

# KDAJ IN KOLIKO JE PRIHODNOSTI V VODNI HIDRALIKI?

Franc MAJDIČ, Jožef PEZDIRNIK, Mitjan KALIN  
Univerza v Ljubljani (UL), Fakulteta za strojništvo (FS), Ljubljana  
Center za tribologijo, tehnično diagnostiko in hidravliko (CTDH)

## Povzetek

Skrb za ekologijo postaja vedno pomembnejša. Uporaba vode namesto mineralnega hidravličnega olja v pogonsko-krmilni hidravliki je eden izmed pozitivnih korakov v smeri ohranjanja narave. V tem prispevku najprej podajamo nekaj primerjav triboloških lastnosti nekaterih materialnih parov v drsnem kontaktu, ki je eden temeljnih kontaktov znotraj hidravličnih sestavin. Nadalje predstavljamo rezultate raziskav delovnih parametrov na dvojnem, to je na vodnem in oljnem delu hidravličnega preizkuševališča. V zadnjem delu prikazuje prispevek tudi rezultate trajnostnega testa novega vodnega proporcionalnega potnega ventila, kjer gre predvsem za drsni kontakt dveh elementov iz nerjavnega jekla ter zadovoljivo funkcionalnost vodne hidravlike v primerjavi z ekvivalentno oljno.

**Ključne besede:** voda, mineralno olje, pogonsko-krmilna, hidravlika, proporcionalni ventil

## Abstract

Environmental protection regulations are becoming increasingly strict. By using water instead of a hydraulic mineral oil in power-control hydraulic systems we can make a very positive step in complying with these regulations. First of all, comparison of tribological properties of some material pairs in sliding contact, which is one of the basic contacts inside hydraulic components, is shown in this paper. It is continued with results of research of working parameters on twin-type hydraulic test rig, employing equal parts containing water and oil. Then we carried out lifetime test for the first chosen material pair being hardened stainless steel for the spool against hardened stainless steel for the sleeve. The paper shows the change of the leakage flow through time at the duration test and the changes on the sliding surfaces. Duration test was executed with more than 2 million cycles. The used hydraulic liquid was distilled water; working temperature was in the range from 30 to 35°C, setting pressure of the pressure relief valve was up to 160 bar, the testing frequency was 5 Hz at the spool amplitude of +/- 100 %. The results show that we can be optimistic about usability of the tested proportional control water valve.

**Keywords:** Water, Mineral oil, Power control, Hydraulics, Proportional valve

## 1. Uvod

Zaščita pitne vode in ekologije nasploh je vedno bolj pomembna. Nepričakovani izlivi naravi škodljivih hidravličnih tekočin, npr. mineralnega olja, v zemljo in naprej v zajetja pitne vode se pogosto dogajajo. Eden današnjih izzivov za zaščito okolja in pitne vode je uporaba alternativnih, naravnih virov hidravličnih tekočin. V pogonsko-krmilni hidravliki obstajata dve rešitvi za zadostitev željam po zaščiti okolja. Prva možnost je uporaba bio-razgradljivega olja [1-6] namesto mineralnega olja. Vendar je to le delna rešitev, saj bio-razgradljivo hidravlično olje lahko vsebuje tudi dodatke, ki so škodljivi za okolje. Druga možnost je uporaba vode iz pipe namesto mineralnega olja. Uporaba vode iz pipe je popolnoma neškodljiva za okolje, vendar je zelo težko izvedljiva [7,8]. Za vodno hidravliko so na tržišču že na razpolago relativno enostavni konvencionalni hidravlični ventili, primanjkuje pa zvezno-krmiljenih hidravličnih ventilov, ki so nujno potrebni za velik del dandanašnjih hidravličnih strojev in naprav. Trenutno je na tržišču na razpolago še vedno premalo hidravličnih sestavin na vodo iz pipe z zvezno regulacijo. Čeprav kakšno od teh že dobimo, pa je le ta ponavadi zelo kompleksna z velikim številom sestavnih delov. Kljub več kot petnajst-letnemu obdobju razvoja na področju vodne hidravlike je še vedno pomanjkljivo razumevanje mehanizmov delovanja in njihovih lastnosti.

V tem prispevku prikazujemo rezultate prve obširne raziskave na področju vodne hidravlike in jih primerjamo z rezultati raziskave oljne hidravlike, s funkcionalno-analognega oljnega preizkuševališča.

## 2. Eksperimentalni del

### 2.1. Modelno tribološko preizkuševališče (ang. "Pin-on-disc")

Modelne tribološke preizkuse [9] smo izvedli s standardnim preizkuševališčem, imenovanem ang. "Pin-on-disc", izdelovalec CSM, Švica. Z namenom, da raziščemo hidravlične parametre, predvsem obrabne obstojnosti in uporabne dobe preizkušanca proporcionalnega vodnega potnega ventila, smo izvedli modelne tribološke preizkuse za nekaj različnih možnih kombinacij materialnih parov, za drsni kontakt elementov z relativno hitrostjo znotraj vodnega proporcionalnega potnega ventila drsniškega tipa. Namen teh preizkusov je začeten predizbor ustreznega materialnega para, krmilni bat in puša, za nov vodni proporcionalni potni ventil.

Relativna hitrost drsenja je bila 0,1 m/s in pritiska obremenitev trna na disk 1 N, kar je primerljivo s 40 do 70 MPa kontaktnega tlaka, odvisno od materialnega para. V dostopni literaturi [14-16] so podani rezultati za nekatere izbrane polimerne materiale pri nizkih tlakih. Naš namen pa je bil raziskati obrabo v zgornjem dopustnem razredu za te materialne pare. Vsak opazovani materialni par je v preizkusu opravil skupno

drsko pot 370 m. Vsi ti testi so bili izvedeni v posodi z destilirano vodo pri 21 °C, to je pri pogojih sobne temperature. Ti pogoji zadostijo mejnemu režimu mazanja, kjer je hidrodinamični efekt skoraj zanemarljiv. V tem področju so tribološke lastnosti odvisne predvsem od površine in mejnih plasti.

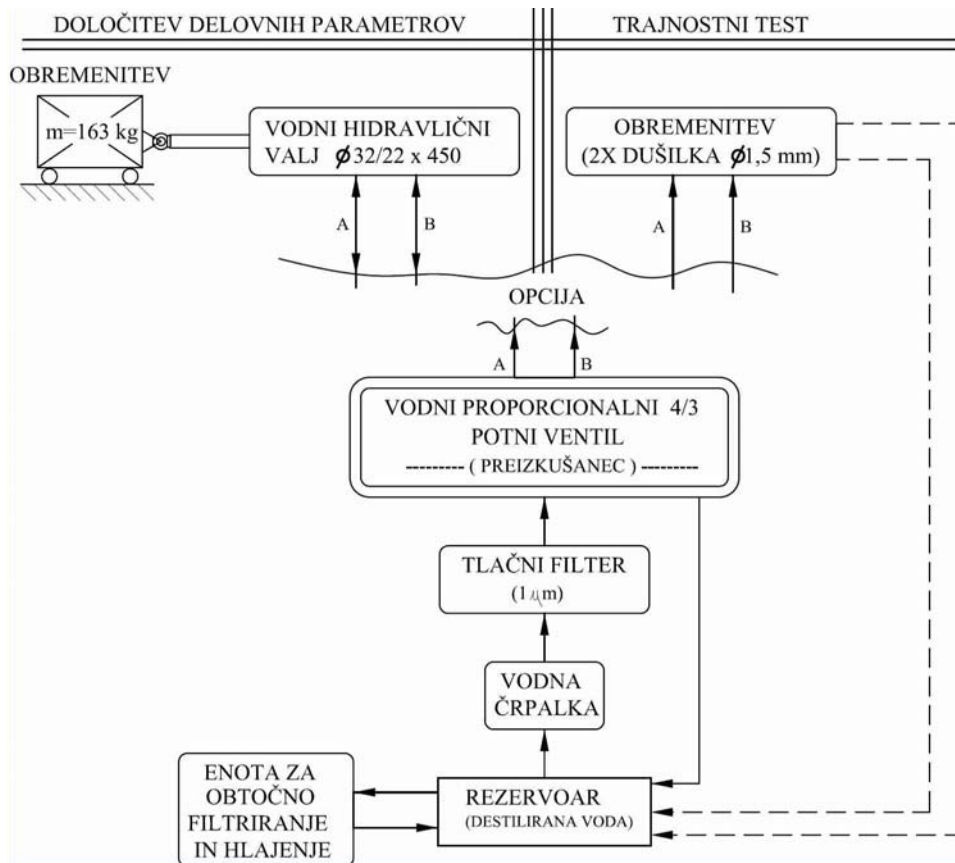
Za testiranje na modelnem preizkuševališču smo izbrali keramiko, nerjavno jeklo in po dva različna tipa materialov iz dveh različnih skupin polimernih materialov; to sta poli-eter-eter-keton (PEEK) in poliimid (PI). Prvi, komercialno dostopen PEEK, vsebuje 30 % ogljikovih vlaken (tip: CA30) in drugi 30 % steklenih vlaken (GL30). Iz druge skupine, poliimidi, smo izbrali en tip brez dodatkov (SP1) in drugega z vsebnostjo 15 % grafitnih vlaken (SP21). Pri testu smo za material trna uporabili nerjavno jeklo (X105CrMo17), kaljeno na 55 Hrc, in keramične kroglice  $Al_2O_3$  (99,7 % čista keramika, premer kroglice 10 mm). Skupaj smo za material diska izbrali 4 tipe polimernih materialov in nerjavno jeklo, medtem ko smo za trn izbrali enako nerjavno jeklo kot za disk in keramiko  $Al_2O_3$ .

## 2.2. Vodno hidravlično preizkuševališče

Glavni sestavni deli vodnega preizkuševališča [9-13] so prikazani na poenostavljenem blokovnem diagramu (sl. 1) ter na fotografiji (sl. 2) vodnega preizkuševališča. Preizkuševališče sestavljajo hidravlični rezervoar, visokotlačna vodna črpalka, tlačni filter, vodni proporcionalni 4/3 potni ventil (preizkušanelec) ter opcijsko, vodni hidravlični valj ( $\varnothing 32/22 \times 450$ ) z utežjo ali dve dušilki (premer 1,5 mm). Vodni hidravlični valj smo uporabili v primeru raziskav delovnih hidravličnih parametrov, dušilki pa v primeru trajnostnega testa. Dodatno je na preizkuševališču poskrbljeno še za obtočno filtriranje in hlajenje. Večina sestavin, razen preizkušanca, vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila in vodnega hidravličnega valja, je serijske izdelave. Poleg omenjenih sestavin je na preizkuševališču še ustrezna merilna in krmilna oprema. Zajem podatkov meritev in krmiljenje se izvaja s pomočjo programske opreme LabView, proizvajalca National Instruments.

V vodnem preizkuševališču smo za hidravlično tekočino uporabljali destilirano vodo, za materiala krmilnega bata in puše, kot tribološki drsni par, pa smo se odločili po izvedenih modelnih triboloških testih (pogl. 3.1).

Oljno hidravlično preizkuševališče je funkcijsko-podobno zgrajeno, kot predstavljeno vodno preizkuševališče. Zgrajeno je iz standardnih, na tržišču dostopnih sestavin, razen oljnega hidravličnega valja, ki je izdelan popolnoma enako kot vodni hidravlični valj.



**Slika 1:** Blokveni prikaz zgradbe vodnega preizkuševališča za določitev delovnih parametrov in trajnostni test

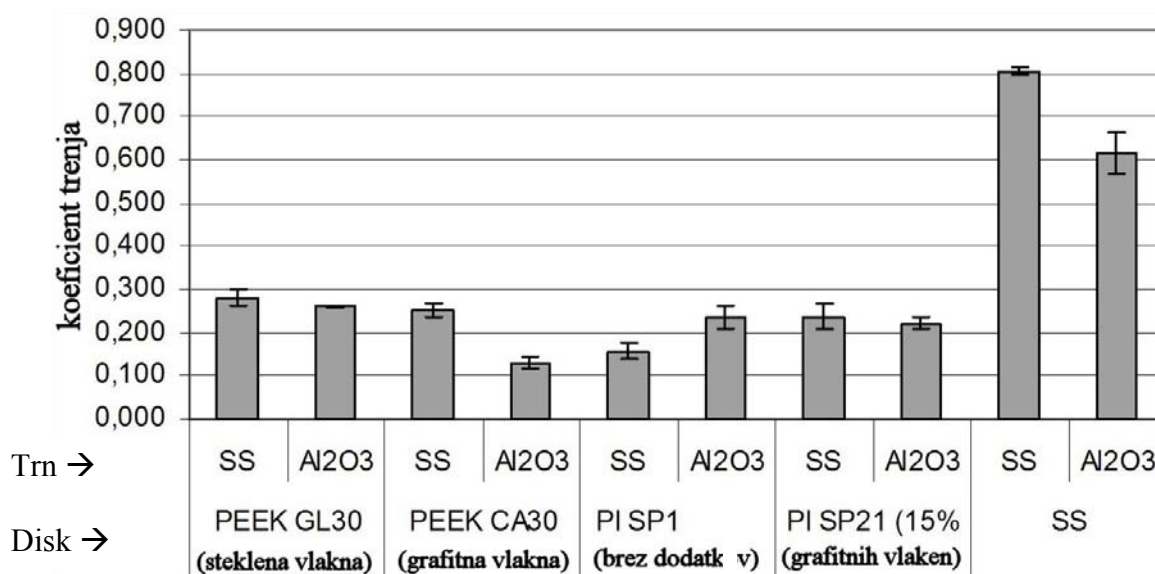


**Slika 2:** Fotografija vodnega preizkuševališča

### 3. Rezultati

#### 3.1. Rezultati modelnih triboloških testov

**Koeficient trenja** (sl. 3) je bil v primeru merjenja (s "pin-on-disk napravo") na diskih iz nerjavnega materiala (SS) vidno višji kot pri vseh ostalih štirih diskih iz polimernih materialov. V primeru diska iz nerjavnega materiala je bil koeficient trenja med 0,6 in 0,8; odvisno od materiala trna. Rezultati izmerjenih koeficientov trenja za ostale materialne pare so v območju med 0,13 in 0,28, kar je 2- do 3-krat manj kot v primeru z nerjavnim diskom. Če primerjamo koeficiente trenja, je bil ta pri vseh polimernih diskih, z izjemo čistega poliimida (SP1), v kombinaciji s keramično kroglico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) manjši kot v primeru kontakta z nerjavnim diskom (SS). Te razlike niso bile zelo velike. Pomembno je opomniti, da je bil koeficient trenja čistega poliimida (SP1) proti nerjavnemu jeklu (SS) drugi najnižji, in sicer 0,16. To je pomembno, ker poliimid (SP1) ne vsebuje nobenih dodatkov in je zato enostavnejši in posledično cenejši. Nadalje je trn iz nerjavnega jekla najbolj primeren protimaterial s praktičnega vidika. Najnižje trenje v tej študiji je bilo v primeru kombinacije polieter-eter-ketona s 30 % grafitnih vlaken (PEEK CA30) proti keramiki ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kjer je bil koeficient trenja okoli 0,13.

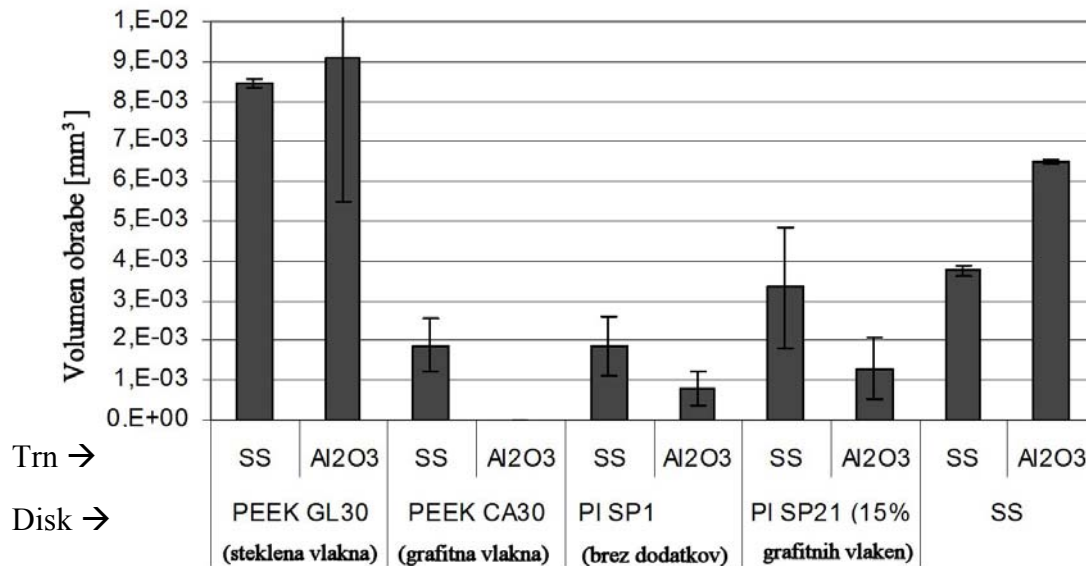


**Slika 3:** Koeficient trenja za izbrane materialne pare v vodni kopeli

Podobno kot pri trenju je bila **obraba** (sl. 4) trna iz polimera PEEK CA30 v kontaktu s keramično kroglico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) tako majhna, da je ni bilo moč izmeriti s tehniko, ki jo uporabljamo (tip meritve s tipalom z resolucijo v z-osi okoli 50 nm). Ta materialna kombinacija je daleč najobetavnejša od vseh testiranih v tej raziskavi.

Majhno obrabo keramične kroglice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) smo dobili tudi ob preizkusih, kjer je bila ta v kontaktih z obema poliimidoma SP1 in SP21. Sprejemljivo nizko obrabo smo

zabeležili še v primeru polimerov PEEK CA30, PI SP1 in PI SP21 v kontaktu s trnom iz nerjavnega jekla (SS). Na drugi strani pa diska iz nerjavnega jekla in PEEK GL30 vedno povzročata večjo obrabo. To se najbolj odraža v kombinaciji s keramično kroglico, ki se obnaša nasprotno kot PEEK CA30, PI SP1 in PI SP21.



Slika 4: Obraba za izbrane materialne pare v vodni kopeli

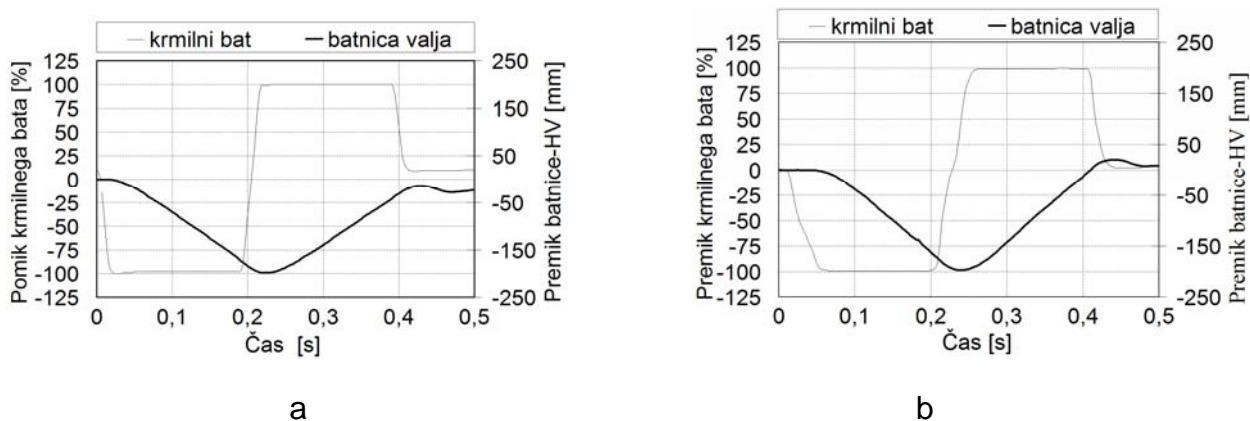
Glede na zelo obetavne rezultate triboloških meritev na modelnem preizkuševališču različnih materialnih drsnih parov v vodi lahko določimo primeren drsni par za našo aplikacijo. To bi nedvomno bil materialni par iz poli-eter-eter-ketona z grafitnimi vlakni (PEEK CA30) in industrijske keramike, imenovane tudi »alumina« ( $Al_2O_3$ ). Takoj pa pridemo do problema, da je tak materialni par zelo težko ustrezno obdelati, vsaj kot prototip. Po številnih neuspešnih poizkusih, da dobimo izdelovalca za izdelavo prototipa iz keramike in PEEK-a, smo se odločili, da za začetek najprej poizkusimo z materialnim parom, ki glede rezultatov pri triboloških modelnih preizkusih ni najboljše obetal. Za prve hidravlične preizkuse proporcionalnega vodnega 4/3-potnega ventila smo za bat in pušo izbrali enak material, in sicer kaljeno nerjavno jeklo (X105CrMo17). Ta materialni par je imel v triboloških testih najvišji koeficient trenja in povprečno obrabo.

### 3.2. Delovni parametri vodne hidravlike

S slike 5.a za oljno preizkuševališče je razvidno, da je pomik obremenjene batnice z utežjo v horizontalnem položaju pri gibu proti levi za 198 mm (izmerjeno – levi del nagnjene krivulje z oznako "batnica valja"), kar je za 23 mm več kot v primerjavi z gibom batnice proti desni (desni del nagnjene krivulje). To je izmerjena razlika po iznihanju batnice – po končanem hidravličnem udaru. Obremenjena batnica oljnega

hidravličnega valja v horizontalnem položaju se pri simetričnem vhodnem krmilnem signalu oljnega proporcionalnega potnega ventila S1 ni več vrnila v začetno stanje. Ustavila se je na mestu, ki je za 23 mm pred točko, kjer je batnica speljala. To pomeni za ca. 12 % nesimetričen gib batnice pri simetričnem vhodnem krmilnem signalu.

Na sliki 5.b za vodno preizkuševališče je prikazan pomik enako obremenjene batnice kot pri prejšnjem oljnem preizkuševališču pri podobnem krmilnem signalu S1, ki je krmilil proporcionalni vodni potni ventil. Prikazani pomik je večji za približno 10 % od dejansko izmerjenega zaradi korekcije prekritja vodnega v primerjavi s prekritjem pri oljnem proporcionalnem potnem ventilu. Z upoštevanjem računske korekcije prekritja je bila dolžina pomika obremenjene batnice vodnega hidravličnega valja v smeri proti levi 201 mm. Batnica se je po preklopu v vzporeden položaj proporcionalnega vodnega potnega ventila vrnila proti začetnemu mestu in se ustavila za približno 8 mm pred položajem pred začetkom meritve, kar pomeni nesimetričnost pomika za približno 4 % od celotnega giba.



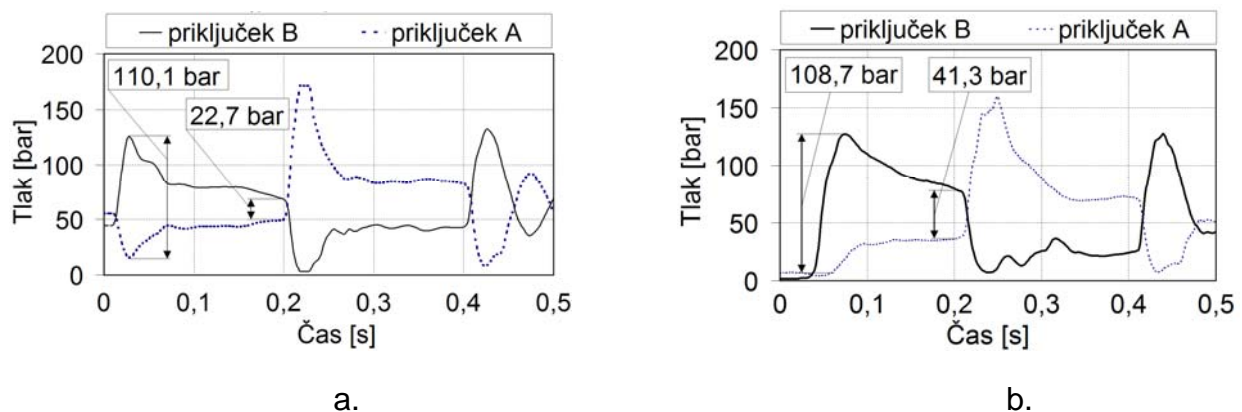
**Slika 5:** Primer meritve pomika batnice hidravličnega valja in krmilnega bata v odvisnosti od časa za: a) olje, b) vodo (pretok = 33 l/min, tlak = 160 bar, masa = 163 kg horizontalno, koračni signal S1  $\rightarrow$  t = konstanta)

Meritve tlakov na A- in B-priključku (sl. 6) tik pred hidravličnim valjem nam povedo, kakšni so potrebni tlaki za premagovanje trenja tesnil v valju, premikanje horizontalne mase skupaj s trenjem v kolesih, na katerih se utež pelje, in premagovanje lokalnih izgub pri vtoku in iztoku kapljevine v hidravlični valj oz. iz njega. Linijskih izgub med tema dvema merilnima mestoma ni veliko, saj sta bili tlačni zaznavali montirani tik pred hidravličnim valjem in za njim in jih lahko zanemarimo.

Slika 6.a prikazuje meritve tlakov na A- in B-priključku ob oljnem hidravličnem valju. Razvidno je, da je razlika tlakov, potrebna za speljevanje uteži  $dp_{B-A}$ , spelj. (125,6– 5,5), enaka 110,1 bar. Pri gibanju uteži s konstantno hitrostjo pa je razlika tlakov med B- in A-priključkom  $dp_{B-A}$ , konst. (72,3–49,6) enaka 22,7 bar.

Na vodnem preizkuševališču (sl. 6.b) znaša potrebna razlika tlakov za speljevanje enake uteži kot pri oljnem (127,1–18,4) 108,7 bar, kar je za 1,3 % manj kot pri oljnem preizkuševališču. Razlika tlakov, potrebna za gibanje uteži pri konstantni hitrosti za vodno preizkuševališče (78–36,7), znaša 41,3 bar, kar je za 82 % več kot pri enakih pogojih pri oljnem preizkuševališču.

Slika 6 prikazuje eno izmed devetih meritev, ki smo jih ovrednotili za ugotovitev vpliva pretoka in tlaka na višino potrebnega delovnega tlaka za speljevanje in gibanje s konstantno hitrostjo obremenjene batnice hidravličnega valja v horizontalnem položaju, in sicer tako za oljno kot tudi za vodno preizkuševališče.



**Slika 6:** Primer meritve tlaka na A- in B-priključku ventila tik pred hidravličnim valjem v odvisnosti od časa za (a) olje, (b) vodo (*pretok = 33 l/min, tlak = 160 bar, masa = 163 kg horizontalno, koračni signal S1 → t = konstanta*)

### 3.3. Trajnostni test vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila

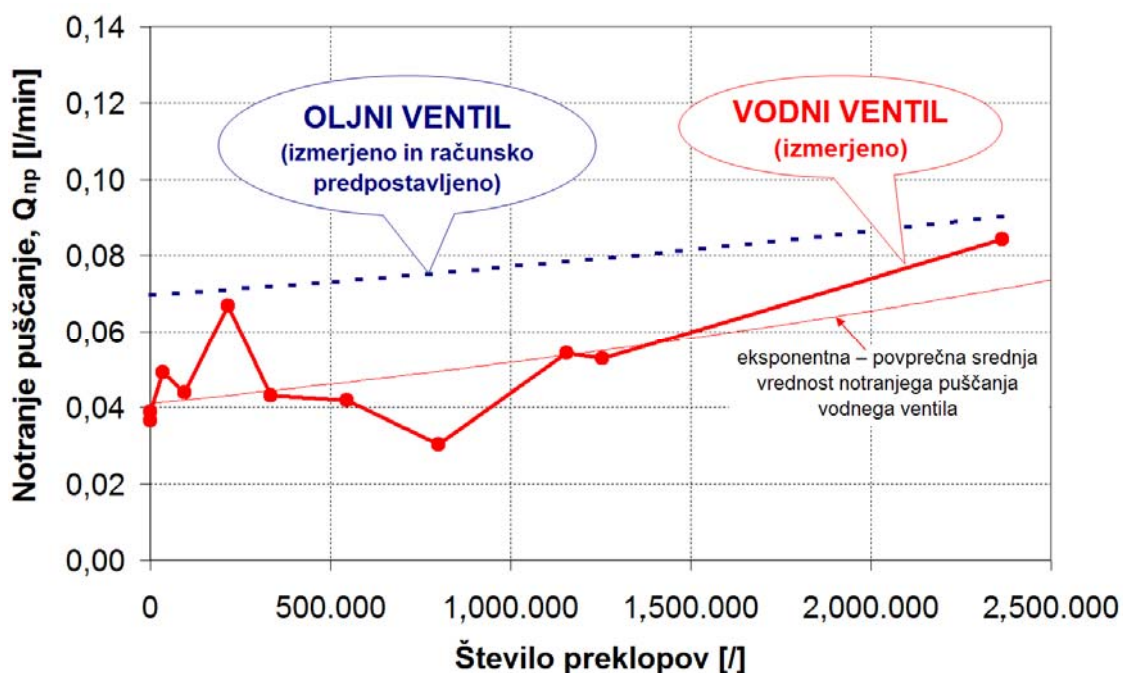
Na sliki 7 so prikazani rezultati meritev sprememb notranjega puščanja v 2,4 milijonih preklpov. Za vsako posamezno meritev notranjega puščanja vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila (ena meritev je ena točka na krivulji – polna črta), smo preračunali izmerjeno vrednost iz pogojev dejanske, izmerjene, na delovno temperaturo 40° in tlak 160 bar. Pred začetkom trajnostnega testa je notranje puščanje novega vodnega ventila znašalo 0,0366 l/min.

Predhodno smo omenili meritve notranjega puščanja na novem oljnem proporcionalnem potnem ventilu. Izmerjeno vrednost notranjega puščanja smo preračunali na tlak 160 bar in temperaturo 50 °C in dobili notranje puščanje 0,07 l/min (črtkana črta na sl. 7), kar je za ca. 2-krat več kot pri novem vodnem proporcionalnem potnem ventilu pred začetkom trajnostnega testa pri njegovih delovnih pogojih. Ker trajnostnega testa nismo izvajali tudi za oljni proporcionalni potni ventil, smo zanj predpostavili splošno znano povprečno sprejemljivo obrabo za



tovrstne oljne ventile. Za omenjeni oljni ventil smo predpostavili enakomerno obrabo za skupaj 3  $\mu\text{m}$  skozi celoten trajnostni test – 10 milijonov preklpov. Za to predpostavljeno enakomerno povečanje reže oljnega ventila smo preračunali notranje puščanje (pri izsredni legi bata) in ga narisali v diagram na sliki 7.

Vsi prikazani rezultati meritev notranjega puščanja so podani kot povprečna vrednost treh meritev po preračunu na enake pogoje, to je na tlak 160 bar in delovno temperaturo vode 40 °C. Ob začetku trajnostnega testa smo meritev notranjega puščanja vodnega proporcionalnega potnega ventila ponavljali v krajših časovnih obdobjih, nato smo to obdobje med meritvami podaljšali. Prvič smo prekinili trajnostni test že po ca. 34.000 preklpovih, kar pri frekvenci preklapljanja 5 Hz pomeni slabi dve uri neprekinjenega obratovanja. Pri tem je notranje puščanje naraslo na 0,049 l/min. Rezultati vseh nadaljnih vmesnih meritev notranjega puščanja so podani na sliki 7. Ob skupnih ca. 2,365 milijonih preklpov smo prvič prekoračili količino notranjega puščanja pri novem primerjanem oljnem ventilu, to je vrednost 0,07 l/min. Vrednost notranjega puščanja (zadnja točka na desni na diagramu na sl. 7) sedaj znaša 0,0843 l/min, kar je od začetka meritev največ.



**Slika 7:** Izmerjeno notranje puščanje vodnega proporcionalnega potnega ventila do 2,4 milijona preklpov, v odvisnosti od števila preklpov in notranje puščanje novega oljnega ventila z upoštevanim povprečnim povečanjem  
(tlak = 160 bar, pretok = 20 l/min, frekv. = 5 Hz,  $T_{vode}$  = 40 °C,  $T_{olja}$  = 50 °C)

## 4. Diskusija

Pri **primerjavah velikosti pomikov batnic hidravličnih valjev (HV)** med oljnim in vodnim preizkuševališčem ugotavljamo, da se velikosti pomikov ne glede na meritve pri različnih parametrih zelo malo razlikujejo. Odstopki v pomikih batnice HV med oljnim in vodnim preizkuševališčem so med  $-2$  in  $+6$  %, odvisno od lege in obremenitve hidravličnega valja. Negativni odstopki pomeni krajši gib batnice vodnega HV, medtem ko pozitivni pomeni daljši gib batnice vodnega hidravličnega valja, ki ga primerjamo z gibom oljnega. Tako odstopanje, do  $6$  % daljši giba batnice vodnega HV, je posledica različnih stisljivosti kapljev. Voda je za približno  $70$  % manj stisljiva (razmerje koeficientov stisljivosti:  $2,4/1,4$ ) kot mineralno hidravlično olje, tako se batnica vodnega HV bolj odziva kot batnica oljnega HV. Če povzamemo, je sledenje batnice vodnega HV popolnoma primerljivo sledenju batnice oljnega HV, kar nam v primeru tega parametra potrjuje možnost uporabe vode kot hidravlične kapljevine.

**Primerjava potrebnih delovnih tlakov za speljevanje batnice HV** med oljnim in vodnim preizkuševališčem nam pove, da je pri speljevanju batnice vodnega HV glede na rezultate meritev z oljnega in vodnega preizkuševališča potreben do približno  $20$  % višji tlak kot pri speljevanju batnice oljnega HV. To je razumljivo, saj je trenje pri oljnem HV precej nižje od trenja pri vodnem HV. To je še toliko bolj razumljivo ob upoštevanju dejstev, da smo pri konstruiranju obeh HV uporabili enaka tesnila in podobne drsne površine (podobna hrapavost cevi in batnice HV). Kljub do  $20$  % višjemu potrebnemu tlaku za speljevanje pri vodnem HV ugotavljamo, da je ob upoštevanju razlik v parametrih, potrebnih za speljevanje, med vodnim in oljnim HV, voda sprejemljiva kot hidravlična kapljevina.

Razlike **potrebnih delovnih tlakov za konstantno gibanje batnice HV** med oljnim in vodnim preizkuševališčem so v največji meri odvisne od večjega trenja znotraj vodnega hidravličnega valja. Dokaz za to so za okoli  $20$  bar višji delovni tlaki v vodnem hidravličnem sistemu od delovnih tlakov na enakem oljnem hidravličnem sistemu pri enakih obremenitvah. Tako lahko sklenemo, da so potrebni delovni tlaki za konstantno gibanje batnice HV v vodni hidravliki kljub višjim vrednostim kot pri oljni sprejemljivi in dovoljujejo nadaljnje delo na tem področju ter ne zavirajo nadaljnjega razvoja vodne hidravlike. Kljub vsemu pa je jasno, da bo v prihodnje potrebno še veliko storiti za zmanjšanje trenja tesnil znotraj vodnega HV.

**Obraba in trajnost:** Po 2,4 milijonih prekrmljenj preizkušane vodnega proporcionalnega potnega ventila pri delovnem tlaku 120 bar in pretoku 20 l/min, krmilni frekvenci 5 Hz pri 100-odstotnem krmilnem signalu ter uporabi nerjavnega jekla za krmilni bat in pušo ugotovljamo, da je ta izbrani tribološki par popolnoma primeren za doseg pričakovane uporabne dobe drsnih sestavin vodne pogonsko-krmilne hidravlike pri podobnih obremenitvah. Med samim izvajanjem trajnostnega testa smo ugotavljali tudi pomembnost kvalitetnega filtriranja vode kot hidravlične kapljevine. Ena pomembnejših ugotovitev trajnostnega testa je, da je za dolgotrajnost delovanja sestavin vodne hidravlike (predvsem tistih, ki so drsniškega tipa in imajo ozke reže med dvema relativno gibajočima se deloma) potreben visok nivo čistoče vode. Posebej skrbno moramo paziti, da ne prihaja do vsebnosti trdih delcev. Pri filtriranju je prednost vode v nizki viskoznosti ter relativno majhnih molekulah v primerjavi z mineralnim oljem. To vpliva na dobro sposobnost filtriranja vode, zato vodo lažje filtriramo tudi pod 2  $\mu\text{m}$ . Med trajnostnim testom so se med vodnim krmilnim batom in pušo v drsnem kontaktu pojavile: dvo- in trotelesna abrazija, erozija robu in kavitacija. Omenjene obrabe po končanem trajnostnem testu niso presegale nivoja, od katerega ventil ne bi bil več uporaben, kar smo dokazali z relativno majhno porabo energije zaradi povečanega notranjega puščanja.

## 5. Zaključki

1. Preliminarni tribološki modelni testi različnih materialnih parov v kopeli destilirane vode so pokazali, da je od preizkušenih materialov najbolj primeren materialni par PEEK CA30/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vendar smo se odločili, da za prvi testirani materialni par v drsnem kontaktu znotraj vodnega proporcionalnega potnega ventila, za bat in pušo izberemo nerjavno jeklo.
2. Številne meritve in primerjave delovnih parametrov med vodno in analogno oljno hidravliko so pokazale, da vodna hidravlika v splošnem funkcionira in je s sprejemljivimi odstopki delovnih parametrov podobna delovnim parametrom oljne hidravlike.
3. Trajnostni test novega vodnega proporcionalnega potnega ventila pri uporabi krmilnega bata in puše iz kaljenega nerjavnega jekla je pokazal, da je obraba znotraj sprejemljivih meja. Ugotovljeno je bilo tudi, da je v vodni hidravliki potrebno kvalitetno filtriranje s filtrskimi vložki, ki imajo nazivno vrednost filtriranja 2 $\mu\text{m}$  ali manj.

Vodna hidravlika ima torej vse možnosti, da se ob večji razvojni volji in naravovarstveni zavesti uveljavi in s tem pripomore k čistejši prihodnosti.

## 6. Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Slovenski raziskovalni agenciji (ARRS), ki je finančno podprla ta projekt (št. proj.: L2-9407, l.2006 ). Avtorji smo iskreno hvaležni tudi podjetju TAJFUN Planina d.o.o. za sofinanciranje tega projekta. Večino sestavin oljnega dela preizkuševališča je prispevalo podjetje Kaldivar Žiri d.d., polovico vseh potrebnih gibkih cevi je prispevalo podjetje HIB Kranj, hidravlično mineralno olje v oljnem delu preizkuševališča pa je prispevalo podjetje OLMA d.d.. Vsem omenjenim se zahvaljujemo za pomoč.

## 7. Literatura

- [1] M. Kalin, F. Majdič, J. Vižintin, J. Pezdirnik, I. Velkavrh, Analyses of the Long-Term Performance And Tribological Behaviour of an Axial Piston Pump Using Dimond-like-Carbon-Coated piston Shoes and Biodegradable Oil, *Journal of Tribology*, 2008, vol. 130.
- [2] M. Kalin, F. Majdič, J. Vižintin, J. Pezdirnik. Performance of axial piston pump using DLC-coated piston shoes and biodegradable oil. in: *The 12th Nordic Symposium on Tribology*, Helsingor, Denmark, June 7-9, 2006. Nordtrib 2006. (2006), 10 Pgs.
- [3] M. Kalin, J. Vižintin, A comparison of the tribological behaviour of steel/steel, steel/DLC and DLC/DLC contact when lubricated with mineral and biodegradable oils. *Wear* 261 [1] (2006)
- [4] J. Barriga, M. Kalin, K. Van Acker, K. Vercammen, A. Ortega, L. Leiaristi. Tribological performance of titanium doped and pure DLC coatings combined with a synthetic bio-lubricant. *Wear* 261, (2006) 9-14.
- [5] M. Kalin, J. Vižintin, Vercammen, K., Arnšek, A., Barriga, J., Van Acker, K. Tribological performance of lubricated DLC coatings using biodegradable oils. *The coatings in Manufacturing Engineering* (2004) 457-465.
- [6] J. Barriga, M. Kalin, K. Van Acker, K. Vercammen, A. Ortega, L. Leiaristi. Tribological characterisation and validation of carbon based coatings combined with bio-lubricants. *Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Tribology*. Norway, June 2004. Pg. 508-517.
- [7] Wolfgang Backe, Water- or oil-hydraulics in the future, SICFP'99, May 26-28, 1999, Tampere, Finland, Pg. 51 - 65
- [8] E. Trostmann: *Water hydraulics control technology*; Lyngby 1996, Tech. Univ. Denmark
- [9] F. Majdič, J. Pezdirnik, M. Kalin, Comparative tribological investigations of continuous control valves for water hydraulics, *The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07*, May 21-23, 2007, Tampere, Finland
- [10] F. Majdič, J. Pezdirnik, M. Kalin, An analytical comparison of hydraulic systems based on water and on oil, *7th JFPS Inter. Symposium on Fluid Power – Toyama –Japan*, 15. Sept. 2008
- [11] F. Majdič, J. Pezdirnik, Advances in water power-control hydraulics experimental research, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 54(2008)12, 841-849
- [12] F. Majdič, J. Pezdirnik, Oil- and water-based continuous control valve, *Industrial Lubrication and Tribology*, Volume 62 · Number 3 · 2010 · 136–143
- [13] Majdič F.: *Voda kot hidravlična kapljevina*, doktorska disertacija, 2010, Ljubljana
- [14] Yamamoto, Y., Takashima, T.: Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts, *Wear* 253 (2002) 820–826.
- [15] Yamamoto, Y., Takashima, T.: Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts Part 2. Composites with carbon or glass fibre, *Wear* 253 (2002) 820–826.
- [16] Davim, J. P., Marques, N., Baptista, A. M.: Effect of carbon fibre reinforcement in the frictional behaviour of Peek in a water lubricated environment, *Wear* 251 (2001) 1100–1104.