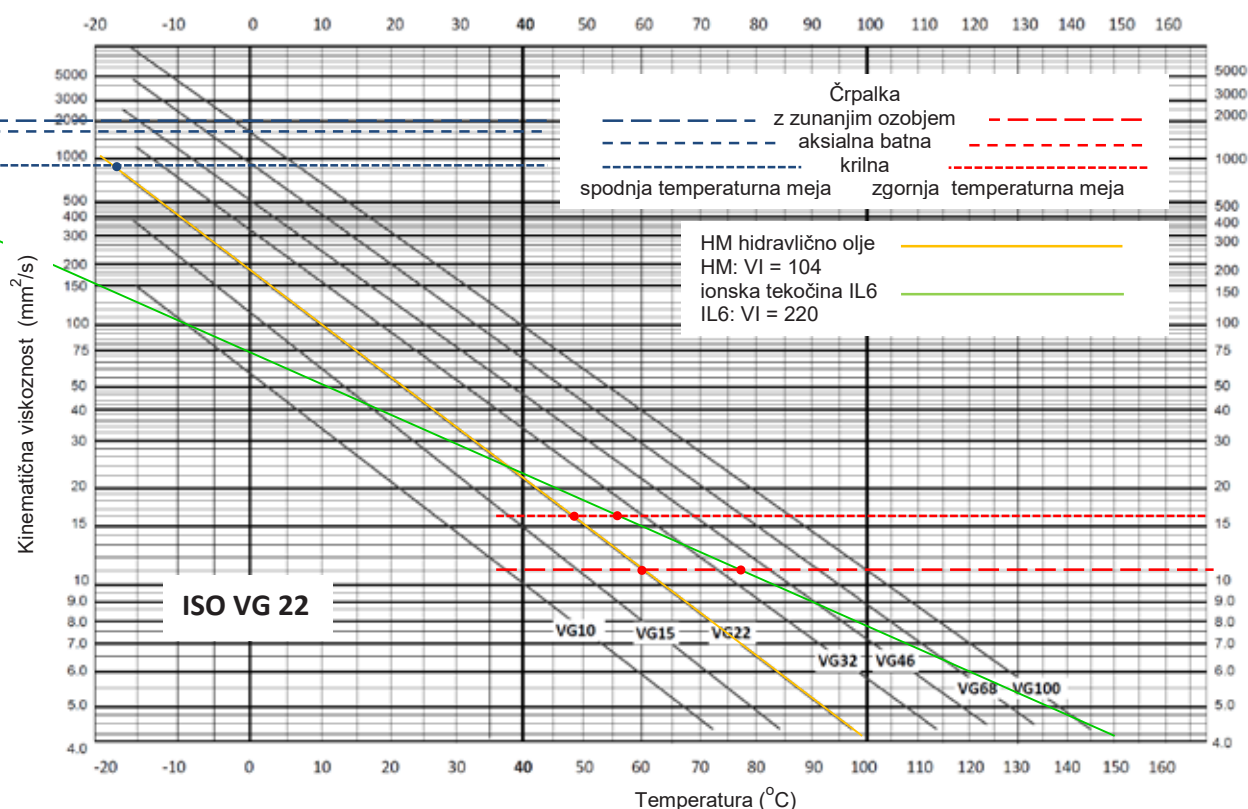
Lastnost [enota] metoda	Viskoznost 40 °C [mm ² /s] ASTM D 445	Indeks viskoznosti [-] ASTM D 2270
Vrsta tekočine		
Mineralno olje HM ISO VG 46	47,07	104
Mineralno olje HM ISO VG 22	22,10	107
IL1 EMIM-EtSO ₄	42,44	168
IL2 18PI163 (TOMA-DBP + 40 % NMP)	47,36	155
IL3 17PI045	46,59	155
IL4 B2002b	45,23	140
IL5 EMIM-TFSI	71,89	132
IL6 B2002a	19,97	220

dravličnega olja ISO VG 46 in primere ionskih tekočin istega viskoznostnega razreda. Mejne vrednosti dovoljenih viskoznosti so podane za tri različne vrste hidravličnih črpalk – za običajno krilno črpalko, za aksialno batno črpalko in za zobniško črpalko z zunanjim ozobjem. Dopusne vrednosti viskoznosti za posamezno črpalko so navedene v podatkovnem listu proizvajalca črpalke. Najvišja vrednost viskoznosti določa začetno viskoznost pri najnižjih vrednostih začetne temperature (tako imenovana dopustna viskoznost hladnega zagona). Najnižja vrednost viskoznosti je vrednost, ki še vedno zagotavlja zadostno mazanje in trdnost mazalnega filma v sami komponenti pri najvišji obratovalni tem-

peraturi. V obravnavanem primeru so uporabljene mejne vrednosti podane v podatkovnih listih istega proizvajalca vseh treh tipov črpalk in načeloma splošno veljajo za iste vrste črpalk.

V primerjavi z mineralnim hidravličnim oljem imajo ionske tekočine veliko višji indeks viskoznosti (glej vrednosti, podane v Tabeli 3), zato je območje delovne temperature veliko širše – praktično pokrivajo tri ali več razredov viskoznosti mineralnih olj. Čeprav je primerljiv učinek možno doseči tudi z uporabo večpodročnih olj s specialnimi dodatki, lahko zaradi teh dodatkov za izboljšanje viskoznosti dosežemo druge neželene stranske učinke.

**Slika 6 :** Obratovalno temperaturno področje hidravličnega olja HM in ionskih tekočin; vse viskoznostnega razreda ISO VG 46



Slika 7 : Obratovalno temperaturno področje hidravličnega olja HM in ionske tekočine z visokim indeksom viskoznosti; obe viskoznostnega razreda ISO VG 22

Podobna primerjava je prikazana na sliki 7, vendar v primeru nižje viskozne tekočine – razred ISO VG 22. V tem primeru je temperaturno področje uporabe ekstremno široko. Trend razvoja hidravličnih tekočin gre v smeri uporabe energetsko učinkovitih hidravličnih tekočin, za katere je značilna uporaba tekočin z nižjo viskoznostjo, a visokim indeksom viskoznosti in s tem pokrivanjem širokega razpona obratovalnih temperatur, z boljšimi mazalnimi lastnostmi, večjo prijaznostjo do okolja, manjšim vplivom temperature na obnašanje naprave in višjim skupnim izkoristkom celotnega hidravličnega sistema. Nekatere izbrane ionske tekočine v celoti izpolnjujejo te zahteve.

6 Zaključek

Za neoporečno delovanje hidravlične naprave je izredno pomembna uporaba hidravlične tekočine primerne viskoznosti. Tako prenizka kot previsoka vrednost viskoznosti povzročata številne pomanjkljivosti v delovanju naprave: na področju nizkih obratovalnih temperatur, ali, nasprotno, na področju visokih obratovalnih temperatur. Problem je možno zmanjšati z uporabo hidravličnih tekočin z višjo vrednostjo indeksa viskoznosti.

V prispevku je poglobljeno predstavljena problematika indeksa viskoznosti in VT-obnašanje običajnih in poboljšanih mineralnih olj ter drugih vrst hidravličnih tekočin. Na podlagi dejansko izvedenih meritev so pojasnjene razlike v vrednosti indeksa viskoznosti.

sti mineralnih olj iste vrste in istega razreda viskoznosti. V nadaljevanju je prikazan pomen dodatka za izboljšanje obnašanja viskoznost-temperatura in korist v smislu doseganja širšega področja obratovalnih temperatur. Za primerjavo so prikazani tudi poteki spreminjanja viskoznosti v odvisnosti od temperature za druge vrste hidravličnih tekočin.

Kot novejša možnost za doseganje izredno širokega področja obratovalnih temperatur se kot hidravlične tekočine uveljavljajo ionske tekočine. Širina področja obratovalnih temperatur je v prispevku prikazana za nekaj različnih vrst ionskih tekočin. Navedene so njihove značilne vrednosti indeksa viskoznosti, potek VT-linij in širina področja obratovalnih temperatur pa sta podana v primerjavi z mineralnim hidravličnim oljem. Ker so organske sestave, veljajo za »zelena maziva«, razen tega pa je točka vnetišča občutno višja kot pri mineralnih oljih.

Viri

- [1] Lovrec, D.: Fizikalno ozadje delovanja hidravličnih sistemov. 1. izd. Maribor: Univerzitetna založba Univerze: Fakulteta za strojništvo, 2018. VIII, 208 strani, ISBN 978-961-286-193-3. [COBISS.SI-ID 95187969].
- [2] ASTM D445-19: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).
- [3] Stachowiak, W. G, Batchelor, W. A.: Engineering Tribology, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0-7506-7304-4.

- [4] ASTM D2270-10: Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40°C and 100°C.
- [5] Danfoss: Hydraulic Fluids and Lubricants, Technical information Danfoss, št. publikacije: 520L0463 | BC00000093en-US0801, 44 strani, julij 2016.
- [6] DIN 51524/3: Pressure fluids – Hydraulic oils – Part 3: HVLP hydraulic oils, Minimum requirements.
- [7] Canter, N.: Viscosity Index Improvers, Tribology & Lubrication Technology, September 2011, 10 strani.
- [8] Rudnick, R. L.: Lubricant Additives – Chemistry and Applications, Second Edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, 2009, ISBN: 978-1-4200-5964-9, 776 strani.
- [9] Savant Labs: Shear Stability and Viscosity Loss, <https://www.savantlab.com/testing-highlights/testing-shear-stability-and-viscosity-loss/> (ogled: 1. 7. 2020).
- [10] Exxon Mobil Corporation: Hydraulic fluid shear stability; 2008, HY8011SH.
- [11] Ripa, M., Spanu, C., Ciortan, S.: Characterisation of Hydraulic Oils by Shear Stability and Extreme Pressure Tests, Tribology in industry, Volume 30, No. 3 & 4, 2008, str. 48–54.
- [12] Murrenhoff, H.: Fundamentals of Fluid Power, Part 1: Hydraulics, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-4817-9, IFAS, Aachen, 2016.
- [13] Remmelmann, A.: Die Entwicklung und Untersuchung von biologisch schnellabbaubaren Druckuebertragungsmedien auf Basis von synthetischen Estern, doktorska disertacija, RWTH Aachen, Wissenschaftsverlag Mainz, 2000.
- [14] Crittenden, J. C., Trussell, R. R., & all.: MWH's Water Treatment: Principles and Design, Third Edition Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Inc, 2012, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118131473.app3>.
- [15] Kambič, M., Kalb, R., Tič, V., Lovrec, D.: Compatibility of ionic liquids with hydraulic system components. Advances in production engineering & management, ISSN 1854-6250, Vol. 13, No. 4, str. 492–503, 2018, <https://doi.org/10.14743/apem2018.4.306>.
- [16] Haizhong, W., Qiming, L., Cheng, F. et al.: Friction and wear behaviors of ionic liquid of alkylimidazolium hexafluorophosphates as lubricants for steel/steel contact, Wear, Volume 256, Issues 1–2, January 2004, str. 44–48, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00255-2).
- [17] Kambič, M., Kalb, R., Lovrec, D.: Lubrication properties of ionic liquids suitable for use within hydraulic systems, Proceedings of International Conference Fluid Power 2015, Congress centre Habakuk, Maribor, Slovenia. Maribor: Faculty of Mechanical Engineering, str. 79–93, 2015.
- [18] Lovrec, D., Tič, V.: Ionic liquids as wide operating temperature range lubricant, New technologies, development and application III, ISSN 2367-3370, Vol. 128, Springer, 2020, vol. 128, str. 348–359, doi: 10.1007/978-3-030-46817-0_40.
- [19] Lovrec, D., Kalb, R., Tič, V.: Basic aspects when using ionic liquids as a hydraulic fluid, 12th International Fluid Power Conference, 2020, Dresden, Symposium, Vol. 1., str. 273–282, <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A70916/attachment/ATT-0/>.

Influence of the viscosity index of different hydraulic fluids on the operating temperature range

Abstract:

The viscosity of a hydraulic fluid is one of its most important material properties. The choice of the appropriate viscosity of the fluid for a particular application is one of the most important tasks of a hydraulic engineer. But the viscosity value itself is not the only important parameter when choosing the fluid. It is extremely important to know how the viscosity changes with temperature – viscosity-temperature behaviour. The latter is given by the VI – the viscosity index.

The paper presents the influence of the viscosity index of different hydraulic fluids on the width of the temperature operating range of a hydraulic device. The significance and method of determining the viscosity index is explained in the introduction, while the actual values of the viscosity index for common mineral hydraulic oils of ISO HLP quality and various ISO viscosity classes are shown. In the continuation of the paper, the typical values of the viscosity index of other types of hydraulic fluids are discussed for comparison: for mineral oil type HV with improved temperature-viscosity behaviour, and for HE and HF types of hydraulic fluid. The last part of the paper presents the advantages of using ionic liquids, which are newer, environmentally friendly and fire-resistant liquid lubricants, which are characterized by a high viscosity index and consequently a wide temperature operating range and a very low solidification point.

Keywords:

hydraulic fluids, viscosity index, determining, operating temperature range, mineral oils, ionic liquids

Zahvala

Raziskavo sta podprli podjetji OLMA d.o.o. iz Ljubljane in proionic GmbH iz Grambacha / Avstrija, ki sta zagotovili vse vzorce mineralnih olj in ionskih tekočin ter tako omogočili izvedbo raziskave. Še posebej smo hvaležni podjetju OLMA d.o.o., ki nam je omogočilo uporabo njihove opreme in naprav ter z nami delilo osebne izkušnje pri izvedbi meritev.