

VODNO-HIDRAVLIČNI TRAJNOSTNI PREIZKUS OLJNO-HIDRAVLIČNEGA PROPORCIONALNEGA POTNEGA VENTILA

Primož Cizl, Franc Majdič

Izvleček:

Hidravlične kapljevine fosilnega izvora kljub svojim dobrim protikorozijskim in protiobravnim lastnostim predstavljajo preveliko okoljsko breme. Manjšega ali celo večjega izliva mineralnih hidravličnih olj v okolje ni mogoče zanesljivo preprečiti, še posebno ne pri mobilnih strojih. Zato je voda verjetno hidravlična kapljevina prihodnosti, dandanes pa je še zelo malo uporabljana v te namene. Za izdelavo sestavin pogonsko-krmilne hidravlike, ki uporablja vodo kot medij, so potrebni drugačni, predvsem precej dražji materiali ter drugačni in zahtevnejši izdelavni postopki. Velik problem je korozija. So pa nekateri parametri delovanja vodne hidravlike ugodnejši od parametrov oljne hidravlike, predvsem po zaslugi manjše stisljivosti vode.

Ta prispevek podaja postopek in rezultate trajnostnega testiranja proporcionalnega potnega ventila (PPV) 4/3, razvitega za oljno hidravliko, a preizkušane s pitno vodo kot hidravlično kapljevino. Posebnost tega trajnostnega testa je v tem, da je ventil izdelan s tehnologijo tridimenzionalnega tiska kovin.

Med postopkom raziskave smo sledili številnim parametrom delovanja in lastnostim preizkušane PPV-ja. Predvsem smo merili notranje puščanje ventila glede na število njegovih opravljenih prekrmljenj. Ocenjevanje rezultatov meritev je težavno zaradi številnih vplivov. Po končanem trajnostnem testiranju je končna obraba razvidna in očitna predvsem na krmilnem batu ventila, prav tako tudi korozijska erozija.

Ključne besede:

vodna hidravlika, trajnostni preizkus, notranje puščanje, proporcionalni ventil, korozija, obraba

1 Uvod

Področja uporabe pogonsko-krmilne hidravlike (PKH) so raznolika in zahteve vse večje. S tem se povečuje tudi obremenitev okolja s škodljivimi snovmi. Mednje sodijo predvsem hidravlična olja, ki so bila zadnja desetletja in predvsem do devetdesetih let prejšnjega stoletja brez konkurence zaradi svojih odličnih korozijsko in obrabno-odpornih lastnosti. Z vse večjo industrializacijo sveta je varstvo okolja postalo ena glavnih tem prihodnosti industrijskega razvoja. Ker je večina hidravličnih kapljev in še vedno fosilnega izvora, je torej „nezdrava“ obremenitev okolja velika, saj so hidravlična olja na podlagi nafte težko razgradljiva in toksična. Ena od rešitev problema je uporaba vode, več tisočletij stare kapljevine, ki je prosto dostopna in nima škodljivih posledic na okolje. Temu navkljub pa motivacije za njeno uporabo ni. Razvojne smernice narekujejo vodilna podjetja na področju PKH. Ta (še vedno) niso dovolj okoljsko

osveščena in se jim ne zdi vredno vlagati sredstev v razvoj posebne opreme, ki jo vodna hidravlika zahteva. Nekoč v prihodnosti bo prehod z mineralnega hidravličnega olja na vodo verjetno nujen.

Druga tehnologija, ki pridobiva večjo pozornost, je aditivna tehnologija izdelave. V zadnjih letih je vedno več pozornosti in raziskav usmerjenih v to tehnologijo mnogih prednosti, tudi okoljskih, glede učinkovitosti uporabe materiala, lažjega izdelka in prilagodljivosti zahtevam.

Cilj raziskave je proučevati spremembe notranjega puščanja in obnašanja 4/3 potnega ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 proizvajalca AIDRO med trajnostnim preizkušanjem do treh milijonov ciklov pri tlaku vode 300 bar. Ventil je izdelan z aditivno tehnologijo ter namenjen za delovanje z mineralnim hidravličnim oljem.

Primož Cizl, dipl. inž., doc. dr. Franc Majdič univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

2 Ozadje raziskave

Krmilni ventili so z vidika delovanja razdeljeni na dve glavni skupini: na konvencionalne in zvezno de-

lujoče. Vsaka skupina se glede na funkcijo dodatno deli na: potne, protipovratne (ne obstajajo kot zvezno delujoči), tlačne in tokovne ventile [1].

Proporcionalni potni ventili

Proporcionalni potni ventili (PPV) so zvezno delujoči. Tako kot vsi potni ventili (PV) (tudi konvencionalni) v svoji oznaki (X/Y) nosijo informacijo o številu priključkov (X) in številu položajev (Y). Standardizirano je tudi označevanje priključkov na PV. A in B sta priključka delovnih vodov, P predstavlja tlačni vod, T pa povratnega. PPV, na katerem smo izvajali trajnostni test, ima na vsaki strani vzmet in proporcionalni potisni elektromagnet, ki premika krmilni bat. Temu daje magnet zvezno gibanje ter konstantno silo ob gibanju jedra pri konstantnem toku hidravlične kapljevine. Umestitev PPV-jev za krmiljenje izvršilnih komponent (hidravlični valj, hidravlični motor, zasučni valj) lahko precej zmanjša število krmilnih komponent v primerjavi s konvencionalnim krmiljenjem hidravličnega sistema. Tlačne izgube pri pretaknju so sorazmerno majhne. Upori pretakanja v ohišju ventila močno vplivajo na linearnost karakteristike pri večjem volumenskem toku. Zaradi pozitivnega prekритja je pri PPV, ki ga raziskujemo, v ničelni legi manjša „mrtva cona“. To je nezaželeno zaradi slabše odzivnosti in nihanja okoli stabilne lege. Tipična zračnost med krmilnim batom in ohišjem je od 2 μm do 5 μm , zato je priporočena nazivna prepustnost filtra med 3 μm in 6 μm [2].

Hidravlične kapljevine

Zaradi okoljskih problemov glede uporabe toksičnih in težko razgradljivih mineralnih olj v različnih industrijskih panogah so se začeli zanimati za okolju prijaznejše kapljevine. Olja rastlinskega izvora se tej problematiki skoraj izognejo, a imajo tudi svoje slabosti, kot so slaba oksidacijska odpornost, težnje k nalaganju sledi (ang. *deposit forming tendency*), strjevanje pri nižjih temperaturah in slaba hidrolitična odpornost. Raziskave tečejo v smeri izboljšanja toplotne in nizekotemperaturne stabilnosti olj rastlinskega izvora z dodajanjem kemičnih modifikatorjev in mešanjem z drugimi tekočinami z želenimi lastnostmi [3]. Oljem rastlinskega izvora je nujno dodati aditive, ti pa so že okolju škodljivi.

Na račun čistoče in dostopnosti vode se izgubijo dobre mazalne lastnosti, kar privede do povečane obrabe, velikega notranjega puščanja in korozije hidravličnih sestavin. Posledično uporaba pitne vode brez dodatkov zaradi neugodnih lastnosti zmanjšuje učinkovitost hidravličnega sistema. Voda v odvisnosti od svojega vira vsebuje tudi trdne delce različnih velikosti, topne primesi, različne bakterije, vodikove ione in določeno stopnjo klora, kalcija ter magnezija, kar predstavlja dodatno krajšanje uporabne dobe obremenjenih komponent. Težave nalaganja apnenca so znane že v mnogo manj občutljivih cevovodih, zato v finih hidravličnih okoljih

predstavljajo mnogo večji problem. Delci in topne primesi postopoma erodirajo material, ob katerem drsijo, težko dostopne površine sistema pa postanejo gojišče vnesenih bakterij. Dodatna slabost je ledišče pod 0 °C, kar zahteva dodatke proti zmrzovanju (ang. *anti-freeze additives*). Vodno hidravlični sistemi so načeloma namenjeni obratovanju v temperaturnem razponu od 3 °C do 50 °C. Kot vse kapljevine, tudi voda zahteva natančno filtriranje (najmanj 10-mikronski absolutni filter) [4].

Kaplja olja onesnaži 150 litrov pitne vode. Čiščenje ene tone z oljem onesnažene zemlje, odvisno od stopnje onesnaženja, stane nad 2000,00 EUR. Cena litra visoko rafiniranega mineralnega olja (ang. *highly refined mineral oil*) je bila v začetku 21. stoletja do 50 000-krat višja od enake količine vode. Kljub temu pa je bila takrat voda v hidravliki najbolj razširjena le kot vodno-oljna emulzija, ne pa kot čista voda. Industrijska emulzija, uporabljena kot hidravlična kapljevina, je vsebovala navadno med 3 % in 5 % mineralnega olja. Nezanemarljiva razlika med mineralnim oljem in vodo je tudi vnetljivost. Emulzije so manj nevarne, a kljub temu okoljsko sporne. Voda zagotavlja večjo togost sistema zaradi svoje skoraj zanemarljive stisljivosti, kar poveča odzivnost in učinkovitost hidravličnega sistema in s tem stroja / postrojenja, za katerega opravlja delovne gibe. Manjša viskoznost vode v primerjavi z oljem pa pomeni manjši padec tlaka linijskih in lokalnih izgub. V splošnem ni kapljevine, ki bi imela toliko prednosti, kot jih ima voda in bila cenovno konkurenčna v fazi nakupa, skladiščenja in odstranjevanja [4].

Trajnostno testiranje proporcionalnih potnih ventilov

Rezultati trajnostnega testa se razlikujejo glede na režim filtriranja uporabljene vode v tokokrogu preizkušane sistema s preizkušano komponento. Pri manj finem filtriranju s 5 μm je bilo zaznано puščanje v mejah dopustnega. Pri finejšem filtriranju z 1 μm pa je sprememba puščanja še manjša. Potrjena je velika pomembnost finega filtriranja, saj v nasprotnem primeru izpostavljene sestavne dele prizadene večja obraba. Glavni razlog za nezaželenost tudi manjših trdnih delcev je približno do 30-krat manjša kinematična viskoznost vode v primerjavi s hidravličnim mineralnim oljem. Vodno-hidravlični ventili zato zahtevajo manjše zračnosti med batom in izvrtino v ohišju, da zagotavljajo ustrezno majhno notranje puščanje, ki ga oljni ventili dosežejo že z večjo zračnostjo. Kljub vsemu pa je bila tudi po 10 milijonih ciklov neustrezna filtracija glavni vzrok za, sicer podkritično, abrazijo izpostavljenih drsnih površin, torej površin elementov z relativno hitrostjo. Tolikšno število ciklov pa presega pričakovano uporabno dobo standardnih ventilov v tipičnih industrijskih aplikacijah [5].

Pri trajnostnem testu, izvedenem na 3D-tiskanem 4/3 proporcionalnem potnem ventilu (PPV) proizva-

jalca AIDRO, s hidravličnim oljem je bilo opravljenih 1 900 000 ciklov. V obdobju teh ciklov ventil ni utrpel opaznejših obrabnih poškodb. Puščanje po testiranju je bilo le zanemarljivo večje od začetnega, z izjemo puščanja na enem od priključnih vodov, kar pa je domnevno posledica izsredne lege krmilnega bata v izvrtini. Razlike so lahko do 1 : 2,5 [7].

Rezultatov trajnostnega testa tega PPV, izvedenega z mineralnim hidravličnim oljem, tu ne podajamo, ker ni predmet tega priapevka. Prikazujemo pa v prispevku, kakšno je bilo izhodiščno stanje PPV-ja za izvajanje trajnostnega testa z vodo kot hidravlično kapljevino.

Notranje puščanje

Notranje puščanje kapljevine v hidravličnih komponentah je odvisno od več dejavnikov. Splošni način za izračun volumenskega toka notranjega puščanja v kolobarjasti reži je zapisan z enačbo (1) [5], dejtajno izvajanje enačb pa je podano v [7].

$$Q_{np,najv} = n_{st,izt} \cdot \left[\frac{\pi}{12} \cdot \frac{\Delta p_r \cdot D_{sr} \cdot s^3}{\rho \cdot \nu \cdot L} \cdot f_{izsr} \right] \quad (1)$$

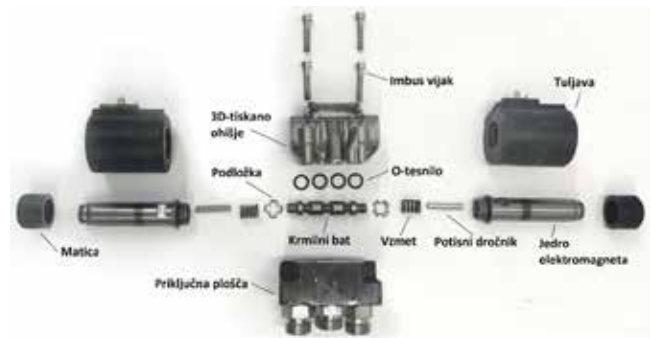
(Največje) notranje puščanje ($Q_{np,najv}$) je odvisno od števila iztekajočih presekov ($n_{st,izt}$). Pri 4/3 potnem ventilu s prostimi (sproščenimi) vsemi tremi priključki vodov (A, B in T) v ničelnem položaju in vodom P pod tlakom sta iztekajoča dva kolobarjasta preseka, skozi katera nastopi pretakanje in padec tlaka (Δp_r). Srednji premer reže je D_{sr} , to je aritmetična sredina med premerom krmilnega bata in premerom izvrtine. Povprečna višina reže je s , specifična gostota hidravlične kapljevine je ρ in njena kinematična viskoznosti ν . Dolžina enega prekritja krmilnega bata v ohišju je L . Pri preiskovanem PPV sta prekritji dve. Za dano geometrijo potnega ventila nastopi najmanjše notranje puščanje pri idealno centriranem batu glede na izvrtino: $f_{izsr} = 1$, največje pa pri maksimalno izsrednem batu: $f_{izsr} = 2,5$ [5] in [7].

Obravnavani ventil

Z ventilom HD3-AMPS-1PC-R4/10 s tiskanim kovinskim ohišjem je bil že pred tem preizkusom opravljen trajnostni test z oljem. Po tem preizkusu smo ga najprej razstavili in temeljito očistili. Popisali smo stanje komponent ventila (*slika 1*) za kasnejše ovrednotenje relativne obrabe glede na začetno stanje ter število ciklov.

Ohišje je 3D-tiskano iz avstenitne nikelj-kromove superzlitine z imenom blagovne znamke Inconel. Ta je namenjena delovanju v ekstremnih okoljih, predvsem za visokotemperaturne aplikacije.

Ventil je zasnovan na 3D tiskanem ohišju s skožno luknjo in na spodnji strani s štirimi vhodi / izhodi, in sicer za tlačni, povratni vod in dva delovna voda.



Slika 1 : Komponente AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 pred začetkom vodnega testiranja

Krmilni bat se previdno vstavi v namensko skožno luknjo s finimi tolerancami za minimalno zračnost. Na vsako stran krmilnega bata se položi podložko, nato vzmet. Jedro oziroma ključ sta vstavljena v elektromagnet, ta pa je privit na konec ohišja, da omogoča dotik ključa in krmilnega bata. Tuljava se s pokrovom pritrdi na elektromagnet, O-tesnila pa previdno položi v namensko izdelane utore, da preprečijo iztek kapljevine že pred ohišjem. Tesnila tesnijo stik ob priključni plošči. Sestavljeni ventil se nato previdno pritrdi na priključno ploščo, na katero privijemo cevne priključke za dovod / odvod hidravlične kapljevine. Paziti je treba, da štirje imbusni vijaki za pritrditev ohišja niso prenapeti, saj lahko povzročijo trajne poškodbe in / ali elastično deformacijo ohišja ter posledično nedelovanje celotnega ventila. Ta postopek smo izvedli vsakič, ko sta nas ob nedelovanju ali po daljšem obratovanju zanimala novo stanje komponent in stopnja obrabe krmilnega bata in ohišja. Po oceni stanja smo ventil očistili, posušili in poskrbeli, da je bilo izhodiščno stanje pred novo stopnjo preizkušanja čim bolj podobno izhodiščnemu.

Vodno-hidravlično preizkuševališče

Ker je bila frekvenca prekrmljenja ventila visoka, smo z dodatno, na ohišje privarjeno nosilno površino zagotovili togo vpetje plošče preizkušane ventila. Preizkuševališče smo zaščitili s površinami, neprepustnimi za vodo, ki bi ob zatajitvi katere izmed komponent vodo usmerile v zbiralnik. Med uporabo smo preizkuševališče (*slika 2*) izboljševali z odpravljanjem napak, ki so se pojavile. Na cevi povratnih vodov, vidnih tudi na *sliki 3*, smo namestili 1,2 milimetrski zaslonki, ki sta služili kot tlačna obremenitev sistema. Trajnostni test smo nadzorovali preko vmesnika s programom za vnos parametrov in z njimi povezanim režimom delovanja elektromagnetov ter zagona črpalke.

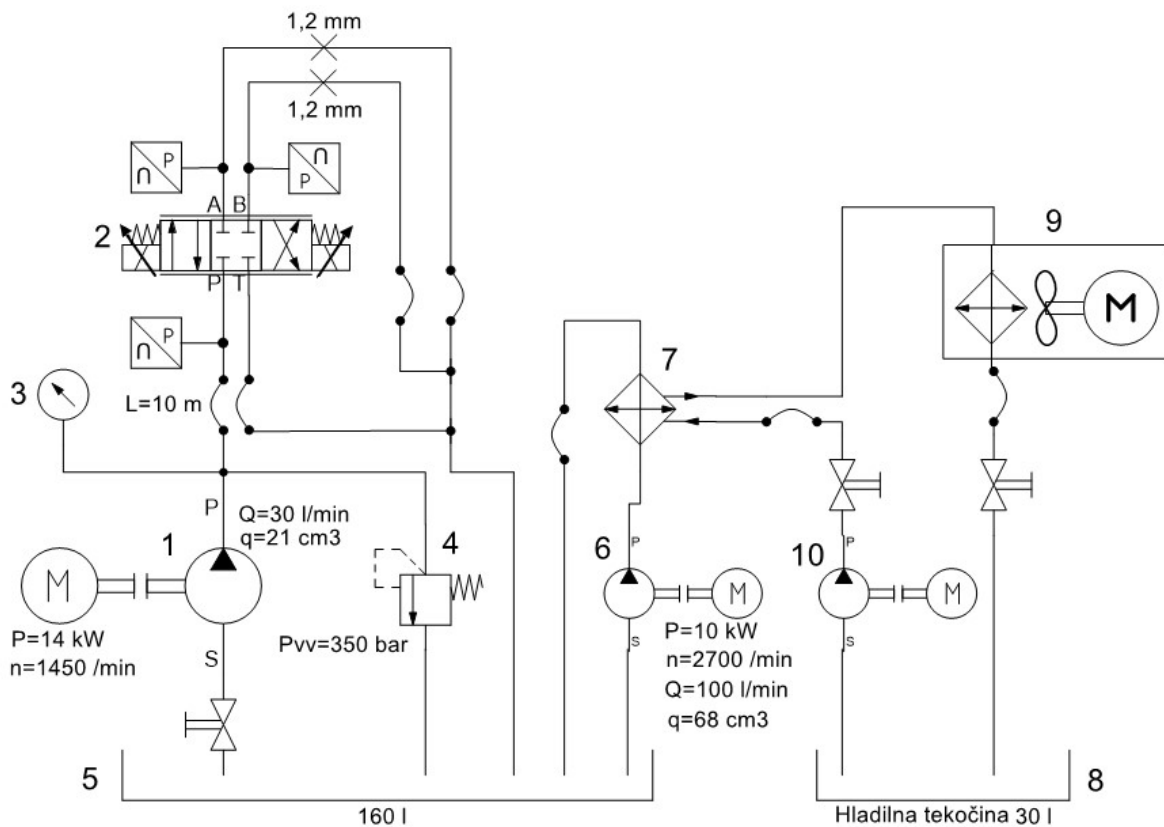
Slika 4 prikazuje shemo preizkuševališča, ki ima tri črpalke, vsako za svoj krogotok. Prva, najmočnejša črpalka (1), ustvarja zelen pretok za izvajanje trajnostnega preizkusa proporcionalnega ventila (2). Na vodu P z manometrom (3) opazujemo tlak



Slika 2 : Vodno preizkuševališče za prvo merjenje notranjega puščanja



Slika 3 : Ventil HD3-AMPS-1PC-R4/10 s priključenimi vodi ter kolenoma za zaslonkama na delovnih vodih A in B



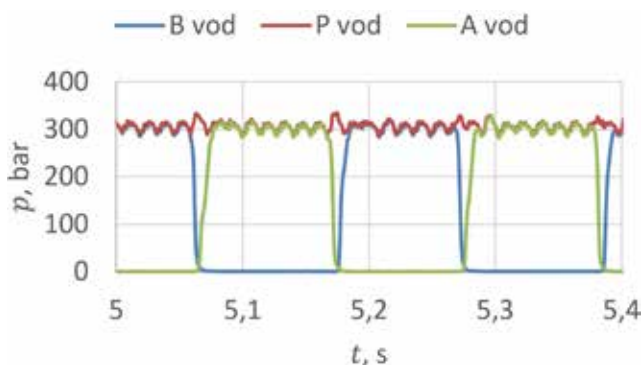
Slika 4 : Shema vodno-hidravličnega preizkuševališča za izvedbo trajnostnega testiranja ventila

obremenitve ventila. Pri preobremenitvi je z voda P preko varnostnega ventila (4) speljan dodaten povratni vod nazaj v glavni rezervoar (5). Iz tega nizkotlačna centrifugalna črpalka (6) z velikim pretokom dovaja toplo vodo v izmenjevalnik toplote (7). Slednji iz manjšega rezervoarja toploto odda hladilni kapljevini tretjega krogotoka (8). Hladi se v hladilniku z ventilatorjem (9). Hladilno kapljevino prečrpava tretja centrifugalna črpalka (10), ki je enaka primarni hladilni črpalki (6).

4 Eksperimentalna raziskava

Notranje puščanje smo merili v nekajdnevnih intervalih. Ob vsakem merjenju, ki je potekalo pri delujočih črpalkah in neaktivnih elektromagnetih, smo tlačno cev pritrdili zaporedno na vod P, A in B in na sosednjih vodih (A in B, T in P, T in P glede na prejšnje zaporedje), ki niso bili povezani s skupnim povratnim vodom, opazovali notranje puščanje v dva ločena merilna valja. Normirano odčitano puščanje vode za posamezni vod glede na pretečeni čas nam je dalo vrednost izteka kapljevine. Vsako meritev smo izvedli tri- do štirikrat zaporedoma in povprečili vrednosti za izločitev naključnih rezultatov in preverjanje ustreznosti odstopajočih meritev. Pri vsaki meritvi smo zagotovili tlak voda P 300 bar in odčitali temperaturo vode v sistemu.

Frekvenca prekrmljenja krmilnega bata med izvedbo trajnostnega testa je bila stalna, in sicer 5 Hz, torej s prekrmljenjem vsakih 0,2 s. *Slika 5* prikazuje tlačne razmere v ohišju ventila ob premikanju bata v obe skrajni legi s frekvenco 5 Hz. Vod P je stalno obremenjen s tlakom, ki niha okoli povprečnega tlaka 300 bar. Glede na skrajno lego bat zapira dotok kapljevine delovnega voda, enkrat A, drugič B. Delovna voda sta v izmeničnih nasprotnih stanjih 0 bar in 300 bar. Med premikanjem bata tlak voda P naraste, saj premikajoči bat predstavlja tlačno-pretočno oviro z izmeničnim pripiranjem izhodnih vodov.



Slika 5 : Izmerjeni tlak med izvajanjem trajnostnega testa v odvisnosti od časa v posameznih vodih B, P in A pri frekvenci 5 Hz

5 Rezultati

Pomembno je izhodiščno stanje AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10, ki je bil prej že uporabljen za trajnostni test z oljem pri tlaku 350 bar ob povprečni temperaturi olja 70 °C in z opravljenimi 1,9 milijona cikli [6].

5.1 Meritve ovrednotenja začetnega notranjega puščanja

Po opravljenem trajnostnem testu z mineralnim hidravličnim oljem smo za lažje ovrednotenje končnih ter vmesnih rezultatov z očiščenim ventilom opravili meritve notranjega puščanja. Te meritve smo v nadaljevanju opravljali z vodo kot hidravlično kapljevino. Izvajali smo jih pri tlaku 300 bar in povprečni temperaturi vode 38 °C.

Krmilni bat ventila je bil, kljub 1,9 milijonov predhodno izvedenih ciklov v olju, pred začetkom našega preizkušanja z vodo v odličnem stanju glede korozijske obrabe in rjavenja, ki ju s prostim očesom ni bilo opaziti. En cikel PPV-ja obsega naslednje delovne gibe: prekrmljenje iz srednjega (ničelnega) položaja v levi (vzporedni) položaj (gledano po simbolu ventila na sliki 4), nato prekrmljenje preko srednjega položaja v desni (križni) položaj in ponovno prekrmljenje. En tak cikel traja 0,2 s in je razviden iz poteka tlakov na sliki 5. Prikazano je tudi pulziranje tlaka, ki ga povzroča batna črpalka.

Slika 6 prikazuje krmilni bat po čiščenju in pred začetkom preizkušanja. Poleg krmilnega bata je najbolj



Slika 6 : Krmilni bat AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 pred začetkom trajnostnega preizkusa z vodo



Slika 7 : Ohišje s pritrdilnimi vijaki AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 pred začetkom trajnostnega preizkusa z vodo

občutljiva drsna površina notranjosti ohišja v sredinski izvrtini. *Slika 7* prikazuje sprednji pogled pod kotom, ki omogoča oceno površine kolobarjev med komorami ohišja. Podobno kot pri krmilnem batu je tudi notranjost ohišja odlično ohranjena, vidnih znakov rjavenja in drugih mehanizmov obrabe ni.

5.2 Stanje ventila po dneh neuporabe

Za vzpostavitev razmer trajnostnega preizkusa smo potrebovali tudi delujoč vmesnik s programom preklapljanja. Ker je postopek trajal štiri dni, je bila notranjost ventila ves čas omočena z vodo, ki je tam ostala od prvega merjenja notranjega puščanja. Ob preizkušanju vklopa elektromagnetov za premik krmilnega bata se ta ni odzival kljub delujočemu programu. *Slika 8* prikazuje neočiščeno ohišje ventila in njegovo notranjost. Krmilni bat smo s težavo odstranili iz ohišja. Na *sliki 9* je prikazan pred čiščenjem. Vidna je zaradi korozije spremenjena barva ter posledično večja hrapavost površin. Podobno velja za notranjost ohišja. Da se podobne težave ne bi ponovile, smo ventil spihali in očistili ter razstavljene sestavne dele, namenjene stiku s hidravlično kapljevino - vodo, shranili ločeno v zaprtem okolju z manjšo vlažnostjo do naslednje uporabe.



Slika 8 : Detajl notranjosti hišja AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 po štirih dneh neuporabe



Slika 9 : Krmilni bat AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 po štirih dneh neuporabe

5.3 Stanje po 477 000 ciklih

Očiščeni ventil je bil dobro ohranjen, a kljub temu drugače obarvan glede na začetno stanje. S prostim očesom ostalih sprememb nismo opazili. Druge meritve notranjega puščanja vode smo opravili po 477 000 zaporedno opravljenih ciklih. Neprekinjeno delovanje je trajalo 25,5 ur. Meritve pri tlaku 300 bar in temperaturi vode 35 °C so dale nove rezultate. Pri meritvah tlačno obremenjenega voda P smo izločili meritve, ki je drastično odstopala od povprečja ostalih. Pretečeni čas je bil namreč še enkrat večji, vrednost relativnega izteka pa enkrat manjša. Pred nadaljevanjem meritev smo bat nekajkrat preklopili, kar je vplivalo na enotnejše rezultate.

5.4 Stanje po 1 500 000 ciklih

V tej fazi je preizkuševališče delovalo neprekinjeno dodatnih 80 ur, v katerih naj bi ventil poleg dosedanjih 477 000 naredil dodatnih približno 1 500 000 ciklov. Ker pa je imel curek skozi zaslonko toliko energije, je prebil koleno. Del tako poškodovanega kolena je viden na *sliki 10*. Krmilni bat se je med preizkusom kljub delovanju elektromagnetov v tej fazi ustavil. Prebito koleno z vodo A smo nadome-



Slika 10 : Del kolena z vidno poškodbo, nastalo zaradi vodnega curka



Slika 11 : Spodnji del ohišja brez O-tesnil, krmilni bat, podložki in originalni vzmeti AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 po 1 500 000 ciklih

stili s togo cevjo s postopnim 90-stopinjskim zavojem, da bi se izognili točkovni preobremenitvi cevi zaradi kinetične energije vode in kavitacije. Enako zamenjavo smo preventivno izvedli tudi na mestu drugega kolena. Da bi ugotovili vzrok zaustavitve ventila, smo ga razstavili. Opazili smo, da je bila ena izmed vzmeti med elektromagnetom in podložko trajno poškodovana. Vzmet, ki sicer služi kot protisila elektromagnetni sili ter s tem preprečuje poškodbe konca elektromagneta, je ob porušitvi povzročila neravnovesje aksialnih sil in s tem nezmožnost krmiljenja bata. *Slika 11* prikazuje stanje krmilnega bata in obe originalni vzmeti, delujočo in zlomljeno. Skupno opravljene cikle obremenjevanja smo zaradi pomanjkanja informacij o času zaustavitve krmilnega bata zmanjšali za pol milijona na skupnih 1 500 000. Pred izvedbo meritev notranjega puščanja vode v tej fazi smo počeno vzmet nadomestili z novo, ki je imela zelo podobno togost in osnovne mere.

5.5 Stanje po 2 000 000 ciklih

Pri delovanju sistema za izvajanje novih pol milijona ciklov so ponovno nastopile težave zaradi vodne erozije in zelo verjetno tudi zaradi kavitacije. Ena izmed togih cevi novega para za pravokotni zavoj vodov A in B je utrpela poškodbo na dveh bližnjih točkah, kjer se je vodni curek iz zaslonke upiral spremembi smeri toka. Ponovno smo nadomestili oba omenjena dela, tokrat s parom togih daljših cevi z večjim radijem ukrivljenosti. S tem smo povečali razdaljo med zaslonko in stikom curka s cevjo, tako da je imel vodni curek manj razpoložljive energije za odnašanje materiala ob prisilni spremembi smeri v cevi. Po 577 000 ciklih nadaljevanega testiranja (od tega upoštevanih 500 000 zaradi problematične določitve točnejšega časa prekinitve preklapljanja) se je trajnostno utrudila in zlomila tudi druga vzmet. Ob razstavljanju ventila krmilni bat ni več prosto padel iz ohišja. Vzrok je bila še zadnja originalna počena vzmet, ki se je zagostila med ohišje in bat. Poškodovano vzmet smo previdno odstranili iz ohišja. Za ločitev krmilnega bata od ohišja je bila potrebna malo večja sila, saj je bila minimalna zračnost zapolnjena z drobnimi delci, nastalimi ob utrujanju in koroziji vzmeti. To smo zamenjali z novo vzmetjo, zelo podobno glede togosti in dimenzij, ki ni bila povsem identična že prej zamenjani vzmeti z druge strani ventila. Razlike so bile sicer minimalne, a smo bili ob vsakem razstavljanju kljub vsemu



Slika 12 : Krmilni bat AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 po 2 000 000 ciklih



Slika 13 : Ohišje AIDRO ventila HD3-AMPS-1PC-R4/10 z zagosteno originalno vzmetjo

pozorni, da smo pri ponovnem sestavljanju ločevali med komponentami z ene in druge strani.

Na tej stopnji je bil krmilni bat že bolj izrazito obarvan, kar prikazuje *slika 12*. Opazijo se lisasti vzorci kot posledice obrabe zaradi radialne ekscentričnosti oziroma dolgotrajne blage korozije, ki zaradi stalnega pretoka in spreminjanja lege krmilnega ventila nima tako velikega vpliva kot v mirovanju. Največja sprememba pa se pozna na površinah bata, ki so najbližje ohišju. Razmere, v katerih se je preklapljanje v tej stopnji izvajalo, so bile specifične. Zaradi počene erozijsko načete vzmeti so bili v obtoku drobni trdni delci. Poleg tega se je krmilni bat premikal še nekaj časa po poškodbi vzmeti in sicer v ekscentrični legi.

Slika 13 prikazuje v ohišju zagosteno vzmet, od katere so med preizkušanjem zaradi utrujanja odpadali drobni delci, ki so pospeševali obrabo krmilnega bata ter ohišja, na katerem opazimo rjavkaste sledi. Po čiščenju omenjenih sestavnih delov ventila smo opazili, da sta oba v dobrem stanju, obarvana pa sta bila predvsem zaradi korozijsko razjedene počene vzmeti.

5.6 Stanje po 3 390 000 ciklih

V treh dneh neprekinjenega delovanja je ventil opravil dodatnih 1 390 000 ciklov. Ob ponovnem zagonu se krmilni bat ni odzival, zato smo ga razstavili in pregledali. Pri ločevanju krmilnega bata od ohišja smo morali uporabiti večjo silo, saj je bil bat zagosten, brez možnosti pomikov po ohišju ali rotacije okoli svoje osi. Na *sliki 14* opazimo bolj agresivne poškodbe notranjosti ohišja. Neočiščen krmilni bat na



Slika 14 : Ohišje AIDRO ventila HD3-AMPS-IPC-R4/10 po skupno 3 390 000 ciklih pred čiščenjem



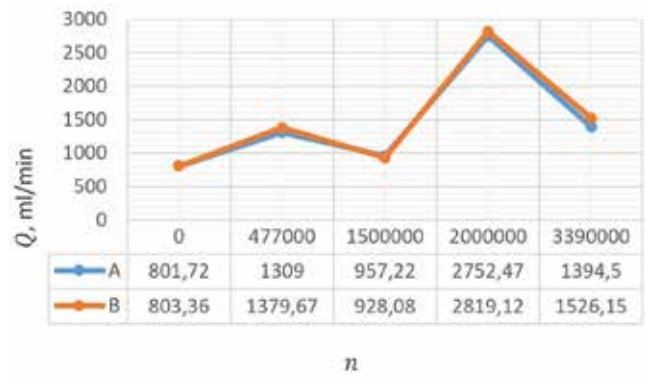
Slika 15 : Krmilni bat AIDRO ventila HD3-AMPS-IPC-R4/10 po 3 390 000 ciklih pred čiščenjem

sliki 15 je na zožitvah prekrit z drobnimi trdnimi delci, ki so povzročali upor ob drsenju bata skozi ohišje.

Merjenje notranjega puščanja je bilo zato na tej stopnji neuspešno. Po čiščenju ventila se je ta ob vklopu elektromagnetov odzival. Takoj ko smo ventil izpostavili vodnemu tlaku 300 bar pri prostih delovnih vodih, pa se krmilni bat ni več premaknil. Čiščenje ventila smo ponovili z alkoholom in tlačnim zračnim curkom, a je bil rezultat enak. Notranje puščanje v takih razmerah je bilo več kot desetkrat manjše od prejšnjih meritev. V rezervoarju smo zamenjali vso vodo in s tem usedline, da kapljevina ni bila motna. S sprejem za odstranjevanje vode in preprečevanje korozije smo premazali za nekaj ur razstavljenе oksidacijsko občutljive sestavne dele ventila. Naslednje meritve so bile uspešnejše, saj je ventil deloval tudi po tlačni obremenitvi z vodo.

5.7 Primerjava meritev notranjega puščanja

Skupni končni rezultati meritev notranjega puščanja AIDRO ventila HD3-AMPS-IPC-R4/10 v odvisnosti od opravljenih ciklov krmilnega bata so predstavljeni na slikah 16, 17 in 18.



Slika 16 : Spreminjanje notranjega puščanja vode skozi AIDRO-v proporcionalni potni ventil v odvisnosti od opravljenih ciklov s tlakom 300 bar na vodu P



Slika 17 : Spreminjanje notranjega puščanja vode skozi AIDRO-v proporcionalni potni ventil v odvisnosti od opravljenih ciklov s tlakom 300 bar na vodu A



Slika 18 : Spreminjanje notranjega puščanja vode skozi AIDRO-v proporcionalni potni ventil v odvisnosti od opravljenih ciklov s tlakom 300 bar na vodu B

6 Zaključki

V okviru predstavljene raziskave smo z vodo trajnostno testirali proporcionalni 4/3 potni ventil s tiskanim kovinskim ohišjem. V okviru predstavljenega dela smo izvedli in ugotovili naslednje:

1. Izmerili smo notranje puščanje ventila večkrat med testom do preko treh milijonov ciklov. Rezultati meritev so v območju med 0,15 in 5,0 l/min, kar je razvidno iz slik 16, 17 in 18.

2. Pokazali smo, kateri sestavni deli testiranega proporcionalnega potnega ventila (PPV) so najbolj občutljivi pri uporabi vodne hidravlike.
3. Rezultati so pokazali, da je obnašanje ventila v obravnavanih razmerah nestabilno.
4. Pokazali smo, da je vzrokov za različno izmerjeno notranje puščanje veliko, od izsrednosti lege krmilnega bata v izvrtini do temperature kapljevine.
5. Dosegli smo več kot 3 390 000 ciklov z istim krmilnim batom in ohišjem.
6. Pokazali smo, da je daljša prekinitev delovanja ventila v vodnem krogotoku neprimerna in povzroča največ nevšečnosti.
7. Vsi elementi PPV-ja morajo biti izdelani iz nerjavnega jekla, ker ta pogoj ni bil izpolnjen, so bile težave pričakovane.

Glavni prispevek raziskave so rezultati, ki omogočajo boljše predvidevanje podobnih trajnostnih preizkusov ob izločitvi zaviralnih dejavnikov. Prikazali smo del problematike, ki v večjem obsegu onemogoča hitrejši prehod hidravlike na uporabo potencialne hidravlične kapljevine prihodnosti. Ob uporabi vzmeti iz nerjavnega jekla bi preizkušanje teklo bolj nemoteno, predvsem če se zavedamo, da so bile standardne vzmeti glavni vzrok težav.

Literatura

- [1] F. Majdič: Hidravlika in pnevmatika: konvencionalni potni ventili (predloga za predavan-

- ja). Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2021.
- [2] N. Herakovič: Proporcionalna hidravlika: uvod (zapiski in predloga za predavanja). Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2021.
- [3] S. Z. Erhan: Vegetable Oils as Lubricants, Hydraulic Fluids, and Inks, in Bailey's Industrial Oil and Fat Products, American Cancer Society, 2005. doi: <https://doi.org/10.1002/047167849X.bio055>.
- [4] E. Trostmann: Tap Water as a Hydraulic Pressure Medium, CRC Press, Boca Raton, 2018, str. 1-9.
- [5] F. Majdič, J. Pezdirnik, M. Kalin: Experimental validation of the lifetime performance of a proportional 4/3 hydraulic valve operating in water, Tribology International, vol. 44, no. 12, pp. 2013-2021, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2011.08.020.
- [6] F. Majdič: Pressure test of Aidro valves. Laboratorij za fluidno tehniko (LFT), Fakulteta za strojništvo univerze v Ljubljani, Ljubljana, 2020.
- [7] J. Pezdirnik: Tok tekočine skozi reže v hidravličnih sestavinah: (tok kapljevine skozi reže med soležnimi vzporednimi ploskvami brez medsebojne relativne hitrosti) = Fluid flow through gaps in hydraulic components: (liquid flow through gaps between parallel surfaces without relative velocity), Stroj. vestn., 2001, letn. 47, št. 5, str. 210-216. [COBISS.SI-ID 4659739]

Water-hydraulic endurance test of an oil-hydraulic proportional directional control valve

Abstract:

Hydraulic fluids made from fossil fuels are a major ecological burden despite their good corrosion and wear properties. Water seems to be the future of hydraulic fluids, but due to lack of interest and special equipment, it is still underestimated. We have sustainably tested a proportional directional control valve made by three-dimensional printing using water as hydraulic fluid. We observed the change in internal leakage as a function of the number of cycles (from the initial state, shown in *Figures 6 and 7*, to the final state of the body and spool, as shown in *Figures 14 and 15*). The measurement results, shown in *Figures 16, 17 and 18*, are unexpected and difficult to explain. The final stage of wear of the spool, i.e. small particles of the worn spring, were clearly visible. Corrosion erosion is the major problem in performing the sustainability test as proved by the attached pictures.

Keywords:

Water hydraulics, sustainability test, internal leakage, proportional valve, corrosion, wear

Zahvala

Zahvaljujemo se podjetju AIDRO SRL za priskrbljen preizkušan proporcionalni potni ventil lastne blagovne znamke ter predstavniku slovenskega zastopnika Hidravlika Celje d.o.o. g. Borutu Erženičniku.

Acknowledgement

We are thankful to AIDRO SRL company for providing their own proportional valve that has been tested in this research and the Slovenian representative Hidravlika Celje d.o.o. Mr. Borut Erženičnik.