Trajnostno preizkušanje hidravličnih zobniških črpalk

Nejc Novak, Ana Trajkovski, Mitjan Kalin, Franc Majdič

Izvleček:

Hidravlični sistemi so vse bolj prisotni v vseh segmentih naših proizvodnih verig, kot so kmetijstvo, gradbeništvo, transport in razna industrijska področja. Ključni sestavni del vsakega hidravličnega sistema so praviloma črpalke. Z novo razvito napravo za testiranje zobniških črpalk smo izvajali trajnostne teste petih zobniških črpalk hkrati. Vse imajo ohišja iz aluminijevih zlitin in jeklene zobnike. Ena črpalka je testirana s standardnim srednjim testnim prahom (MTD), ena je testirana z namensko dodanimi dejanskimi obrabnimi delci za hidravlične teste, zadnje tri pa smo testirali pri pogojih brez dodajanja nečistoč, in sicer v osnovi s čistočo 20/19/17 po standardu ISO 4406. Spremljanje temperature na ohišju delujočih in s tem bolj ali manj obrabljenih črpalk kaže na povečevanje notranjega puščanja in zmanjševanje skupnega izkoristka vsake črpalke. Spremljali smo predvsem upadanje volumetričnih izkoristkov črpalk. Ugotovitve te raziskave prispevajo k trajnostnemu razvoju hidravličnih zobniških črpalk in s tem k izboljšanju učinkovitosti celotnih hidravličnih sistemov.

Ključne besede:

zobniška črpalka, čistoča olja, obrabni delci, testni prah, volumetrični izkoristek

1 Uvod

Uporabna doba hidravličnega sistema je časovno obdobje, v katerem se sistem uporablja gospodarno in učinkovito ter lahko vzdržuje želene temperature pri zahtevanih tlakih in pretokih, potrebnih za izvajanje želenih operacij. Na trajnost delovanja vplivajo številni parametri. Med najpomembnejšimi so kvaliteta hidravličnega olja, temperatura in čistoča olja. Eden najpomembnejših parametrov za daljšo uporabno dobo olja je čim nižja količina kontaminantov v olju, pa tudi vpliv tlaka, oksidacije, radiacijskega striženja in drugih dodatkov v olju. Vsi ti lahko sprožijo kemično reakcijo [1-4]. Več kot 70 % okvar v industrijskem delovnem procesu povzročijo kontaminanti v hidravlični kapljevini, pri čemer je med 60 % in 70 % vseh okvar posledica trdnih delcev [5]. Za izvajanje vzdrževanja hidravličnih sestavnih delov in posledično celotnih sistemov je čistost olja izrednega pomena [6-8]. Čistost olja je temelj stanja sistema.

V hidravlični kapljevini so številni delci – nekateri so nastali zaradi obrabe, drugi so prišli vanjo kot onesnaževalci iz okolice, nekateri pa obstajajo že od nastanka sistema. Dimenzije in sestava teh delcev bistveno vplivajo na delovanje sistema, še posebej, če je višina rež med površinami z medsebojno rela-

Nejc Novak, mag. dr. Ana Trajkovski, prof. dr. Mitjan Kalin, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., vs Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo tivno hitrostjo približno enaka velikosti delcev [9]. Delci med kontaktnimi površinami spodbujajo njihovo obrabo [10]. Kontaktne površine so tudi tiste, ki večino ali del časa niso v neposrednem kontaktu, a so med njimi reže reda velikosti le nekaj mikrometrov. Najpogostejša mehanizma obrabe sta tritelesna abrazija [11] in erozija [12].

ISO 12103-1 je standard, ki natančno popiše arizonski testni prah. Ta se uporablja za testiranje filtrov, saj ima ponovljivo porazdelitev velikosti in količine delcev [13]. Obstajajo štiri vrste testnega prahu: A1 zelo fini, A2 fini, A3 srednji in A4 grobi. Srednji testni prah (MTD, ang. medium test dust) se pogosto uporablja za pospešeno preizkušanje hidravličnih elementov in komponent. Testni prah je bolj abraziven od običajnih kontaminantov, ki jih najdemo v hidravličnih sistemih, in zato pospešuje obrabo hidravličnih komponent [14, 15]. Volumetrični izkoristek je odvisen od zmanjšanja dejanskega pretoka črpalke v primerjavi z začetnim (nova črpalka) predvsem zaradi obrabe tesnilnih površin komponent in njihovih sestavnih delov [16]. S tem je mišljena obraba tesnil, še večkrat pa obraba kontaktnih površin. Neposreden kontakt teh površin imenujemo včasih tudi »kovinsko tesnjenje«. Wang in sod. [17] so napovedali preostalo uporabno dobo (RUL) hidravlične zobniške črpalke z uporabo pospešenega preizkusa uporabne dobe zobniške črpalke. Uporaba te metode je učinkovito izboljšala izkoristek delovanja hidravličnega sistema in zmanjšala pogostost okvar. Zobniške črpalke so preučevali tudi Ranganathan in sod. [18] in Frith [19] z uporabo preskusnega prahu. Ugotovljeno je bilo, da so najbolj vplivni dejavniki za zmanjšanje pretoka črpal-

HIDRAVLIČNE ZOBNIŠKE ČRPALKE

ke: kemična sestava, trdota, porazdelitev velikosti in število delcev, ki so povzročili obrabo kritičnih tesnilnih elementov. Obstajajo številne simulacije hitrosti pretoka zobniških črpalk, ki so jih opravili Rundo [20], Casoli [21], Malsavi [22] in drugi, kar kaže na uporabnost takih orodij.

Raziskovalci so raziskovali vpliv temperature na volumetrični izkoristek črpalke [23] in ugotovili da nadzorovanje temperature hidravlične kapljevine (olja) omogoča stabilen proces. Previsoka temperatura negativno vpliva na delovanje hidravlične črpalke, saj pri povišanih temperaturah volumetrični izkoristek črpalke izrazito upada. Kot rešitev bi se moralo sistemu dodati ustrezen hladilen sistem, da ne bi prišlo do porasta temperature. Dokumentiranje polja parametrov (tlak, pretok, temperatura, vrtilna hitrost) črpalke pripomore k predvidevanju obnašanja izvršilnih hidravličnih komponent in avtomatizaciji procesov kot tudi diagnostiki črpalk in sistemov ter njihovih optimalnih pogojev delovanja. Mazanje zobniških črpalk z zunanjim ozobjem z ustreznim hidravličnim oljem lahko optimizira Stribeckove krivulje črpalke, kar predstavlja enostaven izraz Stribeckovega števila z volumetričnim in mehanskim izkoristkom [24].

Delci neizogibno poškodujejo vse komponente v hidravličnem sistemu, povzročajo obrabo in povišanje temperature komponent, olja in posledično sistema. Ta obraba na tesnilnih površinah se kaže v obliki notranjega ali celo zunanjega puščanja, kar vodi do zmanjšanja volumetričnega izkoristka sistema. Pregled literature kaže, da so delci, ki so običajno v hidravličnem sistemu, manj škodljivi za sistem kot testni prah. Obstaja nekaj dokazov, da lahko testni prah učinkovito pospeši obrabo in tako skrajša čas, potreben za dolgoročno preizkušanje hidravličnih komponent. Vendar je treba za določitev časa pospeševanja upoštevati parametre, kot so koncentracija delcev (čistost olja), temperatura, tlak, pretok in druge. Poleg tega v literaturi ni navedene neposredne povezave med učinki obrabnih delcev in testnega prahu na obrabo hidravličnih komponent. V laboratoriju so bili na hidravličnih zobniških črpalkah izvedeni trije preskusi vzdržljivosti: eden brez dodatnih kontaminantov (na vzorcu treh črpalk), eden z obrabnimi delci iz industrijskega hidravličnega sistema in eden s testnim prahom. V tej študiji so predstavljeni: zasnova preizkuševališča, dejanske meritve pretokov in primerjava volumetričnih izkoristkov črpalk ter spremljanje temperature ohišja črpalke pri normalnem obratovanju in med okvaro.

2 Metodologija raziskave

V laboratoriju so bila sestavljena tri hidravlična preizkuševališča. Preizkusili smo vpliv čistoče olja v hidravličnem sistemu na vzdržljivost sistema in primerjali učinek obrabnih delcev in testnega



*Slika 1 : Preizkuševališče petih zobniških črpalk, testi*ranih s srednjim testnim prahom, obrabnimi delci in brez dodajanja kontaminanta s filtracijo

prahu (MTD) z normalno delujočim hidravličnim sistemom brez dodatnih kontaminantov. Slika 1 prikazuje vse preskusne stožčaste rezervoarje preskuševališč in hidravlične ventile, ki se uporabljajo za obremenitev zobniških črpalk. Na začetku je bilo v prvo enoto, ki je bila testirana brez dodatnih onesnaževalcev, dodanih 30 L hidravličnega olja ISO VG 46 čistoče 20/19/17. Drugi dve preizkuševališči sta imeli v vsaki enoti po 13 L olja. Eno je bilo testirano z obrabnimi delci, drugo pa s testnim prahom. Pretok skozi zobniško črpalko je bil izmerjen s štoparico in tehtanjem olja. Kasneje je bil pretok določen na podlagi znane gostote mineralnega olja ISO VG 46, ki je 0,8551 kg/L. Zobniške črpalke imajo iztisnino 3,6 cm³/vrt in največji dopustni tlak 290 bar. V nevtralnem položaju 4/3 potnega ventila z elektromagneti so vsi priključki zaprti - blokirani. Temperatura olja (v rezervoarju), ki je bilo uporabljeno za preizkušanje zobniške črpalke, in sicer brez dodatnega kontaminanta, je bila 63 +/- 5 °C. Termostat za nadzor delovanja hladilnika je bil nastavljen na 70 °C.

Črpalka (*slika 2*, poz. 1) črpa olje iz stožčastega rezervoarja (slika 2, poz. 12), ki zaradi oblike ne omogoča nastajanja usedlin delcev na dnu. To olje nato skozi protipovratni ventil (slika 2, poz. 3) teče v ročno krmiljen 3/2-krogelni ventil (slika 2, poz. 5). Nato olje teče dalje skozi elektromagnetno krmiljen 4/3-potni drsniški ventil (slika 2, poz. 4). Odvisno od položaja ventila (vzporedno ali križno) teče olje dalje skozi delovni vod A ali B proti tlačnima omejilnima – varnostnima ventiloma (slika 2, poz. 7), hladilniku (slika 2, poz. 10), prioritetnemu ventilu (slika 2, poz. 11) in filtru (slika 2, poz. 8) nazaj v rezervoar.

Prioritetni ventil (slika 2, poz. 11) je mogoče prilagoditi za vzdrževanje določene razlike v tlaku. Ta funkcija omogoča ventilu, da usmerja večji ali manj-



Slika 2 : Hidravlična shema preizkuševališča za umetno dodajanje obrabnih delcev

ši pretok olja skozi filter, kar zagotavlja večjo ali manjšo čistost. Tako lahko del olja zaobide filter, kar vodi do nižje čistoče olja. Postopek testiranja vključuje nastavitev obremenitvenega tlaka sistema (dva tlačna omejilna – varnostna ventila) na do 220 bar. Hidravlično olje v vseh treh preskusnih napravah je bilo na začetku filtrirano, da smo dosegli stopnje čistosti 16/15/13 po ISO 4406. Med preizkusi smo temperaturo dosledno spremljali in vzdrževali v območju 63 + 5 °C.

HIDRAVLIČNE ZOBNIŠKE ČRPALKE



Slika 3 : Zaznavanje okvare zobniške črpalke

Čistočo ocenjujemo oz. določamo z ročnim odvzemom vzorcev olja s prekrmiljenjem krogelnega 3/2-potnega ventila (slika 2, poz. 5) preko ventila za razbremenitev tlaka (slika 2, poz. 6.1) in z meritvami na merilnem priključku tik za protipovratnim ventilom poz. 3. Vsak cikel traja 0,5 sekunde. Med ciklom se aktivira levi elektromagnet v 4/3-potnem ventilu, da se doseže vzporedni položaj krmilnega bata. Po tem se vklopi desni elektromagnet, ki prekrmili krmilni bat v križni položaj.

Dodatne meritve smo izvajali s termografsko kamero, s katero smo merili toplote površine črpalk. Na *sliki 3* je razvidna okvara hidravlične črpalke, testirane s testnim prahom. Ta črpalka proizvaja največ toplote.

3 Rezultati

V treh enotah hidravličnega preizkuševališča, kjer smo trajnostno testirali zobniške črpalke z aluminijastimi ohišji, so bili izvedeni trije testi (istočasno testiranje treh enakih črpalk); eden brez *dodane* kontaminacije (ena črpalka), eden z namenskim dodajanjem obrabnih delcev (ena črpalka) in eden z dodajanjem testnega prahu (ena črpalka).

3.1 Testiranje brez dodane kontaminacije

Najprej je bila testirana zobniška črpalka s hidravličnim oljem brez dodatno vnesene kontaminacije, torej olje čistoče 20/18/15 po ISO 4406. Največji izmerjeni pretok je bil seveda pri tlaku 0 bar, kjer črpalka ni bila obremenjena. V povprečju je znašal 5,3 L/min. Zaradi ponovljivosti preizkusa smo merili pretoke na treh različnih črpalkah hkrati brez dodatno vnesene kontaminacije. Pretoki črpalke 1 se gibljejo od 5,3 L/ min pri 0 bar do najnižjega 4,5 L/min pri 250 bar. Večje obrabe pri tej črpalki ni zaznati (*slika 4*).



Slika 4 : Pretok črpalke 1, testirane brez dodatno vnesene kontaminacije

Pri črpalki 2 opazimo po 686 h obratovanja pri tlaku 250 bar manjši upad pretoka s 4,5 L/min na 4,2 L/min, kar verjetno pomeni manjšo obrabo črpalke (*slika 5*). Pretok se precej spreminja.



Slika 5 : Pretok črpalke 2, testirane brez dodajanja kontaminanta

Pri črpalki 3 opažamo zelo visoke volumetrične izkoristke, saj pretoki pri 250 bar tlaka dosegajo 4,9 L/min do 551 h delovanja. V nadaljevanju pade pretok na 4,7 L/min, kar je še vedno največji pretok izmed vseh treh črpalk, testiranih pri čistoči olja 20/18/15 po ISO 4406.



Slika 6 : Pretok črpalke 3, testirane brez dodajanja kontaminanta

3.2 Testi z obrabnimi delci

Zobniška črpalka, testirana z obrabnimi delci, je vzdržala 546 h (*slika 7*). Na začetku testa smo v 13



Slika 7 : Pretoki črpalke, testirane z obrabnimi delci pri koncentraciji 0,387 g/L in čistoči olja 22/21/20 po ISO 4406

L hidravličnega olja dodali 5,04 g obrabnih delcev, tako da je bila koncentracija obrabnih delcev in olja 0,387 g/L. Na začetku preizkusa so bili pretoki podobni kot pri zobniški črpalki, testirani brez dodane kontaminacije. Zobniška črpalka, testirana z obrabnimi delci, je imela pretok 5,2 L/min pri tlaku 0 bar. Pri tlaku 50 bar je bil pretok 5,1 L/min, pri 150 bar 4,9 L/min, pri 200 bar 4,6 L/min in pri 250 bar 4,6 L/min. Po 546 urah testiranja je pretok padel na 5,2 L/min pri 0 bar, pri 50 bar je bil pretok 4,6 L/min, pri 100 bar je bil pretok 3,5 L/min in pri 150 bar in več je bil pretok 0 L/min. Čistost olja med testom je bila 22/21/20 po ISO 4406. Pretoki niso popolnoma konstantni, kot je zapisano.

3.3 Testi s testnim prahom

Zobniška črpalka, testirana s testnim prahom, je delovala 157 ur pri tlaku 250 bar (*slika 8*). Na začetku testa smo dodali 0,16 g testnega prahu in tako dosegli koncentracijo testnega prahu in olja 0,012 g/L (slika 8). Na začetku testa je bil pretok pri 0 bar 5,3 L/min. Pri tlaku 50 bar je bil pretok 5,0 L/min, pri 100 bar 4,8 L/min, pri 150 bar 4,7 L/min, pri 200 bar 4,6 L/min in pri 250 bar 4,6 L/min. Po 157 urah



Slika 8 : Pretoki črpalke s testnim prahom pri koncentraciji 0,012 g/L in čistoči olja 22/21/19 po ISO 4406

testiranja so se pretoki znižali na 5,0 L/min pri 0 bar, 3,7 L/min pri 50 bar in 2,1 L/min pri 100 bar. Pri višjih tlakih pretokov ni bilo več moč izmeriti, ker so bili nični. Čistost olja med testom je bila 22/21/19 po ISO 4406.

3.4 Temperatura ohišja črpalke

Na sliki 9a je prikazana s termokamero izmerjena temperatura ohišja črpalke med obratovanjem. V povprečju je znašala 78 °C. Olje v takem primeru kroži po celotnem sistemu in se ohlaja v hladilniku, ki na ta način vzdržuje delovno temperaturo sistema. Nasprotno slika 9b kaže obrabljeno črpalko na koncu njene uporabne dobe. Temperatura ohišja je dosegla 197 °C kljub ustreznemu delovanju oljnega hladilnika. Črpalka v tem primeru ni bila več zmožna prečrpavati olja. Omenjena situacija je posledica lokalnih izgub, ki so se pojavile znotraj črpalke med tesnilnimi režami. Ko se reže med elementi, ki tesnijo, zaradi obrabe povečajo, nastane večje notranje puščanje, kar povzroči lokalne tlačne izgube in s tem povezano izrazitejše lokalno segrevanje olja in posledično tudi zmanjšanje njegove viskoznosti. Zmanjšanje viskoznosti privede do še večje-



Slika 9 : Temperatura ohišja zobniške črpalke med (a) obratovanjem in (b) na koncu njene uporabne dobe

ga notranjega puščanja in segrevanja. Segrevanje povzroči neenakomerno raztezanje ohišja črpalke (aluminijeva zlitina) in zobnikov (ogljikovo jeklo), saj ima aluminij temperaturni koeficient dolžinskega raztezka 21 do 24 μ m/K, jeklo pa skoraj za polovico manjšega (12 μ m/K). Povečanje rež in znižanje viskoznosti ter povečanje notranjega puščanja rezultira v popolnem upadu iztoka iz črpalke. Zaradi izrazitega zmanjšanja iztoka olja na tlačni strani črpalke ta ne teče več po sistemu do hladilnika, ampak zastaja znotraj črpalke. Količina olja, ki se trenutno nahaja v črpalki, se tako segreje do mnogo višjih temperatur, kot so sicer pri normalnem obratovanju sistema (*slika 9b*).

4 Diskusija in zaključek

Zobniška črpalka 1, testirana brez kontaminacije, ima v povprečju visok volumetrični izkoristek, in sicer 100 % pri 0 bar, 98 % pri 50 bar, 92 % pri 100 bar, 90 % pri 200 bar in 90 % pri 250 bar. Ti izkoristki se med preizkusom bistveno ne spremenijo, medtem ko se pretoki zobniških črpalk, testiranih z dodanimi obrabnimi delci, izjemno zmanjšajo. V 49,5 h delovanja se izkoristek testirane zobniške črpalke z obrabnimi delci zmanjša s 100 % na 99 % pri 0 bar, s 97 % na 88 % pri 50 bar, s 94 % na 82 % pri 100 bar, z 91 % na 79 % pri 150 bar, s 87 % na 73 % pri 200 bar in z 88 % na 49 % pri 250 bar. V primerjavi z zobniško črpalko, testirano s testnim prahom, je po 48 h delovanja izkoristek pri 0 bar padel s 100 % na 99 %, s 94 % na 85 % pri 50 bar, z 91 % na 79 % pri 100 bar in z 91 % na 74 % pri 150 bar, z 90 % na 66 % pri 200 bar in z 90 % na 35 % pri 250 bar. Sklepamo lahko, da bolj kot je zobniška črpalka obrabljena, večje so razlike med izkoristki pri višjem tlaku. Razlog za ta pojav je večje notranje puščanje med obrabljenimi drsnimi/tesnilnimi površinami hidravličnih elementov; v tem primeru med ohišjem in zobniki ter zobniki in bočnim delom ležajev. Zobniška črpalka, testirana z obrabnimi delci, je odpovedala po 546 urah, zobniška črpalka, testirana s testnim prahom, pa po 157 urah. Pri analizi volumetričnega izkoristka po približno 49 urah delovanja obeh črpalk je pri tlaku 100 bar (obrabni delci 79 %, testni prah 79 %) in 250 barih (obrabni delci 49 %, testni prah 35 %) mogoče opaziti, da se je črpalka, testirana s testnim prahom, nekoliko bolj obrabila. Obraba se je torej v črpalki hitreje povečevala pri testiranju s testnim prahom, zato je odpovedala za 389 h prej kot črpalka, testirana z dodanimi obrabnimi delci.

Ravno obraba in nesorazmerno raztezanje ohišja in zobnikov privedeta do povečanega notranjega puščanja med elementi v črpalki. Pri visokih tlakih se povečajo lokalne izgube, ki še dodatno segrevajo olje in zmanjšajo viskoznost, hkrati pa segrevanje povečuje reže zaradi raztezanja, kar rezultira v prenehanju opravljanja funkcije črpalke. Dodatni hladilni kanali znotraj ohišja bi preprečevali izdatno raztezanje, hkrati pa bi posredno lokalno ohlajali olje na kritičnih tesnilnih mestih in s tem zniževali notranje puščanje in čim bolj ohranjali volumetrični izkoristek. Z obrabno obstojnimi materiali in materiali z enakim razteznostnim koeficientom bi pripomogli k razvoju bolj vzdržljivih zobniških črpalk in večjemu izkoristku sistema.

Literatura

- [1] V. Tič, T. Tašner, and D. Lovrec, "Enhanced lubricant management to reduce costs and minimise environmental impact," Energy, vol. 77, pp. 108-116, 2014, doi: https://doi. org/10.1016/j.energy.2014.05.030.
- [2] T. Mang and W. Dresel, Lubricants and lubrication. John Wiley & Sons, 2007.
- [3] V. Tič and D. Lovrec, On-line condition monitoring and evaluation of remaining useful lifetimes for mineral hydraulic and turbine oils. 2017. doi: 10.18690/978-961-286-130-8.
- [4] D. Lovrec in M. Kambič, Hidravlične tekočine in njihova nega. Fakulteta za strojništvo, 2007.
- [5] Y. Zhang, Y. Liu, Z. Wang, Y. Tao, L. Yang, and Y. Li, "Prediction of Oil Contamination in Aviation Hydraulic System and Active Leakage Strategy," in 2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2022, pp. 578–583. doi: 10.1109/ICI-EA54703.2022.10006227.
- [6] F. Ng, J. A. Harding, and J. Glass, "Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring," Mech Syst Signal Process, vol. 83, pp. 176-193, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.006.
- [7] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," Mech Syst Signal Process, vol. 20, no. 7, pp. 1483-1510, 2006, doi: https://doi. org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [8] E. Zio and G. Peloni, "Particle filtering prognostic estimation of the remaining useful life of nonlinear components," Reliab Eng Syst Saf, vol. 96, no. 3, pp. 403-409, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.08.009.
- [9] R. H. Frith and W. Scott, "Control of solids contamination in hydraulic systems — an overview," Wear, vol. 165, no. 1, pp. 69-74, 1993, doi: https://doi. org/10.1016/0043-1648(93)90374-U.
- [10] P. J. Esteves, V. Seriacopi, M. C. S. de Macêdo, R. M. Souza, and C. Scandian, "Combined effect of abrasive particle size distribution and

ball material on the wear coefficient in micro--scale abrasive wear tests," Wear, vol. 476, p. 203639, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j. wear.2021.203639.

- [11] R. I. Trezona, D. N. Allsopp, and I. M. Hutchings, "Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test," Wear, vol. 225–229, pp. 205–214, 1999, doi: https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5.
- [12] S. Osterland, L. Müller, J. Weber, A. Moosavi, and D. Krahl, "Numerical Prediction and Experimental Investigation of Cavitation Erosion of Hydraulic Components Using HFC." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/349053183
- [13] R. A. Fletcher and D. S. Bright, "Shape Factors of ISO 12103-A3 (Medium Test Dust)," Filtration + Separation, vol. 37, no. 9, pp. 48-56, 2000, doi: https://doi.org/10.1016/S0015-1882(00)80200-1.
- [14] N. Novak, A. Trajkovski, M. Polajnar, M. Kalin, and F. Majdič, "Wear of hydraulic pump with real particles and medium test dust," Wear, vol. 532-533, p. 205101, 2023, doi: https://doi. org/10.1016/j.wear.2023.205101.
- [15] N. Novak, A. Trajkovski, M. Kalin, and F. Majdič, "Degradation of Hydraulic System due to Wear Particles or Medium Test Dust," Applied Sciences, vol. 13, no. 13, 2023, doi: 10.3390/ app13137777.
- [16] K. Zhang, J. Yao, and T. Jiang, "Degradation assessment and life prediction of electro-hydraulic servo valve under erosion wear," Eng Fail Anal, vol. 36, pp. 284–300, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.10.017.

- [17] C. Wang, W. Jiang, Y. Yue, and S. Zhang, "Research on Prediction Method of Gear Pump Remaining Useful Life Based on DCAE and Bi-LSTM," Symmetry (Basel), vol. 14, no. 6, 2022, doi: 10.3390/sym14061111.
- [18] G. Ranganathan, T. Hillson Samuel Raj, and P. V Mohan Ram, "Wear characterisation of small PM rotors and oil pump bearings," Tribol Int, vol. 37, no. 1, pp. 1–9, 2004, doi: https:// doi.org/10.1016/S0301-679X(03)00109-9.
- [19] R. Frith, "A model of gear pump wear due to solids contamination," PhD, Queensland University of Technology, Brisbane, 1994.
- [20] M. Rundo, "Models for Flow Rate Simulation in Gear Pumps: A Review," Energies (Basel), vol. 10, no. 9, 2017, doi: 10.3390/en10091261.
- [21] P. Casoli, F. Scolari, M. Rundo, A. Lettini, and M. Rigosi, "CFD Analyses of Textured Surfaces for Tribological Improvements in Hydraulic Pumps," Energies (Basel), vol. 13, no. 21, 2020, doi: 10.3390/en13215799.
- [22] A. Malvasi, R. Squarcini, G. Armenio, and A. Brömmel, "Design Process of an Electric Powered Oil Pump," Auto Tech Review, vol. 3, no. 3, pp. 36-39, 2014, doi: 10.1365/s40112-014-0571-4.
- [23] Ł. Stawiński, A. Kosucki, M. Cebulak, A. Górski, and M. Grala, "Investigation of the influence of hydraulic oil temperature on the variable-speed pump performance," Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability, vol. 24, pp. 289–296, Nov. 2022, doi: 10.17531/ ein.2022.2.10.
- [24] P. Michael, H. Khalid, and T. Wanke, "An Investigation of External Gear Pump Efficiency and Stribeck Values," SAE Technical Papers, vol. 8, Nov. 2012, doi: 10.4271/2012-01-2041.

Long -term experiments with hydraulic gear pumps

Abstract:

Hydraulic systems are increasingly present in all segments of our production chains, such as agriculture, construction, transport and various industries. Pumps are mostly the key components of any hydraulic system. With the newly developed gear pump testing device, sustainability tests are performed on five gear pumps simultaneously, as shown in Figure 1. One pump is tested with medium test dust, one with actual filter-extracted wear particles, and the last three simulate a real hydraulic system with cleanliness of oil 20/19/17 according to ISO 4406. The flow rates and thus the volumetric efficiencies decrease as the pump wears, as shown in Figures 7 and 8. Monitoring the casing temperature with thermography camera (Figures 3 and 9) of the running and worn pump shows increasing internal leakage and decreasing efficiency. The results of this research contribute to the sustainable development of hydraulic gear pumps and improving the efficiency of entire hydraulic systems.

Keywords:

gear pump, oil cleanliness, wear particles, test dust, volumetric efficiency