

# NEPREKINJEN NADZOR STANJA HIDRAVLIČNEGA FILTRA IN OBRATOVALNEGA STANJA STROJA

Darko Lovrec, Vito Tič

## Izveček:

Poleg hidravlične črpalke in aktuatorja, ki ju imamo za stalni vitalni komponenti hidravličnega sistema, je tudi hidravlični filter na povratnem vodu vedno prisotna, nepogrešljiva komponenta vsakega hidravličnega sistema. Razen tega, da je filter namenjen zgolj čiščenju hidravlične tekočine in ohranjanju zelene stopnje čistoče, ga lahko koristno vključimo tudi v sistem nadzora hidravličnega sistema in posredno celotnega stroja.

Če ima povratni filter prigraden ustrezen senzor za merjenje padca tlaka preko filtrskega vložka, lahko pridemo do številnih koristnih podatkov, ki omogočajo vpogled v stanje hidravlične naprave in stroja. V primeru električnega senzorja za merjenje padcev tlaka lahko signal ne samo zajemamo in njegovo vrednost prikazujemo, temveč ga vključimo v veliko bolj napreden nadzorni sistem naprave. V prispevku so prikazane možnosti, ki jih ponuja neprekinjeno (angl. on-line) spremljanje padca tlaka na filtrskem vložku: od trenutnega stanja zapolnjenosti filtra, prepoznavanja obratovalne faze stroja, obremenjenosti stroja, nenadne poškodbe hidravličnih komponent, poškodbe filtrskega vložka in veliko več.

## Ključne besede:

hidravlični filter, padec tlaka, neprekinjen nadzor stanja, indikacija sprememb, možnosti uporabe

## 1 Uvod

Številni sodobni stroji in naprave, ki obratujejo samodejno, neprekinjeno, odmaknjeno od vzdrževalnega osebja ali pa spadajo v skupino strateško pomembnih strojev in naprav v podjetju, potrebujejo nenehno 24 urni nadzor stanja (angl. on-line condition monitoring). Velika večina takšnih strojev in naprav ima vgrajen hidravlični pogonsko-krmilni sistem. Nenehno spremljanje stanja celotnega hidravličnega sistema in vseh njegovih vgrajenih komponent je zato velikega pomena in koristno, pogosto nuja.

Sodobni hidravlični sistemi, ki so že opremljeni s sistemom za nenehno spremljanje stanja uporabljane tekočine in posameznih komponent, so pogosto nadgrajeni še s sistemom za samodiagnozo stroja. Le na ta način lahko dovolj zgodaj prepoznamo porajajoče se nepravilnosti v delovanju komponent in stroja ter preprečimo večje okvare in zastoje. Ti sistemi pogosto uporabljajo namenske senzorje, s pomočjo katerih lahko zaznavamo in spremljamo stanje na daljavo in tako pravočasno zaznamo nenadne spremembe v delovanju hidravličnega sistema tako v vgrajeni hidravlični tekočini kot v posamezni hidravlični komponenti. Posredno tako dobimo informacije o stanju celotnega stroja ali naprave.

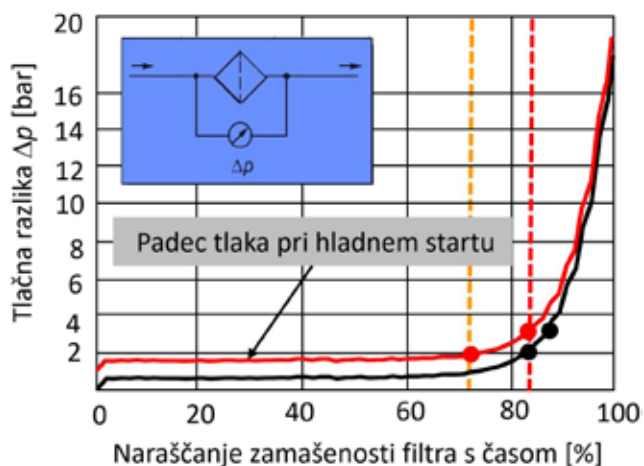
**Prof. dr. Darko Lovrec**, univ. dipl. inž., izr. prof.  
**dr. Vito Tič**, univ. dipl. inž., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

Nekatere od bolj osnovnih funkcij nadzora stanja in samodiagnoze stroja je mogoče izvesti tudi z merjenjem, beleženjem in vrednotenjem padca tlaka na hidravličnem filtru, nameščenem na povratnem vodu. Z uporabo sodobnih tehnik obdelave signalov pa lahko informacijo o padcu tlaka na filtru uporabimo tudi kot indikator za neprekinjeno spremljanje širšega stanja.

## 2 Ozadje delovanja hidravličnega filtra

Filte v hidravličnih sistemih uporabljamo za odstranjevanje netopnih trdnih delcev (tujkov oz. kontaminantov) iz hidravlične tekočine in za zmanjšanje koncentracije teh delcev. Gre za delce obrabe in drugih različnih nečistoč, ki so nastali zaradi delovanja hidravličnih komponent ali so prišli v hidravlični sistem iz okolice ali pa z vgradnjo komponent. Nečistoče lahko poškodujejo hidravlični sistem na dva načina. Večji trdni delci (npr. kovinski delci kot posledica obrabe) in druge nečistoče (npr. >50 µm, kot so delci rje, pesek, vlakna, delci barve, tesnil ...) lahko povzročijo nenadne motnje v delovanju hidravličnega sistema, zlasti regulacijskih ventilov. Manjši obrabni delci (npr. <10 µm) delujejo v hidravličnem toku kot abraziv, kar povzroči povečano obrabo ozkih rež in robov krmilnih drsnikov. Povečana obraba vodi do večjega notranjega puščanja, kar ima za posledico večjo izgubo moči in dvig temperature. Škodljivost trdnih delcev je odvisna od njihove trdote, velikosti in koncentracije delcev ter od občutljivosti posameznih sestavnih delov komponent.





**Slika 2:** Možen padec tlaka pri hladnem startu ter vpliv na javljanje in odpiranje obtočne povezave

ko »napačno« javljeno stanje (indikator v rumenem polju) vzamemo v zakup – počakamo, da temperatura naraste na obratovalno vrednost in viskoznost upade, kar vodi do manjšega padca tlaka. Pri električnem indikatorju (senzor diferencialnega tlaka) pa je potrebno nadgraditi logiko krmilja stroja.

Električno spremljanje stanja zamašenosti filtra lahko uporabimo še za druge namene identifikacije stanja stroja. Tako ob nenadnem zmanjšanju padca tlaka lahko sklepamo na porušitev filtrskega elementa, npr. zaradi previsoke tlačne konice v povratnem vodu oz. nasprotno: v primeru intenzivnejšega ali celo nenadnega povečanja padca tlaka pa lahko sklepamo na povečano obrabo ali porušitev ene od vgrajenih komponent – prisotnih več delcev obrabe. V obeh primerih je potrebno spremljati še časovni potek sprememb – čas trajanja spremembe (vgrajena logika na osnovi izkušenj). Omenjeno velja v primeru stalne uporabe filtra enakega tipa in istega proizvajalca.

### 3 Kontinuirano spremljanje stanja filtra na testni napravi

Vsa omenjena stanja se pojavljajo na vsakem stroju z vgrajenim hidravličnim sistemom: polnjenje filtra z nečistočami med običajnim obratovanjem, porast stopnje nečistosti tekočine ob nepravilnem dolivanju sveže, a onesnažene tekočine, faze hlajenja hidravlične tekočine (vklop hladilnega sistema in učinkovitost hladilnega sistema ter porabljena moč za hlajenje), nočni in dnevni režim obratovanja, vpliv temperature okolice, v kateri deluje naprava, povečan padec tlaka ob hladnem zagonu, nenadno povečanja padca tlaka v primeru okvare vgrajene komponente, nenaden upad tlaka v primeru porušitve filtrskega elementa pa mogoče še kaj.

Vsa ta stanja se v krajšem, v »časovno koncentriranem obdobju« pojavljajo, ko gre za testne naprave. Te običajno delujejo neprekinjeno v režimu 24/7, imajo fazo hladnega zagona in vsebujejo faze prekinitve

delovanja zaradi vmesnih kontrol stanja komponent. Če se testiranje izvaja do povečane obrabe posamezne komponente, se pojavi intenzivnejši porast delcev obrabe, prav tako pa lahko pride do odpovedi testirane komponente zaradi loma ali pa se lahko pojavijo povečane tlačne konice. Prav tako pa lahko spremljamo tudi učinkovitost hladilnega sistema pri uporabi hidravlične tekočine s posebnimi snovnimi lastnostmi (npr. z drugačno specifično toploto).

#### 3.1 Testna naprava in njen namen

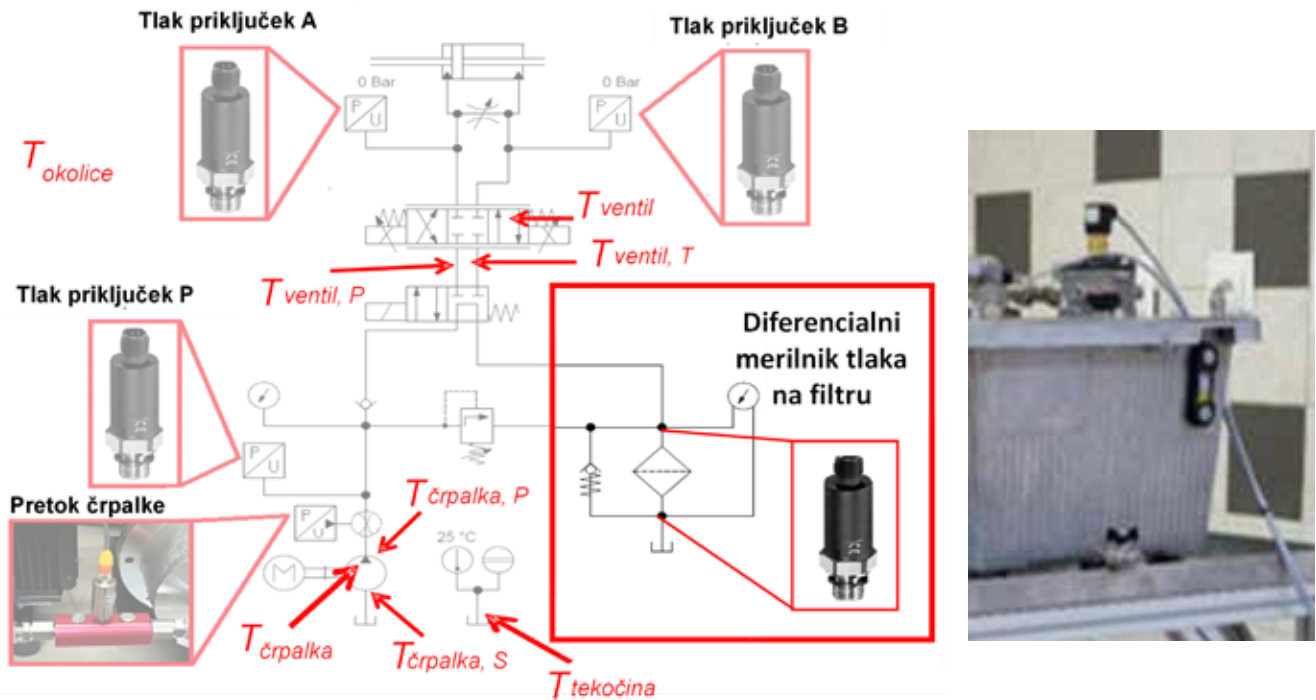
V obravnavanem primeru je problematika neprekinjenega spremljanja stanja filtra prikazana na primeru trajno delujoče testne naprave, namenjene za trajno testiranje hidravlične tekočine skupaj z realnimi hidravličnimi komponentami pod realnimi ali zaostrenimi obratovalnimi pogoji. Shema testne naprave z vsemi nameščenimi sensorji in dejanski videz dela naprave z nameščenim povratnim filtrom, opremljenim z elektronskim diferencialnim senzorjem tlaka, prikazuje *slika 3*. [5]

Testna naprava temelji na uporabi zobniške črpalke in bremenske enote z dvosmerno delujočim hidravličnim valjem s skožno batnico, ki se na vsaki strani opira na trdno oporo. Za krmiljenje gibanja valja je uporabljen proporcionalni ventil. Testna procedura je sestavljena iz vnaprej določenega števila ciklov obremenitve. [5]

Celotna testna naprava je zasnovana in namenjena za dolgotrajno, avtonomno in neprekinjeno delovanje v daljšem časovnem obdobju. Deluje lahko časovno neomejeno, nekaj mesecev, do določenega dogodka ali pa po vnaprej določenem številu ciklov obremenitve. Zaradi tega morajo biti vse komponente in vsi pomembni obratovalni parametri nenehno spremljani.

Glavni namen uporabe testne naprave je pospešeno staranje in degradacija hidravlične tekočine ter hidravličnih komponent. Z analizo testiranih komponent in stanja hidravlične tekočine po opravljenem testu ter z interpretacijo meritev, opravljenih med testom, lahko ugotovimo spremembe na komponentah, ki so se pojavile med delovanjem. Parametri, ki jih merimo v napravi, so nivo tekočine v rezervoarju, temperature, tlaki, pretok ... Tlačni senzorji so nameščeni za črpalke in na priključkih A in B proporcionalnega ventila, temperaturni senzorji za merjenje temperature tekočine pa so po celotnem sistemu, na različnih mestih vseh komponent. Nameščen je tudi senzor za merjenje temperature zraka okolice. Podatki vseh omenjenih senzorjev so potrebni, da lahko širše sklepamo o izvoru posledice napake, ki jo lahko zaznavamo tudi na filtru, kar je v ospredju te obravnave.

Za nadzor delovanja je uporabljen krmilnik Beckhoff PC CX5140 s 4 procesorskimi jedri, ki nudijo veliko računalniške moči za nadzor delovanja naprave, beleženje podatkov in zagotavljanje uporabniškega vmesnika z vizualizacijo. Krmilnik je razširjen z različnimi razširitvenimi moduli. Krmilnik



Slika 3 : Shema testne naprave z vsemi vgrajenimi senzorji in povratnim filtrom

program je izdelan v TwinCAT 3. Program ima modularno strukturo in je programiran s kombinacijo strukturiranega besedila in funkcijskih blokovnih diagramov. Več informacij o varnostni zasnovi programske opreme ter o zajemanju, prenosu in shranjevanju podatkov kot tudi o njihovi obdelavi in prikazu podatkov je na voljo v viru [5] in [6].

### 3.2 Spremljanje vseh podatkov in stanja filtra

Poleg običajnega optičnega in električnega indikatorja zamašenosti filtra, ki nam lahko daje samo digitalne informacije (pri preklopu iz 0 v 1 je filter zamašen), je vgrajen dodatni analogni senzor tlaka za zaznavanje diferencialnega tlaka na filtru povratnega voda. Namestitev analognega senzorja diferencialnega tlaka na filter omogoča neprekinjeno spremljanje stanja filtrirnega elementa in vseh drugih parametrov, vezanih na vse komponente sistema. Na podlagi razpoložljivih podatkov lahko preučimo vpliv temperature olja, stopnjo kontaminacije in pretoka na delovanje hidrauličnega filtra v njegovi uporabni dobi ali v opazovanem obdobju testiranja in spremljanja različnih vplivov na zamašenost filtra.

Skupno je neprekinjeno spremljanih 25 različnih podatkov in njihove vrednosti – ti so merjeni kontinuirano ali pa so izračunani v zelenem časovnem intervalu za določen test. Zadnje številčne vrednosti določenega testa so predstavljene na način, kot je prikazano na sliki 4 levo za primer testa z zaporedno številko ID 46. Za ugotavljanje in analizo medsebojnega vpliva parametrov na stanje filtra pa je možno z izbiro prikaza posameznih parametrov prikazati potek sprememb v celotnem času testiranja ali ga

podrobneje pogledati samo v opazovanem časovnem obdobju (zoom) – slika 4 desno in slika 5 desno.

Zadnja posodobitev: 16.12.2020 1:03:43

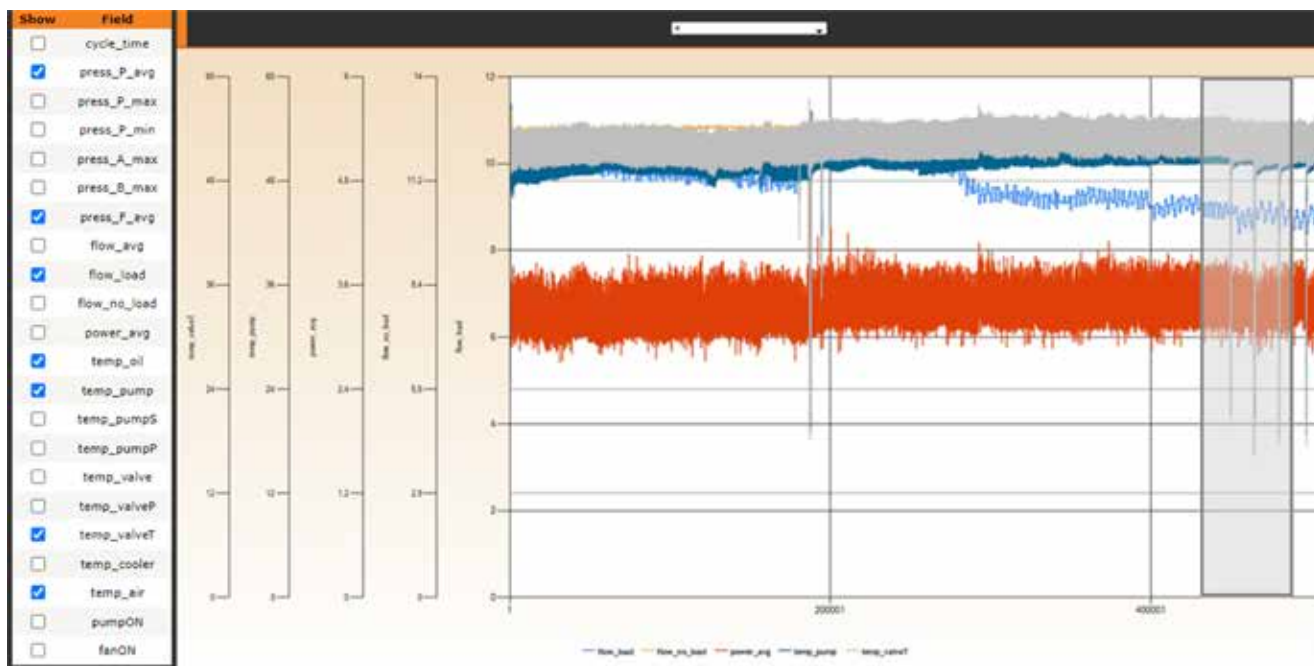
Field	Value
id_test	46
id_cycle	417
datetime	16.12.2020 1:03:43
cycle_time	3039
press_P_avg	98,55
press_P_max	191,07
press_P_min	0,00
press_A_max	190,82
press_B_max	190,75
press_F_avg	0,23
flow_avg	10,283
flow_load	9,579
flow_no_load	12,607
power_avg	3,2888
temp_oil	39,21
temp_pump	45,20
temp_pumpS	35,60
temp_pumpP	38,90
temp_valve	40,90
temp_valveP	39,90
temp_valveT	43,20
temp_cooler	30,20
temp_air	26,00
pumpON	True
fanON	True

Reset Zoom

Show	Field
<input type="checkbox"/>	cycle_time
<input checked="" type="checkbox"/>	press_P_avg
<input type="checkbox"/>	press_P_max
<input type="checkbox"/>	press_P_min
<input type="checkbox"/>	press_A_max
<input type="checkbox"/>	press_B_max
<input checked="" type="checkbox"/>	press_F_avg
<input type="checkbox"/>	flow_avg
<input checked="" type="checkbox"/>	flow_load
<input type="checkbox"/>	flow_no_load
<input type="checkbox"/>	power_avg
<input checked="" type="checkbox"/>	temp_oil
<input checked="" type="checkbox"/>	temp_pump
<input type="checkbox"/>	temp_pumpS
<input type="checkbox"/>	temp_pumpP
<input type="checkbox"/>	temp_valve
<input type="checkbox"/>	temp_valveP
<input checked="" type="checkbox"/>	temp_valveT
<input type="checkbox"/>	temp_cooler
<input checked="" type="checkbox"/>	temp_air
<input type="checkbox"/>	pumpON
<input type="checkbox"/>	fanON

Slika 4 : Nabor opazovanih parametrov in njihove trenutne vrednosti (levo) ter možnost izbire njihovih kombinacij za grafični prikaz





Slika 5 : Izbira kombinacije opazovanih parametrov celotnega sistema

Primer potekov posameznih sprememb izbranih parametrov prikazuje *slika 5* z označenim oknom, v katerem želimo podrobneje pogledati posamezne spremembe.

## 4 Spremljanje različnih stanj in dogodkov na podlagi signala filtra

Za namene hitrih analiz in ugotavljanje trenutnega stanja in soodvisnosti med posameznimi veličinami je primerno uporabiti kar izvorno obliko prikaza, kot je to predstavljeno na *sliki 5*. Za podrobnejše analize in namene dokumentacije pa je možno podatke izvoziti v Excel in zasnovati grafe, kot to npr. prikazuje *slika 6*.

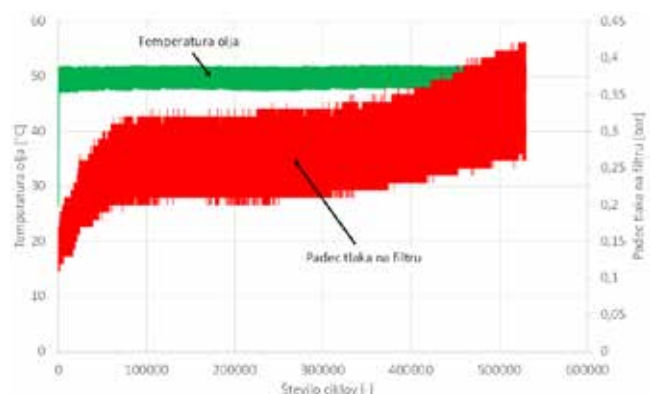
*Slika 6* prikazuje rezultate diferenčnega tlaka na povratnem filtru med celotnim dolgotrajnim preskusom vzdržljivosti hidravlične tekočine skupaj s komponentami. Prva stvar, ki jo lahko opazimo, je faza utekanja komponent, med katero se diferenčni tlak na povratnem filtru hitro povečuje zaradi prekomerne obrabe komponent.

Fazi utekanja sledi zelo konstantna faza, kjer je diferenčni tlak na povratnem filtru zelo stabilen. Sklepamo lahko, da je v tej fazi zelo majhna obraba komponent. Dokaj veliko nihanje signala za tlak na filtru kaže vpliv spremembe temperature tekočine zaradi delovanja hladilnega sistema. Podrobnejša analiza bi razkrila tudi vpliv spreminjanja temperature okolice na trajanje faze hlajenja.

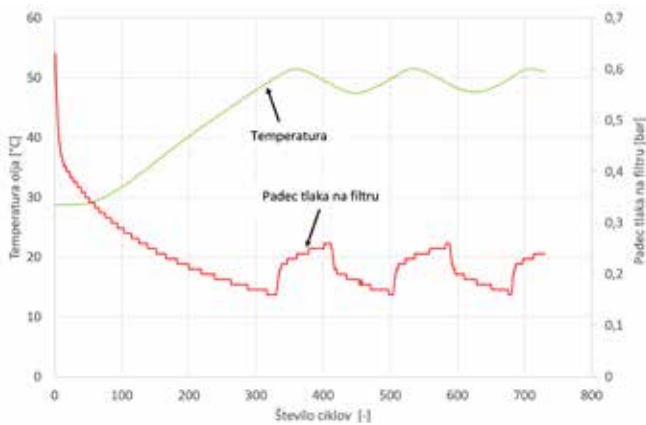
Po približno 300.000 ciklih (okoli 10 dni neprekinjenega delovanja) spreminjanja obremenitve opazimo začetek eksponentnega povečanja diferenčnega

tlaka na povratnem filtru zaradi začetka prekomerne obrabe komponent. Pri približno 530.000 ciklih je test ustavljen zaradi loma ohišja črpalke, kljub temu je jasno viden začetek eksponentnega povečanja diferenčnega tlaka na povratnem filtru.

*Slika 7* podrobneje prikazuje spreminjanje tlaka na povratnem filtru med fazo zagona, med katero se temperatura olja dvigne na delovno temperaturo  $50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Učinek povišanja temperature in s tem zmanjšanja viskoznosti je jasno razviden s slike. Ko se temperatura dvigne na delovno temperaturo, se viskoznost olja zmanjša zaradi oslabiljenih kohezivskih sil, kar vodi do povečanih hitrosti filtracije in s tem daljšega časa za vzpostavljjanje tlaka pred filternim vložkom. Opazimo lahko, da diferenčni tlak na povratnem filtru upade z 0,7 bar pri nižjih temperaturah ob startu (v našem primeru je temperatura okolice znašala  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) na manj kot 0,2 bar (pri delovni temperaturi  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  in približno enaki temperaturi okolice).



Slika 6 : Potek sprememb tlaka na povratnem filtru med testom



**Slika 7:** Spreminjanja tlaka na filtru med fazo hladnega starta

Prav tako je v fazi konstantnega obratovanja (stacionarne razmere) dobro vidno nihanje vrednosti diferenčnega tlaka na filtru v velikosti približno 0,1 bar. To nihanje tlaka se pojavlja zaradi faz hlajenja tekočine, kjer se temperatura spreminja med 52 °C in 48 °C. Tako je dobro viden vpliv spremembe snovnih lastnosti tekočine (predvsem njene viskoznosti) na spremembo padca tlaka preko filtra.

## 5 Zaključek

Proces filtracije je povezan z več kompleksnimi fizikalnimi pojavi, ki kažejo na soodvisnost številnih lastnosti tekočin in trdnih snovi ter obratovalnih razmer. V okviru širše raziskave smo pokazali, da je mogoče analogne senzorne diferencnega tlaka učinkovito uporabiti za spremljanje stanja filtrirnega elementa in posledično tudi za spremljanje stanja hidravličnih komponent. Kontinuirani signal filtra je tako možno zelo koristno vključiti v nadzorni sistem hidravličnega sistema in celotnega stroja.

Na podlagi teh spoznanj bi lahko z nadaljnjimi študijami razvili korelacije med sedaj spremljanimi parametri in trendi sprememb  $\Delta p$  za napovedovanje preostale uporabne dobe filtrirnega elementa. Prav tako bi jih lahko skupaj z drugimi parametri uporabili za odkrivanje nenadnih sprememb  $\Delta p$ , ki bi lahko bile posledica hitro okvarjene določene komponente.

## Literatura

- [1] Lovrec, D., Tič, V.: Hidravlika za mehatroniko, Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 458 str., ISBN 978-961-286-217-6, 2018
- [2] Totten, G. E., De Negri, V. J.: Handbook of Hydraulic Fluid Technology, First Published 2012, CRC Press, doi. <https://doi.org/10.1201/b11225>, 982 str., 2012
- [3] Blok, P.: The Management of Oil Contamination, Koppen & Lethem, ISBN 90-9008458-4, 328 str., 1994
- [4] Casey, B.: How And Why To Monitor Hydraulic Filter Condition. Brendan Casey Blog. 2016. Available at: <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/hydraulic-pumps-motors/article/21885276/how-and-why-to-monitor-hydraulic-filter-condition>.
- [5] Lovrec, D., Tič, V.: A new approach for long-term testing of new hydraulic fluids, New technologies, development and application IV; Lecture notes in networks and systems, ISSN 2367-3370, Vol. 233, Springer Natur. cop. 2021, vol. 233, str. 788–801, doi: 10.1007/978-3-030-75275-0\_87, 2021.
- [6] Čakš, A., Tič, V.: Data Acquisition and Management of Hydraulic Components Test Device. International conference Fluid Power 2019. University of Maribor Press. 2019, str. 123–132, COBISS.SI-ID 22652950, 2019.

## On-line monitoring of hydraulic filter and machine condition

### Abstract:

In addition to the hydraulic pump and actuator, which are the ever-present vital components of the hydraulic system, the hydraulic filter on the return line is also the ever-present, indispensable component of any hydraulic system. Apart from the fact that the filter is primarily intended for cleaning the hydraulic fluid and maintaining the desired degree of cleanliness, it can also be used for hydraulic system monitoring and consequently maintaining stable operation of the entire machine.

If the return filter has a suitable sensor for measuring the pressure drop on the filter cartridge, we can obtain valuable information that allow us to observe the condition of the hydraulic device and the machine. If an analogue electrical sensor for measuring pressure drop is used, the signal can not only be captured and its value displayed, but the data can also be included in a much more advanced control system of the device. The paper presents the possibilities offered by continuous, on-line monitoring of the pressure drop on the return filter: from the present state of filter clogging, recognition of machine operating phase, machine load, sudden damage to hydraulic components, filter cartridge damage and much more.

### Keywords:

hydraulic filter, pressure drop, on-line condition monitoring, indication of changes, possibilities of use