

Merjenje in vrednotenje viskoznosti hidravličnega olja z on-line senzorji

Vito TIČ, Darko LOVREC

Izvleček: Viskoznost hidravličnega olja je ena od pomembnejših veličin, ki jo je potrebno stalno spremljati, saj nam s spremembami svojih vrednosti daje pomembne podatke o stanju hidravlične naprave. Vrednost viskoznosti se ne spreminja samo s temperaturo, temveč tudi zaradi številnih drugih vplivov. Tako je npr. sprememba viskoznosti eden zgodnjih znanilcev povečanega staranja olja ali prisotnosti drugih kontaminantov.

V prispevku je v začetnem delu podano fizikalno ozadje viskoznosti, v nadaljevanju pa so predstavljeni najpogostejši načini merjenja viskoznosti, pri čemer je poudarek na principih, ki so primerni za uporabo v napravah za stalno, on-line spremljanje vrednosti viskoznosti. V zadnjem delu prispevka je predstavljen pomen interpretacije in ovrednotenja izmerjenih signalov in prikazana praktična vrednost on-line spremljanja viskoznosti.

Ključne besede: hidravlične tekočine, viskoznost, merjenje, obdelava signala

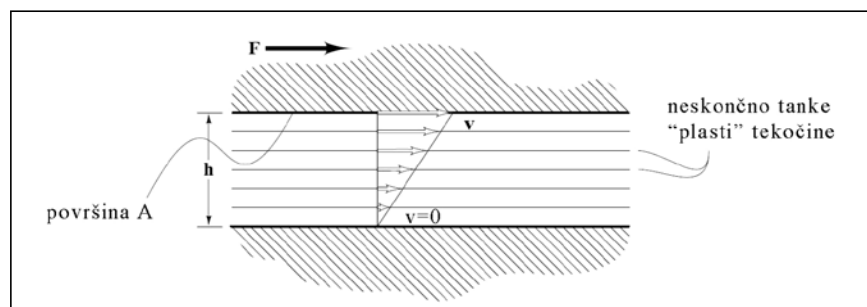
■ 1 Uvod

Mineralna olja so še vedno najpogostejše uporabljane tekočine v hidravličnih sistemih. Med obratovanjem so hidravlični sistemi podvrženi številnim negativnim pojavom, kot so povišana temperatura, trenje, obraba, vdor vode, ... Posledici teh pojavov sta običajno pospešena oksidacija oz. termična razgradnja olja ter povišana stopnja kontaminacije (tekoče ali trdne), ... kar se negativno odraža v delovanju hidravlične naprave. Za učinkovito zaznavanje teh pojavov oz. njihovih posledic je smiselno uvesti stalni, on-line nadzor stanja olja [1].

Vito Tič, univ. dipl. inž., Olma, d. d., Ljubljana
doc. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

Viskoznost hidravličnega olja je ena od pomembnejših veličin, ki jo je potrebno stalno spremljati, saj nam s spremembami svojih vrednosti daje pomembne podatke o stanju hidravlične naprave. Pri običajnih mineralnih hidravličnih oljih viskoznost zaradi delovanja mehanizmov staranja (polimerizacija, oksidacija, formacija netopnih snovi, ...) običajno narašča, zato je eden zgodnjih znanilcev staranja olja, seveda le v primerih, če pravočasno zaznamo spremembo viskoznosti. Zaradi tega je smiselno vre-

dnost viskoznosti hidravlične tekočine ne samo stalno nadzorovati, temveč tudi spremljati trende sprememb, kar v industrijskih postopkih in obratih ponuja možnost, da se ohrani kakovost procesa, npr. s pomočjo odkrivanja lažnih sprememb v procesu in z implementiranjem povratnih zank pri nadzoru procesa. Napredne tehnologije miniaturizacije splošno odpirajo nove možnosti pri razvoju senzorjev, ne le v smislu njihove geometrijske velikosti, ampak tudi z vidika principa delovanja.



Slika 1. Tekočina med dvema premikajočima se površinama

■ 2 Fizikalno ozadje viskoznosti

Zelo pomembna lastnost, ki opisuje pretok tekočin, je viskoznost (natančneje »strižna viskoznost«) tekočine, ki jo lahko opredelimo na podlagi preprostega eksperimenta, pri katerem je testna tekočina med dvema bočno premikajočima se ploščama podvržena strižnim obremenitvam (slika 1, [2]).

Dinamična viskoznost η je fizikalno opredeljena kot razmerje med strižno napetostjo τ (ohranjanje gibanja) in gradientom hitrosti toka (strižna hitrost $\dot{\gamma}$) tekočine med dvema ploščama:

$$\eta = \frac{\tau}{\partial v_x / \partial y} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Viskoznost dejansko predstavlja merilo za upor tekočine proti tečenju. Njena vrednost je podana z razmerjem med delujočo strižno napetostjo in gradientom strižne hitrosti. Viskoznost je pomembna lastnost olja tudi zaradi tega, ker vpliva na mazalni film ter s tem na trenje in obrabo.

2.1 Odvisnost viskoznosti od temperature

Znano je, da se viskoznost mineralnih olj močno spreminja s temperaturo. Z naraščajočo temperaturo vrednost viskoznosti olja precej hitro upade. V nekaterih primerih se lahko ob povišanju temperature za 25 °C zmanjša tudi za približno 80 %. Z inženirskega vidika je pomembno poznati vrednost viskoznosti pri delovni temperaturi, saj ta določa debelino mazalnega filma, ki ločuje dve kontaktni površini. Viskoznost olja pri določeni temperaturi lahko izračunamo iz enačb viskoznost-temperatura ali jo določimo s pomočjo grafa ASTM viskoznost-temperatura.

V literaturi je moč zaslediti več enačb, ki opisujejo obnašanje viskoznost-temperatura. Nekatere izmed njih so povsem empirične, medtem ko druge izhajajo iz teoretičnih modelov. Najpogosteje se uporabljajo enačbe, ki so povzete v tabeli 1. Med njimi je najbolj natančna Voglova enačba. Za določitev konstant iz te enačbe so

Tabela 1. Enačbe, ki opisujejo odvisnost viskoznosti od temperature [3]

Ime	Enačba	Opis
Reynolds	$\eta = b \cdot e^{-aT}$ (2)	ena izmed prvih enačb; natančna le za omejeno temperaturno območje
Slotte	$\eta = \frac{a}{(b + T)^c}$ (3)	razumna; uporabna pri numeričnih analizah
Walther	$(\nu + a) = b \cdot d^{1/T^c}$ (4)	osnova za graf ASTM viskoznost-temperatura
Vogel	$\eta = a \cdot e^{b/(T-c)}$ (5)	najbolj natančna; zelo koristna v tehniki

kjer črke v enačbah predstavljajo: a, b, c, d – konstante, ν – kinematična viskoznost [m^2/s], T – absolutna temperatura [K].

potrebne tri meritve viskoznosti pri različnih temperaturah.

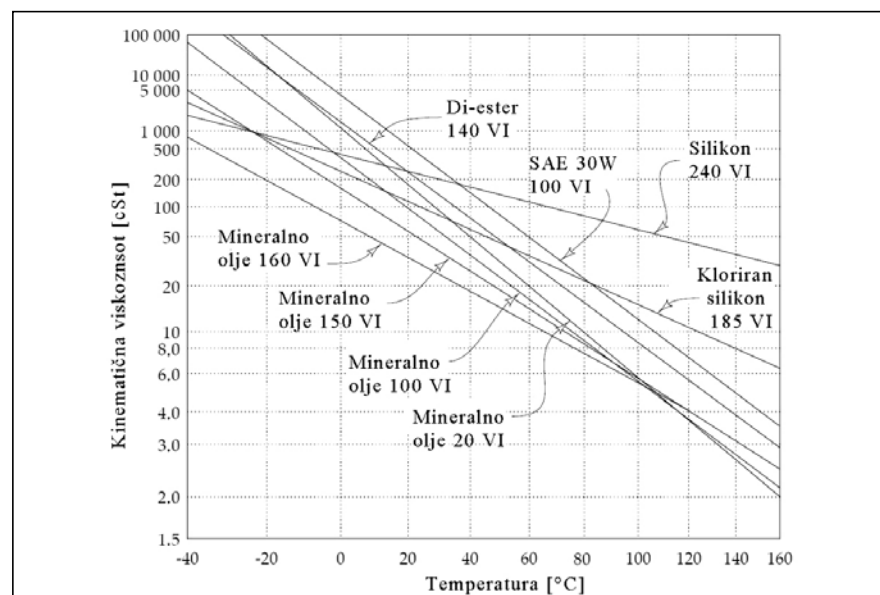
Pogosto se za določanje viskoznosti pri določeni oziroma delovni temperaturi uporablja diagram ASTM (American Society for Testing Materials – ASTM D341), ki je v celoti empiričen in temelji na Waltherjevi enačbi iz tabele 1 – enačba 4:

$$(\nu + a) = b \cdot d^{1/T^c}$$

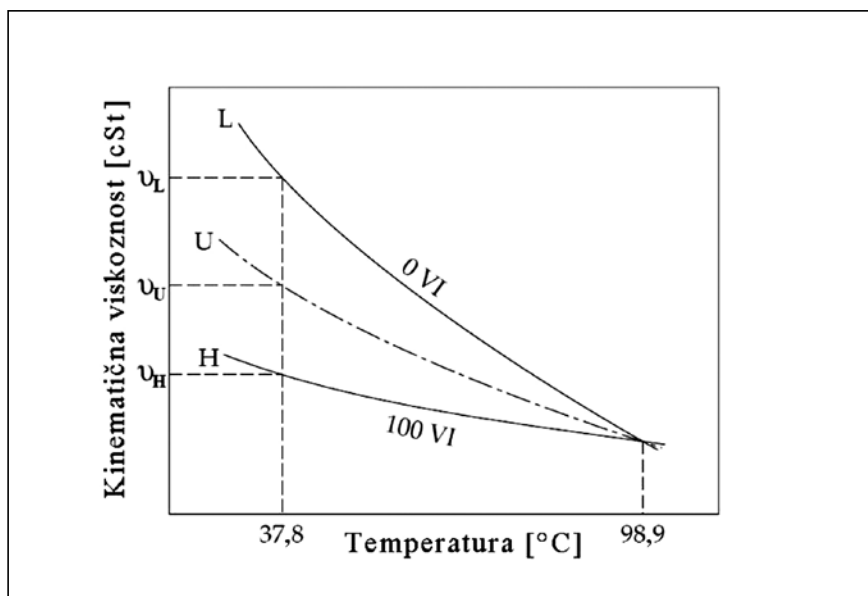
Čprav diagram temelji na tej enačbi, določene parametre v njej predpostavlja oziroma poenostavlja. Kljub temu

je diagram ASTM dokaj natančen in zelo dobro opisuje viskoznost mineralnih in sintetičnih olj v normalnih obratovalnih pogojih. Primer diagrama ASTM je prikazan na sliki 2.

S slike 2 je razvidno, da imajo različna olja tudi različni nakloni premice v diagramu ASTM. Že leta 1920 je bilo znano, da so bila t. i. pensilvanska bazna olja boljše od teksaških. Pensilvanska bazna olja so imela najboljše viskozno-temperaturne karakteristike, medtem ko so imela teksaška najslabše, saj se je njihova viskoznost močno spreminjala s temperaturo. Z vidika tehnike se je pojavila potreba po parametru, ki bi za določeno olje natančno opisoval odvisnost vi-



Slika 2. Diagram ASTM – odvisnost viskoznosti od temperature za različna olja



Slika 3. Ocenjevanje indeksa viskoznosti

skožnosti od temperature. Leta 1929 je bil vpeljan indeks viskoznosti. Ta parameter je povsem empiričen in primerja določeno vrsto olja z dvema referenčnima oljema, katerih viskoznost je zelo različno občutljiva glede na temperaturo. Referenčni olji sta bili izbrani tako, da ima eden od njiju indeks viskoznosti enak 0, drugi pa 100 pri temperaturi 100 °F (37,8 °C), pri temperaturi 210 °F (98,89 °C) pa imata enako viskoznost kot olje, ki mu določamo indeks viskoznosti. To prikazuje *slika 3*.

Ker sta imeli pensilvansko in teksaško olje enako viskoznost pri 210 °F (98,9 °C), sta bili sprva izbrani kot referenčni olji. Baznemu olju iz Pensilvanije je bil dodeljen indeks viskoznosti 100, teksaškemu pa 0. Indeks viskoznosti lahko izračunamo z naslednjo enačbo:

$$VI = \frac{(L-U)}{(L-H)} \cdot 100 \quad (6)$$

Tako se kinematična viskoznost opazovanega olja najprej izmeri pri temperaturi 40 °C in nato pri 100 °C. Nato se iz tabele ASTM D2270 (glej npr. [3]) določita parametra L in H glede na viskoznost opazovanega olja pri 100 °C. Ko se podatki vstavijo v enačbo (6), nam ta poda indeks viskoznosti opazovanega olja.

Indeks viskoznosti je inverzni parameter za zmanjšanje viskoznosti

s temperaturo olja. Visok indeks viskoznosti pomeni, da ima olje boljše viskozno stabilnost pri temperaturnih spremembah. Indeks viskoznosti večine rafiniranih mineralnih olj na tržišču je približno 100, medtem ko imajo multigradna in sintetična olja višji indeks viskoznosti, približno 150.

2.2 Odvisnost viskoznosti od tlaka

Znano je, da se viskoznost maziv povečuje s tlakom. Pri tlakih, precej višjih od atmosferskega, je ta učinek za večino maziv znatno večji kot učinek temperature ali striga. To je zlasti pomembno v triboloških sistemih, kjer prihaja do močno koncentriranih obremenitev površin, npr. v kotalnem ležaju ali v stiku zobniških dvojic. V takšnih primerih je lahko tlak tako velik oz. se lahko stopnja tlaka tako hitro poveča, da se mazivo obnaša kot trdno telo in ne kot tekočina [3].

V literaturi lahko zasledimo več različnih enačb, ki opisujejo odnos med tlakom in viskoznostjo maziva. Nekatere so zelo natančne, še posebej pri nizkih tlakih, medtem ko so druge precej zapletene in za prakso neuporabne. Najbolj znana (in uporabna) enačba za izračun viskoznosti maziva pri zmernem tlaku je Barusova enačba. Uporaba te enačbe je omejena, in sicer pri tlakih nad 5000 bar lahko privede do velikih napak.

Enačba je še toliko bolj nezanesljiva pri višjih temperaturah. Barusovo enačbo zapišemo:

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (7)$$

kjer je:

η_p – viskoznost pri tlaku p [Pas],

η_0 – viskoznost pri atmosferskem tlaku [Pas],

α – koeficient tlak-viskoznost [m^2/N],

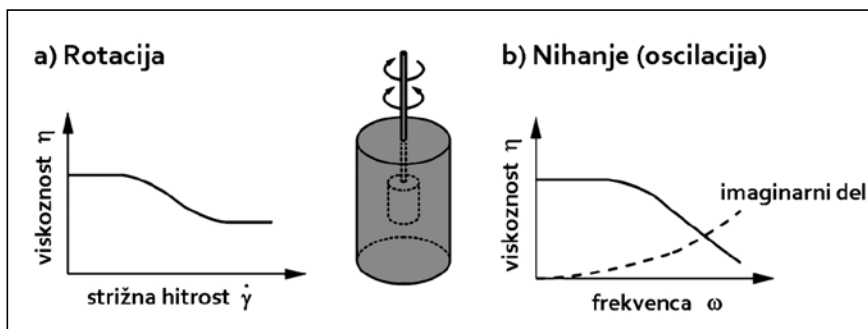
p – tlak [Pa].

3 Principi merjenja viskoznosti

Tako definirano viskoznost (kot je že predlagal Newton) je mogoče meriti neposredno z laboratorijskimi instrumenti, ki na nek način povzročajo strižno deformacijo na tekočino in pri tem merijo potreben navor (ali obratno: povzročajo navor in pri tem merijo rezultirajočo strižno deformacijo). Takšni merilni instrumenti navadno uporabljajo bodisi kontinuirano/stalno rotacijsko gibanje (izognitev dolгим vzdolžnim premikom, ki bi jih zahtevala preprosta meritev z bočno drsečima ploščama) ali nihajoče rotacijsko gibanje. Kot je opredeljeno v enačbi (1), je (izmerjena) viskoznost v večini primerov odvisna od obratovalnih parametrov, npr. delujoče strižne hitrosti. Preprost merilni instrument za merjenje viskoznosti, ki ga sestavlja vrtljiv valj, potopljen v viskozno tekočino, je shematsko prikazan na *sliki 4*. S pomočjo elektromotorja poganjamo valj, da dosežemo stalno rotacijsko gibanje ali rotacijsko nihanje.

Pri stalnem vrtenju je razmerje med dovedenim navorom in vrtilno hitrostjo povezano z viskoznostjo tekočine. Za t. i. newtonske tekočine to razmerje, ki opisuje viskoznost tekočine, ni odvisno od doseženih vrtljajev oz. – v smislu opredelitve enačbe (1) – viskoznost ni odvisna od strižne hitrosti, tj. $\eta = \text{konst}$.

Pri nihajočih (vibracijskih) meritvah bi valj opravljal npr. sinusna nihanja, kjer bi se razmerje (podobno kot prej) med dovedeno amplitudo navora in amplitudo kotne hitrosti lahko uporabilo kot merilo za viskoznost tekočine. Zgoraj opisano nelinearno



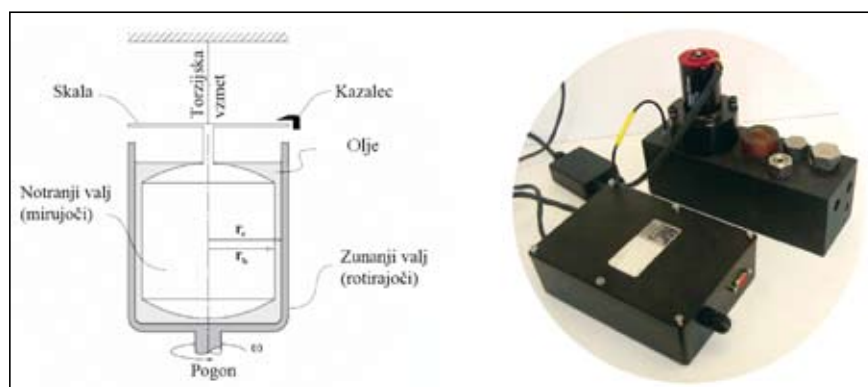
Slika 4. Osnovna principa merjenja viskoznosti: vrtilna in vibracijska (niha-joča) metoda

obnašanje bi v tem primeru pomenilo, da je izmerjena viskoznost odvisna od amplitude kotne hitrosti in navora. Poleg tega se lahko pojavi druga vrsta t. i. nenenewtonskega obnašanja tekočine: izmerjena viskoznost je lahko odvisna od frekvence, uporabljene pri sami meritvi.

Podrobnejši pogled nam razkrije, da se lahko pojavi tudi fazni zamik med signalom navora in signalom kotne hitrosti, kar dejansko predstavlja začetek elastičnega obnašanja tekočine. Ta pojav se pogosto označuje kot viskoelastično obnašanje in se lahko modelira s prilagojenim osnovnim kompleksnim zapisom, kjer imaginarni del viskoznosti predstavlja elastični del (po analogiji pride do podobnega pojava, ko ohmski upor dopolnimo z dodatnim kapacitivnim delom). Z vidika teorije sistemov tovrstno nenenewtonsko obnašanje tekočin ustreza linearnemu popačenju v odzivu sistema. Pri višjih frekvencah se lahko zgodi tudi nasproten pojav, npr. pretežno elastično obnašanje, pri katerem lahko skupna stisljivost tekočine kaže prispevke viskoznosti, pri čemer predstavlja koeficient stisljivosti imaginarni del, ki ustreza t. i. skupni viskoznosti tekočine. V nasprotju s strižno viskoznostjo je skupna viskoznost težko merljiva in nima posebne vloge pri analizi tekočin, zato je pogosto zanemarljena. V splošnem se lahko pojavijo tako linearni kot tudi nelinearni učinki, ki včasih vodijo do zapletenega nenenewtonskega obnašanja tekočin. V reologiji takšno obnašanje postavlja zanimiva vprašanja (na področju raziskav glej za dodatne informacije npr. [4]).

Na teh principih delujoči rotacijski viskozimetri so sicer robustni, a manj

pogosti v uporabi. Kot je bilo omenjeno, temeljijo na načelu, da viskoznost merjene tekočine povzroča upor med dvema premikajočima se površinama. Na trdno rotirajoče telo, potopljeno v tekoči ali poltrdni vzorec, deluje zaviralna sila, ki je premo sorazmerna z viskoznostjo vzorca. V teh viskozimetrih ena od površin miruje, medtem ko se druga vrti, prostor med njima pa zapolnjuje merjena tekočina (slika 5, levo).



Slika 5. Princip delovanja rotacijskega viskozimetra (levo) in industrijski on-line viskozimeter [5]

Meritve se izvajajo bodisi pri konstantnem navoru, ko viskoznost vpliva na spremembo hitrosti vrtenja, bodisi pri konstantni hitrosti, ko viskoznost vpliva na spremembo navora. Primer takšnega industrijskega on-line viskozimetra prikazuje slika 5 (desno).

3.1 On-line senzorji za merjenje viskoznosti

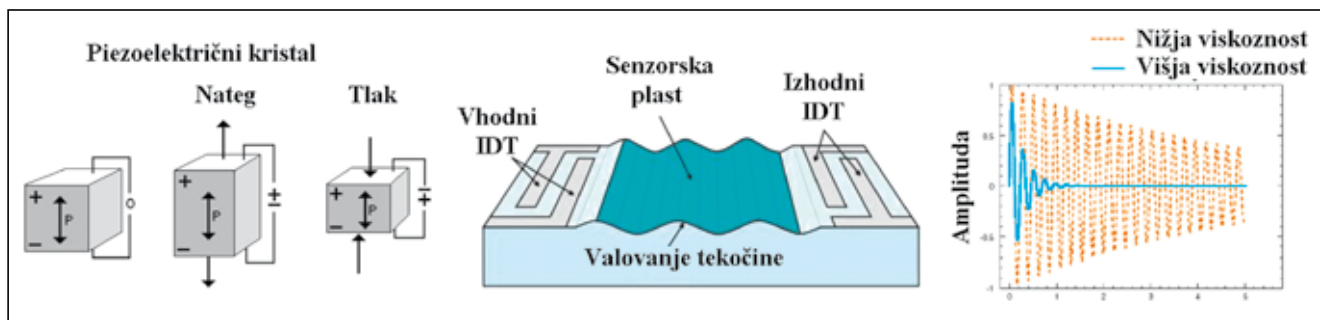
Večina današnjih on-line senzorjev viskoznosti, primernih za vgradnjo v hidravlične sisteme, temelji na principu delovanja piezoelektričnih kristalov, ki ob prisotnosti električnega toka oz. napetosti spremenijo svojo obliko. Tako se piezokristal v vlogi aktuatorja pod vplivom pozitivne-

ga električnega naboja razteza, pod vplivom negativnega električnega naboja pa krči. Vrsta takšnih kristalov je združena v t. i. interdigitalni pretvornik IDT (Interdigital Transducer), ki pretvori oscilirajočo vzbujevalno električno napetost v valovanje tekočine. Amplituda valovanja se s časom oz. potjo tekočine manjša v odvisnosti od njene viskoznosti. V primeru višje viskoznosti bo valovanje tekočine dušeno močnejše kot v primeru nižje viskoznosti. Amplitudo valovanja zaznava druga senzorska plast, ki prav tako temelji na delovanju piezoelektričnih kristalov, le da so v tem primeru kristali v vlogi generatorjev. Piezoelektrični kristal je lahko tudi generator, ki pod vplivom natezne obremenitve oddaja pozitivno električno napetost, pod vplivom tlačne obremenitve pa negativno napetost. Delovanje ponazarja slika 6. Opisani merilni princip je zelo občutljiv na kontaminacijo površine

in tvorbo oblog, kar je pogost problem večine današnjih izvedb tovrstnih senzorjev.

3.2 Umerjevalna krivulja viskoznosti

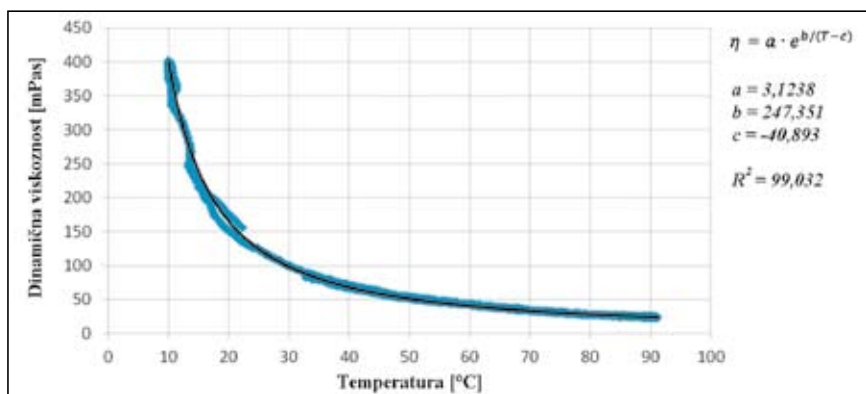
Kot je bilo že omenjeno, se viskoznost hidravličnega olja spreminja s tlakom in temperaturo. Ker potekajo meritve pri relativno nizkih in konstantnih tlakih, lahko vpliv tlaka zanemarimo. Nikakor pa ne smemo zanemariti vpliva temperature. Z naraščanjem temperature namreč viskoznost močno upada. Da bi natančneje določili spremembo viskoznosti hidravličnega olja v njegovi uporabni dobi, je smiselno posneti



Slika 6. Merjenje viskoznosti na principu delovanja piezokristalov

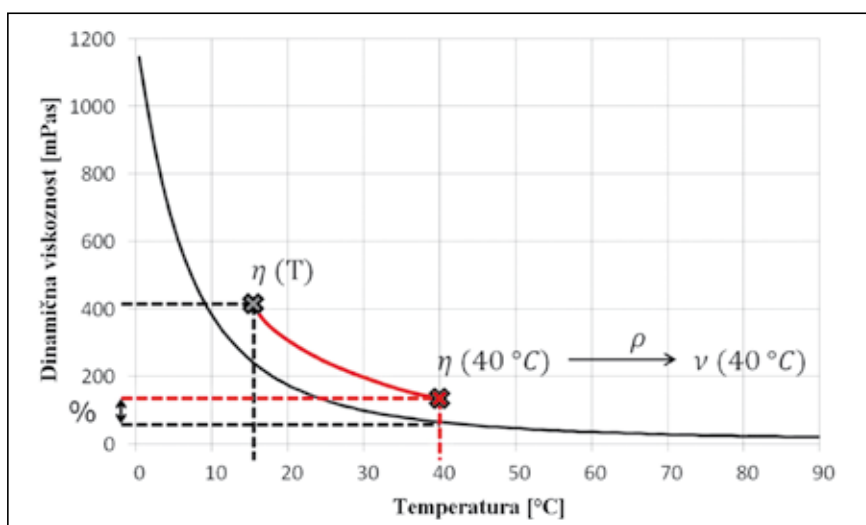
izhodiščno, t. i. umerjevalno krivuljo, ki prikazuje odvisnost med temperaturo in viskoznostjo.

Umerjevalna krivulja viskoznost-temperatura je bila v našem primeru posneta s senzorjem, delujočim na IDT-principu, in sicer v temperaturnem območju med 10 in 90 °C za primer najpogosteje uporabljane vrste hidravličnega mineralnega olja. Množico pridobljenih merilnih točk je po izvedenih meritvah potrebno še matematično oz. statistično ovrednotiti glede na znane enačbe, ki opisujejo odvisnost viskoznosti od temperature – glej tabelo 1, enačbe 2 do 5.



Slika 7. Umerjevalna krivulja hidravličnega olja HM oz. HLP z znano kinematično viskoznostjo

Eno izmed takšnih eksperimentalno dobljenih umerjevalnih krivulj ter določitev koeficientov a , b in c (Voglova enačba – enačba 2) za mineralno hidravlično olje kvalitetnega nivoja HM oziroma HLP in z znano kinematično viskoznostjo prikazuje slika 7. Kvaliteta pridobljene umerjevalne krivulje (funkcije) je podana z determinacijskim koeficientom R^2 .

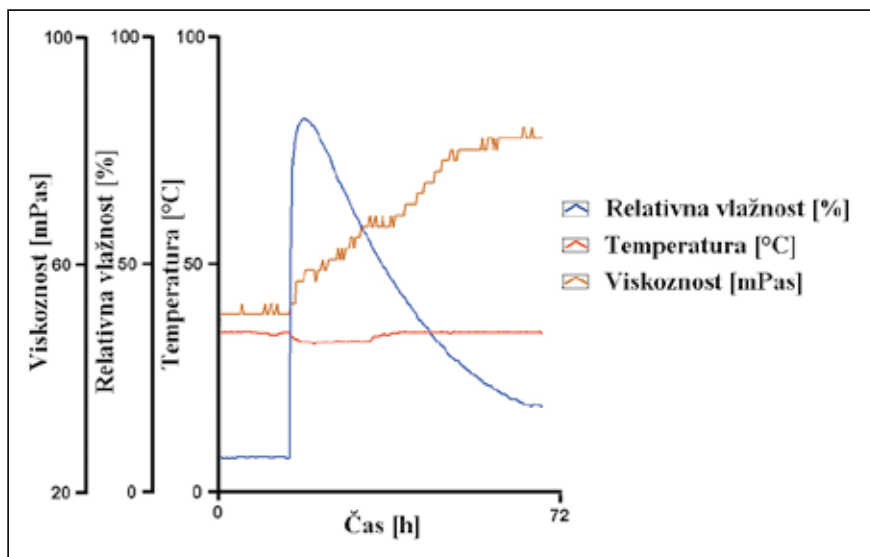


Slika 8. Umerjevalna krivulja viskoznost-temperatura za določen tip olja in meritev viskoznosti

■ 4 On-line spremljanje viskoznosti v praksi

Za on-line spremljanje viskoznosti poleg senzora običajno potrebujemo še ustrezno opremo za zajem, ovrednotenje, prenos in prikaz podatkov [6]. Na ta način lahko detektiramo in beležimo zgodovino oz. trend sprememb ter s tem zaznamo bodisi postopno naraščanje viskoznosti zaradi mehanizmov staranja bodisi nenadno

spremembo viskoznosti olja (dolitje olja drugačne viskoznosti). Pri tem je potrebno upoštevati metodo, ki je osnova delovanja senzora. Zaradi samega principa merjenja lahko namreč senzor v danem trenutku poda napačne, celo zavajajoče vrednosti, npr. pri kontaminaciji olja z vodo, kot to prikazuje slika 9. Tako je za natančno ovrednotenje stanja olja ključnega pomena meriti (zaznavati, poznati) čim več parametrov hkrati.



Slika 9. On-line meritev – sprememba dinamične viskoznosti pri kontaminaciji hidravličnega olja z vodo

Še bolje je imeti na voljo celotno zgodovino oz. trend sprememb od začetka polnitve stroja. Ne smemo pa pozabiti, da imata velik vpliv na meritev tudi mesto namestitve senzorja kot tudi sama pravilna namestitvev [6, 7].

■ 5 Zaključek

Viskoznost predstavlja eno izmed ključnih lastnosti hidravličnega olja in jo je potrebno vso uporabno dobo ohranjati na določeni vrednosti. Periodične laboratorijske meritve viskoznosti so vsekakor natančnejše, vendar imajo svojo pomanjkljivost – informacijo o viskoznosti podajajo le za vsak časovni interval, med katerim pa se lahko viskoznost že krepko spremeni. V nasprotju pa nam on-line senzorji viskoznosti podajajo bolj ohlapno informacijo o viskoznosti, je pa njihova prednost v tem, da je ta informacija na voljo 24 ur na dan, 365 dni v letu. Poleg tega, da lahko zaznamo trenutno poslabšanje

viskoznosti, tudi npr. dolitje neustrezne tekočine, ... nam sodobni SCADA-sistemi beležijo tudi zgodovino in trend sprememb, kar lahko postane močno diagnostično orodje za ocenjevanje stanja izrabljenosti olja [7].

Literatura

[1] V. Tič, M. Kambič, D. Lovrec: Uporabnost sistemov za on-line spremljanje stanja hidravličnih

olja, SLOTRIB '10, zbornik predavanj Posvetovanja o tehnični diagnostiki, mazivih in alternativnih gorivih; Ljubljana, 2010; str. 227–240.

[2] J. Kuntner, G. Stangl, B. Jakoby: Characterizing the rheological behavior of oilbased liquids: Microacoustic Sensors Versus Rotational Viscometers, 2005. IEEE Sens. J., 5 (5): 850–856.

[3] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor: Engineering Tribology, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 2001; ISBN 0-7506-7304-4.

[4] C. Macosko (1994): Rheology: Principles, measurements and applications. Poughkeepsie, 1994, NY: Wiley-VCH. ISBN: 0-471-18575-2.

[5] Caledonia Instrumentation Systems Ltd.: Rotational Viscometer, prospekt 2009.

[6] M. Kambič, V. Tič, D. Lovrec: Mehanizmi spreminjanja in on-line nadzor stanja hidravlične tekočine, Fluidna tehnika 2009, zbornik prispevkov; Maribor, 2009; str. 103–116.

[7] V. Tič, D. Lovrec: Avtonomni inteligentni sistem za oddaljeno spremljanje stanja hidravličnih olj, InfoKomTeh 2010, zbornik prispevkov; Ljubljana, 2010.



OLMA
LUBRICANTS®



Naložba v vašo prihodnost
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA
Evropski socialni sklad

Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007 – 2013, 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti, prednostne usmeritve 1.1.: Strokovnjaki in raziskovalci za konkurenčnost podjetij.

Measurement and evaluation of hydraulic oil viscosity using on-line sensors

Abstract: Viscosity of a hydraulic oil is one of the most important parameters, which should be monitored continuously, since changes in its value can reveal relevant information about the condition of the hydraulic device. Viscosity does not only change with temperature, but also with many other factors. Thus, this is i.e. one of the early indicators of increased oil aging or presence of other contaminants. Physical background of viscosity is presented in the introductory part of the article, followed by the presentation of the most common principles to measure viscosity, with emphasis on those that are suitable for use in devices for continuous, on-line monitoring of viscosity. The last part of the article presents the significance of interpretation and evaluation of measured signals and shows the practical value of on-line monitoring of viscosity.

Keywords: hydraulic fluid, viscosity, acquisition, signal processing