

## Razvoj vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila

**Franc Majdič**

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

**Jožef Pezdernik**

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

### ***Povzetek***

*Varovanje okolja postaja vedno pomembnejše. Glede tega je na področju hidravlike pitna voda brez dodatkov ena izmed najboljših alternativ za zamenjavo doslej najbolj uporabljanih hidravličnih kapljev. Zamenjava ekološko spornih kapljev je priporočljiva in v prihodnosti verjetno nujna predvsem na občutljivih področjih, kot so področja zajetij pitne vode, prehrambena industrija, itd.*

*Prispevek prikazuje razvoj novega vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila drsniškega tipa ter dvojnega preizkuševališča za njegovo testiranje in istočasno testiranje sistema pogonsko-krmilne hidravlike delujočega s pitno vodo kot hidravlično kapljevino.*

*V prispevku je predstavljenih nekaj ključnih rezultatov meritev prehodnih pojavov ter rezultat trajnostnega testa navedenega vodnega proporcionalnega potnega ventila. Sledi analiza rezultatov preizkusov na vodnem delu preizkuševališča ter primerjava teh z rezultati dobljenimi ob izvajanju preizkusov na funkcionalno analognem oljnem delu hidravličnega preizkuševališča.*

*Rezultati kažejo, da je uporaba novega vodnega zvezno delujočega proporcionalnega potnega ventila v realnih aplikacijah možna in da sistemi pogonsko-krmilne hidravlike, delujoči s pitno vodo kot hidravlično tekočino lahko opravljajo svoje funkcije analogno velikemu delu sistemov oljne hidravlike.*

## **1. Uvod**

Voda je bila prva uporabljana hidravlična kapljevina že pred več kot 2.000 leti. Področje vodne hidravlike, v smislu uporabe čiste vode brez dodatkov, za industrijsko rabo se je začelo uveljavljati s patentom prve hidravlične stiskalnice pred 214 leti [1]. V naslednjem stoletju se je uporaba vode kot hidravlične kapljevine naglo širila. Pri tem so se pojavljali številni problemi povezani predvsem s slabo mazalnostjo, posledično povečano obrabo in velikim notranjim puščanjem ter korozijo znotraj hidravličnih sestavin. Leta 1906 je Janney prvi razvil oljno hidravlični sistem z aksialno batno črpalko. Mineralno hidravlično olje je zaradi številnih prednosti, ki jih je ponujalo, skoraj popolnoma zamenjalo vodo. Čista voda, kot hidravlični medij, se od tega obdobja uveljavljanja mineralnega hidravličnega olja, pa vse do devetdesetih let prejšnjega stoletja, skoraj ni več uporabljala. Razlog za to so bile vsa ta desetletja protežirane, odlične lastnosti mineralnega olja, ki so vplivale na izrazito zmanjšano obrabo in preprečevanje korozije mehanskih sestavin. Z manjšim notranjem puščanjem in trenjem je mineralno olje vplivalo tudi na povečanje izkoristkov.

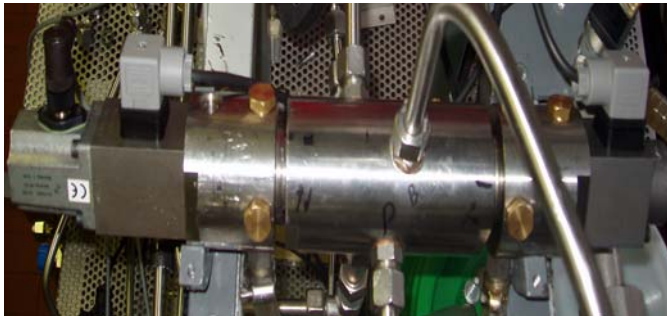
Ekologija je dandanes ena pomembnejših tem raznih znanstveno strokovnih, pa tudi družbeno – političnih srečanj in sestankov po celem, predvsem razvitem, svetu in vedno bolj tudi pri nas. Od leta 1997 pa vse do danes se letno v državah EU v povprečju porabi okoli pet milijonov ton maziv [2]. Sem štejejo tudi hidravlične kapljevine. Večino maziv oz. kapljev in je fosilnega izvora, ki so v naravnem okolju težko razgradljiva in toksična. V številnih državah je že sprejeta množica zakonskih aktov, smernic in odredb o ravnanju s svežimi in odpadnimi olji, vedno več pa je tudi zahtev za uporabo ekološko manj nevarnih maziv oz. kapljev in. Uvajanje in uporaba čiste, pitne vode, namesto ekološko spornih kapljev in, je ena izmed boljših rešitev za zaščito naravnega okolja na področju pogonsko-krmilne hidravlike.

Dandanes je uporaba vode kot hidravlične kapljevine v pogonsko-krmilni hidravliki še vedno zelo zanemarljiva [3]. Med razlogi za majhno uporabo vode kot hidravlične kapljevine so: malo na tržišču dostopnih sestavin, majhno število izdelovalcev takih sestavin (majhna konkurenca), prenizka ekološka osveščenost uporabnikov (predvsem investitorjev), dražje surovine za izdelavo sestavin, visoka cena sestavin itd.

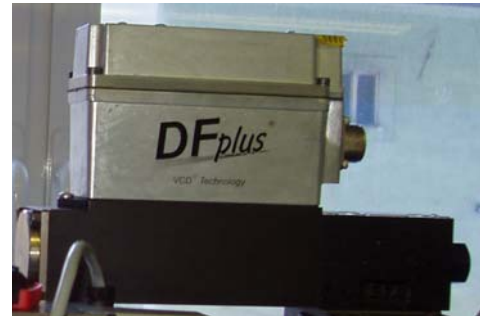
Eden izmed prej omenjenih vzrokov za majhno uporabo vodne hidravlike je tudi premalo na tržišču dostopnih sestavin. Nujno potrebne, manjkajoče sestavine v vodni hidravliki so: zvezno delujoči ventili (predvsem proporcionalni in servo ventili), črpalke s spremenljivo iztislino, itd. Zato smo se mi odločili za razvoj novega vodnega 4/3 proporcionalnega potnega ventila drsniškega tipa. Poleg razvoja ventila pa je bilo zasnovano in izdelano dvojno, vodno in primerljivo oljno, hidravlično preizkuševališče za testiranje omenjenega ventila. Ventil smo testirali na stacionarno in dinamično delovanje ter trajnost. Na omenjenem preizkuševališču smo primerjali tudi dinamično obnašanje vodnega sistema in ga primerjali z obnašanjem analognega, poznanega, oljnega sistema.

## 2. Nov vodni 4/3 proporcionalni potni ventil

Cilj je bil razviti razmeroma enostaven vodni proporcionalni potni ventil drsniškega tipa s čim manjšim številom sestavnih delov (sl. 1.a) in ga primerjati s funkcionalno analognim standardnim oljnim ventilom (sl. 1.b).



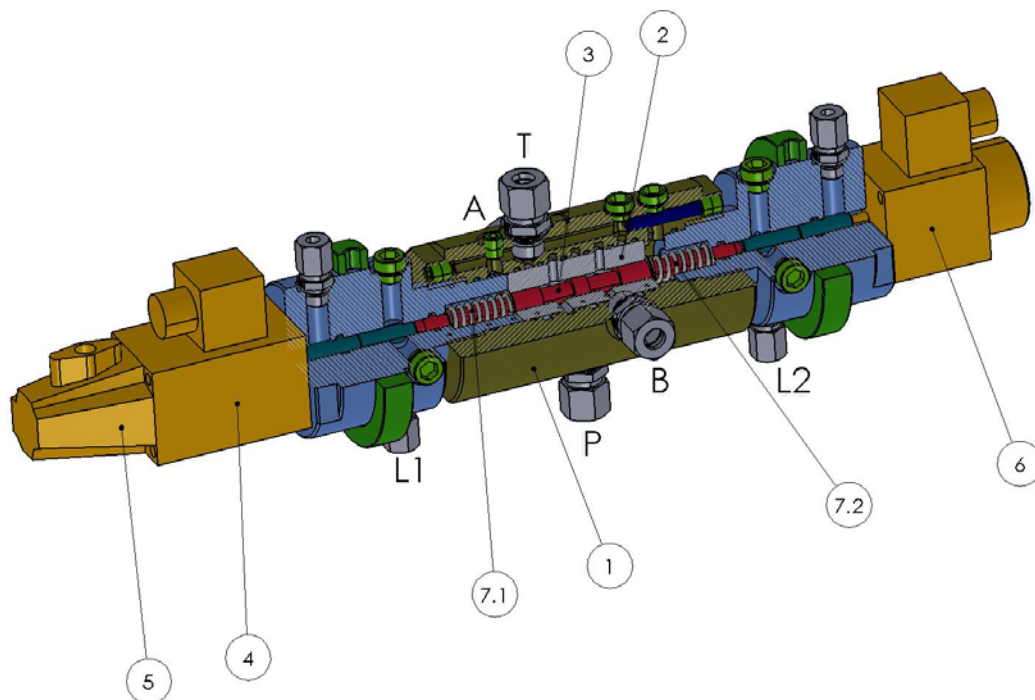
a.)



b.)

Slika 1: 4/3 proporcionalna potna ventila, a.) na novo razvit vodni proporcionalni potni ventil (vodni preizkušane), b.) serijsko izdelan oljni proporcionalni potni ventil (oljni preizkušane)

Slika 2 prikazuje vodni proporcionalni 4/3 potni ventil v prerezu. Funkcionalno pomembnejši sestavni deli ventila so: glavno ohišje (poz. 1), drsna puša (poz. 2), krmilni bat (poz. 3), levi enosmerni proporcionalni električni magnet namenjen za vgradnjo LVDT-ja (poz. 4), merilnik položaja krmilnega bata (LVDT) (poz. 5), desni enosmerni proporcionalni električni magnet 24 V, podoben levemu, le da je ta končni in ni namenjen za vgradnjo LVDT-ja (poz. 6) ter dve tlačni vzmeti (poz. 7.1 in 7.2) usklajeni z močjo proporcionalnih elektromagnetov.



Slika 2: Prototip novega vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila, drsniškega tipa

Glavna sestavna dela – elementa v novem vodnem proporcionalnem 4/3 potnem ventilu sta krmilni bat in puša (sl. 3). Reža, ki tvori ohlap med krmilnim batom in pušo, preizkušanim materialnim parom testiranem v tej raziskavi, je reda velikosti nekaj mikrometrov.



Slika 3: Krmilni bat in puša vodnega 4/3 proporcionalnega potnega ventila

V predstavljeni raziskavi smo testirali vodni proporcionalni potni ventil z batom in pušo iz nerjavnega jekla. Ta materialni par smo predhodno preverili tudi na tribološkem testu [4].

### **3. Preizkuševališča in postopki preizkušanja**

#### **3.1. Preizkuševališče**

Za namen teh raziskav smo zasnovali in izdelali dvojno, vodno in oljno preizkuševališče. Vsako od obeh preizkuševališč je sestavljeno iz pogonskega agregata in dveh modulov. Prvi je modul za prehodne pojave in stacionarne parametre, drugi pa je modul za izvedbo trajnostnih testov. Pri raziskavah dinamičnega obnašanja in stacionarnih parametrov smo uporabili hidravlični agregat in modul za prehodne pojave ter stacionarne parametre, pri raziskavah trajnosti novega proporcionalnega ventila in celotnega vodnega sistema pa hidravlični agregat in modul za trajnostne teste. V nadaljevanju bomo predstavili le vodno preizkuševališče, oljno je funkcionalno analogno.

##### **3.1.1. Vodni hidravlični agregat**

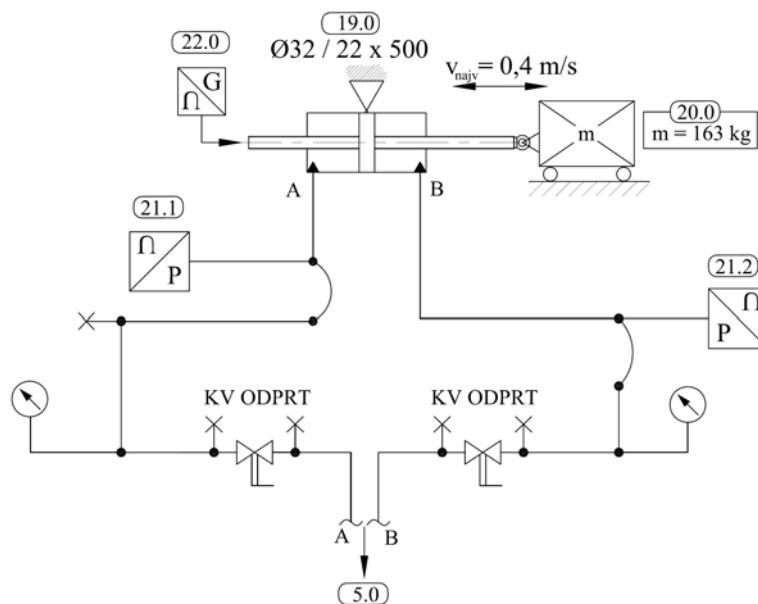
Glavne sestavine vodnega hidravličnega agregata, razvidno iz hidravlične funkcijske sheme za vodno preizkuševališče (sl. 4) so: rezervoar za vodo (poz. 1), aksialna batna črpalka (poz. 2), protipovratni ventil (poz. 3), varnostni ventil za nastavitev tlakov med 70 in 160 bar (poz. 4), preizkušanelec – na novo razvit vodni proporcionalni 4/3 potni ventil (poz. 5), dve tlačni zaznavali (poz. 6 in 7), tokovni ventil s tlačno kompenzacijo (poz. 8), razbremenilni potni 2/2 ventil (poz. 9) za lažji, "mehak" zagon pogonskega elektromotorja (poz. 10). Visokotlačna



Hlajenje vode, kot delovnega hidravličnega medija, je zagotovljeno preko nizkotlačne centrifugalne obtočne črpalke (poz. 11), ki sesa vodo iz glavnega vodnega rezervoarja (poz. 1) in jo preko cevnega toplotnega izmenjevalca (poz. 12) in obtočnega filtra (poz. 13) vrača ohlajeno in očiščeno v glavni vodni rezervoar. Na drugi strani izmenjevalca je ločen hidravlični krogotok, v katerem je tudi rezervoar (poz. 14) za vodni glikol. Centrifugalna obtočna črpalka (poz. 15) sesa vodni glikol v manjši meri iz rezervoarja (poz. 14), večji del pretoka vodnega glikola pa dobi nazaj iz zaprtega krogotoka v katerem ga preko cevnega toplotnega izmenjevalca (poz. 12) potiska po ceveh na zunanjo stran prostora laboratorija skozi zračni hladilnik z zračnim ventilatorjem in pogonskim elektro motorjem 0,55 kW (poz. 16). Iz zračnega hladilnika se ohlajen glikol vrača skozi cevni izmenjevalnik toplote. Ta hidravlični krogotok je zaprt, rezervoar (poz. 14) služi le za rezervo in za dodaten prostor zaradi temperaturnega raztezanja vodnega glikola. Četrta črpalka na vodnem hidravličnem agregatu je centrifugalna, potopne izvedbe, z dvojnimi plovcem za samodejni vklop in izklop črpanja (poz. 17). Ta črpalka je nameščena ločeno v PVC rezervoarju (poz. 18), kateri je nameščen pod vodni proporcionalni 4/3 potni ventil, da se vanj pod prostim padom lahko izteka morebitno nastalo notranje puščanje vode v ventilu.

### **3.1.2. Modul za prehodne pojave in stacionarne parametre**

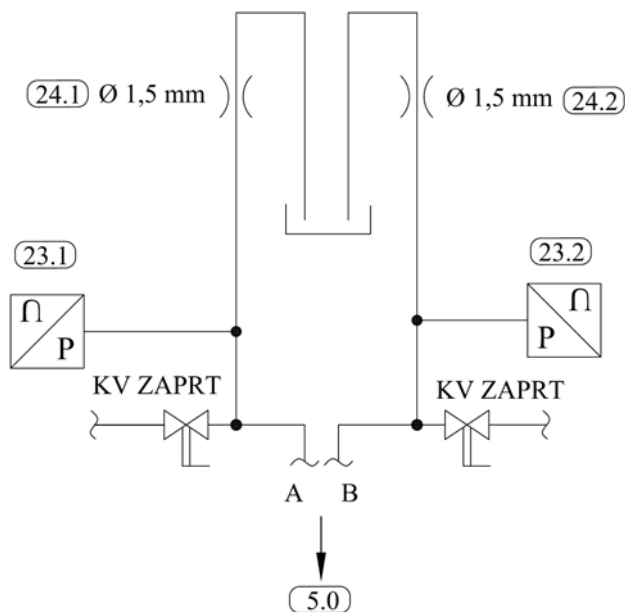
Za merjenje prehodnih pojavov smo uporabili osnovni del vodnega preizkuševališča (sl. 4) ter dodatni del z oznako modul za prehodne pojave in stacionarne parametre (sl. 5). Ta del hidravličnega sistema namenjenega merjenju prehodnih pojavov, se preko cevi z oznakama A in B priključi na A in B voda proporcionalnega 4/3 potnega ventila (sl. 4, zgoraj levo poz. 5). Modul za prehodne pojave in stacionarne parametre sestavljajo: dvostransko delujoči hidravlični valj z obojestransko batnico  $\Phi 32/22 \times 500$  (poz. 19), na batnico hidravličnega valja preko zglobov pritrjena vodena utež z maso 163 kg (poz. 20), dve tlačni zaznavali (poz. 21.1 in 21.2, merilnik položaja batnice v hidravličnem valju (poz. 22). V tem delu sta vključena tudi dva analogna manometra in dva visokotlačna krogelna ventila s po dvema cevima T-kosoma. Pretežni del sestavin za meritve prehodnih pojavov je montiranih na posebnem vozičku, kjer so vodene uteži. Vodilo uteži skupaj z utežmi lahko postavimo v horizontalni ali vertikalni položaj. Večina sestavin v shemi modula za prehodne pojave in stacionarne parametre je iz standardnih, na tržišču razpoložljivih vodnih hidravličnih sestavin, razen hidravličnega valja, ki je bil zasnovan in skonstruiran v Laboratoriju za pogonsko-krmilno hidravliko (LPKH). Cev vodnega hidravličnega valja je iz nerjavečega jekla, batnici sta iz trdo-kromiranega jekla. Tesnila in vodilni obroči za vodni in oljni hidravlični valj so enaka; izdelana so iz nitritne gume in poliuretana ojačanega z vlakni.



Slika 5: Funkcijska shema modula za prehodne pojave in stacionarne parametre

### 3.1.3. Modul za trajnostne teste

Za izvedbo trajnostnih testov smo na priključka A in B proporcionalnega vodnega 4/3 potnega ventila (preizkušane) priključili modul za trajnostne teste (sl. 6). Ta del sheme, oziroma sistema, sestavljajo: dve tlačni zaznavali (poz. 23.1 in 23.2) ter dve dušilki z izvrtino  $\Phi 1,5$  mm (poz. 24.1 in 24.2) in ostala pomožna oprema. Skozi posamezni dušilki smo pri tlaku ca. 120 barov zagotavljali pretok okoli 20 l/min. S tem smo poskrbeli, da je bil trajnostni test čim bližje ekstremnim razmeram v industriji.



Slika 6: Funkcijska shema modula za trajnostne teste

Vodno (sl. 4) in oljno hidravlično preizkuševališče sta sestavljeni iz standardnih, na tržišču razpoložljivih hidravličnih sestavin, razen novo razvitega vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila in hidravličnih valjev, ki so bili zasnovani in skonstruirani v našem laboratoriju. Na sliki 7 je prikazano celotno, dvojno, vodno (levo) in oljno (desno) preizkuševališče .



Slika 7: Dvojno, vodno (levo) in oljno (desno) preizkuševališče

## **3.2. Postopki preizkušanja**

### **3.2.1. Postopek meritev prehodnih pojavov in stacionarnih parametrov**

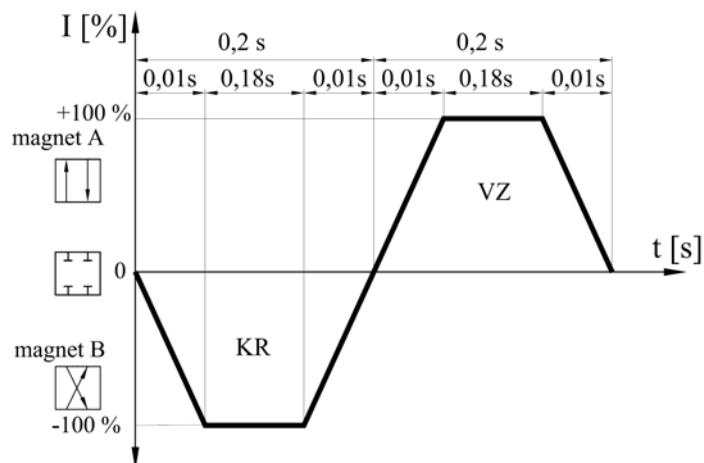
Meritve za določitev stacionarnih parametrov in parametrov prehodnih pojavov smo izvedli po sledečem postopku:

1. Nastavitev tlaka varnostnega ventila (na vodnem preizkuševališču, poz. 4 na sl. 4 in podobno na oljnem preizkuševališču) na 160 bar.
2. Nastavitev pretoka skozi tokovni ventil s tlačno kompenzacijo (na vodnem preizkuševališču, sl. 4, poz. 8 in podobno na oljnem) na 33 l/min.
3. Nastavitev ustrezne horizontalne lege hidravličnega valja in pritrditev vodene uteži mase 163 kg.
4. Vnos časovnih konstant za določitev krmilnega signala S1 (po sliki 8) v programu za dinamične meritve.
5. Samodejna izvedba meritev po pritisku na gumb "Meritve START". Batnica pri meritvi potisne utež najprej proti desni, nato pa se, ob preklopu ventila iz križnega v



vzporedni položaj, batnica z utežjo vrne nazaj proti izhodiščni legi. Po izteku krmilnega signala S1 se batnica ustavi.

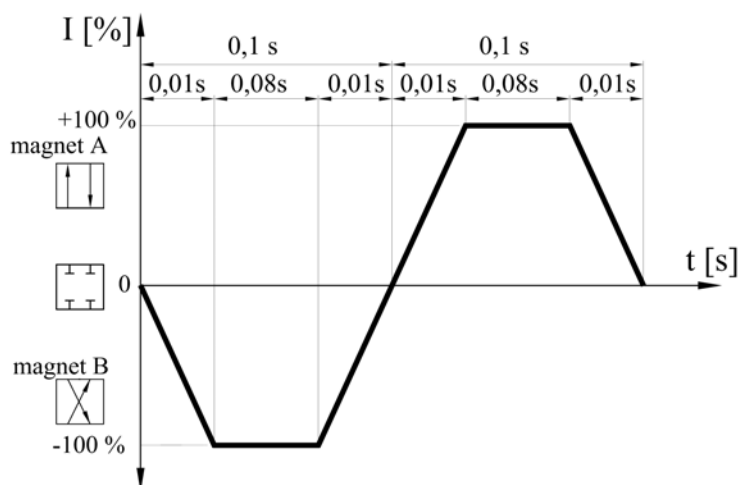
6. V programu za meritve prehodnih pojavov se določi še ime in lokacija datoteke, kamor shranimo podatke posamezne meritve.
7. Ponovitev vsake meritve (še 2 krat).



Slika 8: Oblika vhodnega, koračnega krmilnega signala (S1)

### 3.2.2. Postopek izvedbe trajnostnega testa

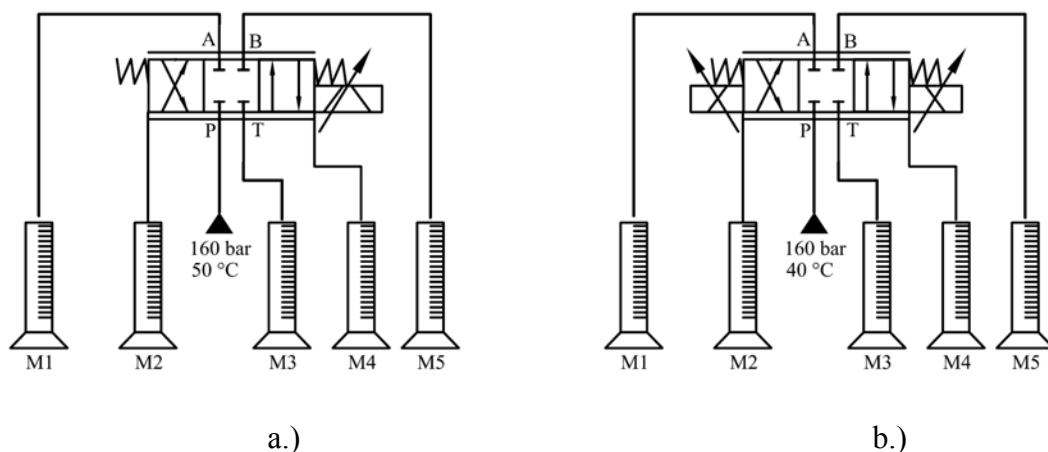
Preklopi so bili izvedeni s ponavljajočimi popolnimi preklopi (- 100% signal) v križni in takojšnjimi popolnimi preklopi (+ 100%) v vzporedni položaj. Za krmiljenje ventila smo uporabili signal S3 prikazan na sliki 9. Testirali smo s frekvenco 5 Hz (5 celotnih preklapov krmilnega bata na sekundo). Ves čas smo merili vse štiri tlake (P, T, A in B), temperaturo in pomikanje krmilnega batka v ventilu. Temperatura je se je med celotnim trajnostnim testom nahajala med 30 in 35 °C. Za breme na delovnih A in B priključkih smo uporabili dve enaki dušilki s premerom izvrtine 1,5 mm.



Slika 9: Vhodni krmilni signal S3 s časovnimi vrednostmi za frekvenco 5 Hz za testiranje trajnosti vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila

## Intervalno merjenje notranjega puščanja

Verjetno najboljši pokazatelj obstojnosti oziroma obrabe ventila pri dolgotrajnejši uporabi je merjenje notranjega puščanja. Slika 10 prikazuje merjenje notranjega puščanja s pomočjo merilnih valjev in štoparice. Po določenem obdobju trajnostnega testa (običajno vsaj 1x dnevno) smo prekinili trajnostni test, na priključke A, B in T preizkušane ventila (poz. 5 na sl. 4) namesto obstoječih povezovalnih nerjavnih jeklenih hidravličnih cevi modula za trajnostne teste (po shemi na sl. 6) namestili prozorne gibke cevi ter spodaj postavili merilne valje (sl. 10). Po vzpostavitvi tlaka na P priključku smo vključili štoparico. Krmilni bat je ves čas med meritvijo notranjega puščanja ostal v ničelnem položaju, v srednji legi. Po času 5 minut oz. ko se je eden od merilnih valjev napolnil, smo meritev ustavili. Zabeležili smo količino kapljevine, ki se je v tem obdobju natekla v posamezne merilne valje. Ker je tlačni priključek P konstrukcijsko na sredini ventila, tj. med A in B priključkoma, se je med meritvami notranjega puščanja natekla voda le na merilna valja, ki sta zbirala vodo, ki je posledica notranjega puščanja na A in B priključkih. Med meritvijo notranjega puščanja smo stalno opazovali spremembo tlaka in temperature.



Slika 10: Merilna mesta za merjenje notranjega puščanja na: a.) oljnem proporcionalnem potnem ventilu in b.) vodnem proporcionalnem potnem ventilu

## 4. Rezultati

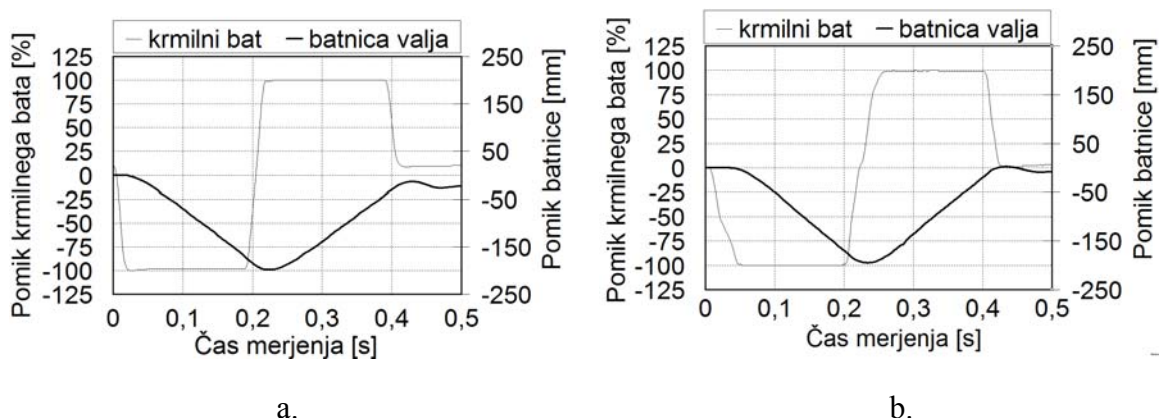
### 4.1. Prehodni pojavi in stacionarni parametri

Glede na opravljene meritve po predhodno opisanem postopku (poglavje 3.2.1) pri pretoku 33 l/min in tlaku 160 bar ter obremenjenem hidravličnem valju v horizontalnem položaju smo na vodnem in oljnem preizkuševališču izmerili več parametrov. V tem prispevku bomo primerjalno predstavili rezultate: meritev pomika batnice hidravličnega valja, meritev delovnih tlakov in meritev hidravličnega udara pri zaustavitvi uteži.

#### 4.1.1. Pomik batnice hidravličnega valja

Izmerjeni pomik obremenjene batnice oljnega hidravličnega valja z utežjo v horizontalnem položaju (sl. 11.a) je pri gibu levo po sliki 5 znašal 198 mm (levi del nagnjene krivulje *sHV*), kar je za 23 mm več kot znaša gib batnice nazaj (desni del nagnjene krivulje). To je izmerjena razlika po iznihanju batnice – po končanem hidravličnem udaru. Obremenjena batnica oljnega hidravličnega valja v horizontalnem položaju se torej pri simetričnem vhodnem krmilnem signalu oljnega proporcionalnega potnega ventila S1 ni več vrnila v začetno stanje. Ustavila se je za 23 mm pred ničelnim položajem, kar pomeni za približno 12 % nesimetričen gib batnice pri simetričnem vhodnem krmilnem signalu.

Slika 11.b prikazuje pomik obremenjene batnice vodnega hidravličnega valja pri podobnih pogojih kot pri prejšnjem oljnem preizkuševališču. Izmerjeni pomik obremenjene batnice vodnega hidravličnega valja znaša 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 naprej od lege pred začetkom merite, kar pomeni nesimetričnost pomika za približno 4% od celotnega giba.



Slika 11: Meritev pomika batnice hidravličnega valja in krmilnega bata v odvisnosti od časa za (a) olje, (b) vodo

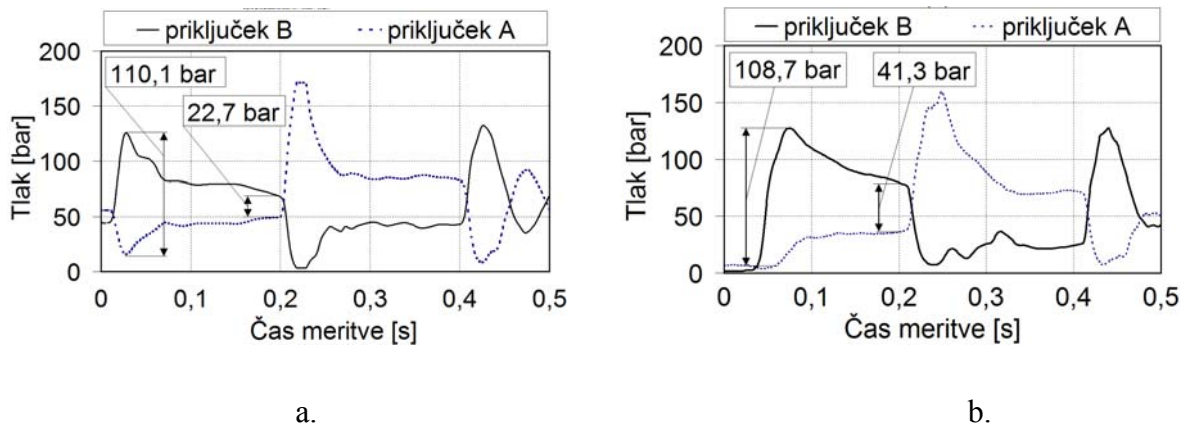
(pretok = 33 l/min, tlak = 160 bar, masa = 163 kg horizontalno, koračni signal S1)

#### 4.1.2. Meritve delovnih tlakov

Meritve tlakov na A in B priključkih (sl. 12) 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 oz. iz hidravličnega valja. Linijskih in lokalnih izgub med tema dvema merilnima mestoma ni veliko, saj sta bili tlačni zaznavali montirani tik pred in za hidravličnim valjem in jih lahko zanemarimo.

Na sliki 12.a je prikazana meritev tlakov na A in B priključku ob oljnem hidravličnem valju. Razvidno je, da je razlika tlakov, potrebna za speljevanje uteži enaka, 110,1 bar. Pri gibanju uteži s konstantno hitrostjo pa znaša razlika tlakov med B in A priključkoma 22,7 bar.

Na vodnem preizkuševališču (sl. 12 .b) znaša potrebna razlika tlakov za speljevanje enake uteži kot pri oljnem preizkuševališču 108,7 bar. To je za 1,3 % manj kot pri oljnem preizkuševališču. Razlika tlakov potrebna za gibanje uteži pri konstantni hitrosti pa je za vodno preizkuševališče 41,3 bar, kar je za 82 % več kot pri enakih pogojih pri oljnem preizkuševališču.



Slika 12: Meritev tlaka na A in B priključkih ventila, tik pred in za hidravličnim valjem, v odvisnosti od časa, za: a.) olje, b.) vodo.

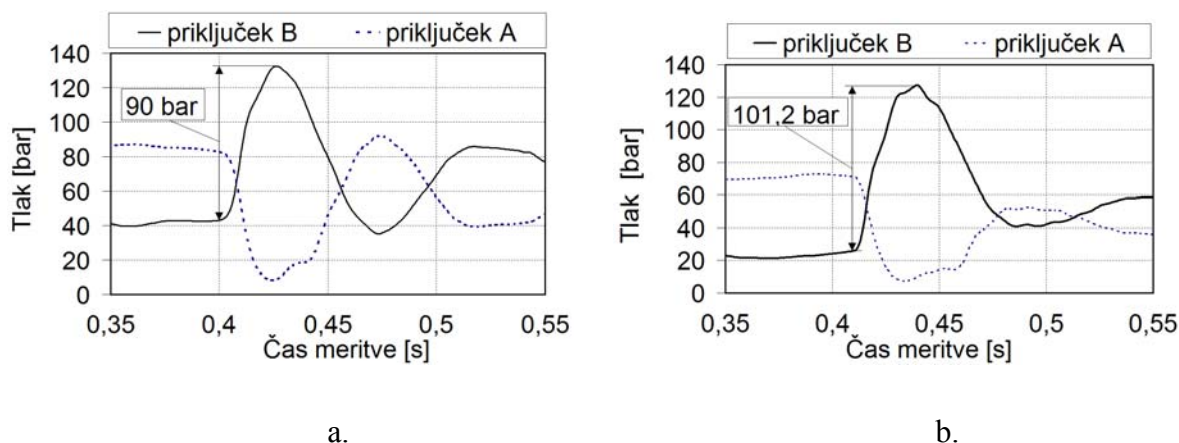
(pretok = 33 l/min, tlak = 160 bar, masa = 163 kg horizontalno, koračni signal S1)

#### 4.1.3. Meritve parametrov hidravličnega udara

Slika 13 prikazuje povečan detajl meritve spremembe tlakov na A in B priključku pri hidravličnem udaru ob zaprtju ventila iz vzporednega v blokirani, ničelni položaj (sl. 4). Prikazana je meritev (sl. 13) za čas od 0,35 pa do 0,55 s od začetka meritve, ko se je iz stacionarnega gibanja batnice nazaj (vzporedni položaj prop. potnega ventila) ventil zaprl in nastal je hidravlični udar, predvsem zaradi zaustavitve gibajoče se uteži, pa tudi stebra kapljevine v ceveh. Porast tlaka pri hidravličnem udaru smo merili glede na predhodno stacionarno stanje. To izmerjeno stacionarno stanje tlaka na B priključku je v tem primeru odvisno od vseh linijskih in lokalnih izgub od tlačnega zaznavala na B priključku pa do rezervoarja.

Predhodno stacionarno absolutno stanje tlaka na B priključku oljnega preizkuševališča (sl.13.a) pred pojavom hidravličnega udara je bilo približno 43 bar, ob izklopu elektromagnetnega ventila poz. 5, sl. 4 (analogno vodnemu), pa je ta absolutni tlak narasel na 133 bar. Na sliki 13.a je viden relativni porast tlaka za 90 bar na B priključku oljnega preizkuševališča po pomiku krmilnega bata v ničelni položaj.

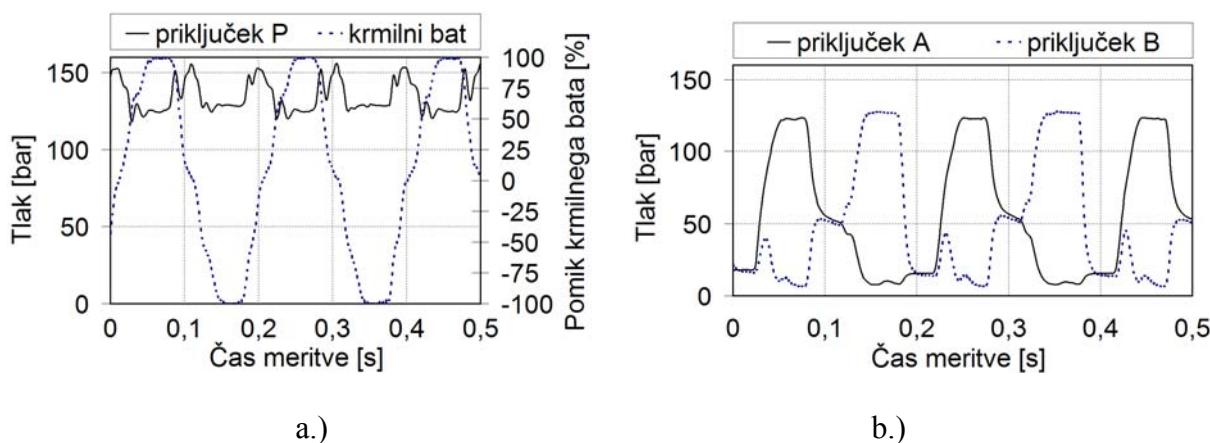
Absolutni stacionarni tlak na B priključku vodnega proporcionalnega potnega ventila (sl.13.b) pred pojavom hidravličnega udara je bil 26 bar, po zaprtju ventila pa je ta absolutni tlak narasel na 127,2 bar. Prišlo je do relativnega porasta tlaka na B priključku za 101,2 bar.



Slika 13: Meritev tlaka pri hidravličnem udaru na A in B priključkih ventila v odvisnosti od časa za (a) olje in (b) vodo  
(pretok = 33 l/min, tlak = 160 bar, masa = 163 kg horizontalno, koračni signal S1)

## 4.2. Trajnostni test

Slika 14.a prikazuje pomik krmilnega bata v vodnem proporcionalnem potnem ventilu kot odziv na vhodni koračni krmilni signal. Krmilni bat je med trajnostnim testom ves čas opravljal celoten gib  $\pm 100\%$ , kar dejansko pomeni  $\pm 3$  mm. Druga krivulja na tem grafu pa prikazuje nihanje vstopnega tlaka na P priključku med trajnostnim testom. Ta tlak je nihala s približno 160 bar na približno 120 bar s frekvenco 10 Hz. Slika 14.b prikazuje delovna tlaka na A (krivulja pA) in B (krivulja pB) priključku vodnega proporcionalnega potnega ventila. Tlaka nihata s frekvenco krmilnega bata 5 Hz. Dosežena delovna tlaka na A in B priključkih sta približno 120 bar, vsled česar znaša pretok, skozi dušilki z izvrtinama po 1,5 mm, približno 20 l/min. Dušilki sta vgrajeni na A in B priključka sl. 6, poz. 24.1 in 24.2.



Slika 14: Primer meritev trajnostnega testa vodnega proporcionalnega potnega ventila,  
a.) pomik krmilnega bata in tlak na vstopnem P priključku v odvisnosti od časa ter  
b.) tlak na A in tlak na B priključkih v odvisnosti od časa.  
(tlak = 160 bar, pretok = ca. 20 l/min, frekvenca = 5 Hz)

Eden pomembnejših rezultatov trajnostnega testa vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila po 10 milijonov prekrmiljenj pri tlaku nastavitve varnostnega ventila 160 bar, delovnem pretoku skozi ventil približno 20 l/min in frekvenci prekrmiljenj 5 Hz je:

***notranje puščanje ( $Q_L$ ) (pri 40°C), ki je bilo manjše od 5 % celotnega pretoka črpalke ( $Q_L < 2$  l/min).***

## 5. Diskusija in zaključek

Razvili smo nov vodni 4/3 proporcionalni potni ventil ter zasnovali in izdelali dvojno, vodno in oljno, preizkuševališče. Rezultati z analognega oljnega hidravličnega sistema, sestavljenega pretežno iz standardnih sestavin, so nam služili za referenčno primerjavo obnašanja vodnega sistema.

Na obeh preizkuševališčih smo izvedli številne meritve statičnega obnašanja in dinamične odzivnosti (prehodni pojavi). Ugotavljamo, da je statično obnašanje vodnega sistema zelo podobno, analognemu, oljnemu sistemu. Dolžina pomika obremenjene batnice vodnega hidravličnega valja je analogna dolžini pomika batnice pri oljnem valju, pri ekvivalentnih pogojih. Potrebni delovni tlaki za pomik obremenjene batnice so pri pospeševanju mase podobni. Pri gibanju batnice s konstantno hitrostjo pa so delovni tlaki na vodnem preizkuševališču za približno 19 bar oziroma približno 82% višji kot na oljnem pri enakih pogojih. Smatramo, da je razlog za omenjeno razliko je predvsem v večjem trenju tesnil znotraj vodnega hidravličnega valja v primerjavi z oljnim. Meritve prehodnega pojava pri nenadni zaustavitvi mase, tj. hidravličnega udara, nam povedo, da je najvišji porast tlaka pri vodnem hidravličnem sistemu za približno 12 % višji kot je porast tlaka pri oljnem hidravličnem sistemu.

Meritve kako krmilni bat preizkušane vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila sledi krmilnemu signalu, nam povedo, da deluje omenjeni ventil z najvišjo možno frekvenco 19 Hz pri amplitudi – 3 dB (tj. 70 % celotnega giba krmilnega bata). Fazni zamik obremenjenega preizkušane vodnega ventila je 90° pri frekvenci 10 Hz.

Trajnostni test novega, v teh raziskavah razvitega, vodnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila je pokazal, da je ventil po 10 milijonih prekrmiljenj še vedno uporaben. Notranje puščanje namreč ni presegalo 5% celotnega pretoka črpalke pri danih vrtiljajih in najvišjem možnem tlaku (160 bar) ter priporočeni delovni temperaturi vode (40°C). Z določenimi ukrepi, ki so se pokazali za pozitivne med potekom trajnostnega testa, pa bo mogoče v prihodnje še izboljšati obstojnost oziroma uporabno dobo ventila.

Iz predstavljenih raziskav je razvidno, da je razviti vodni proporcionalni potni ventil mogoče uporabiti v velikem številu aplikacij, ki trenutno delujejo v klasični oljni hidravliki. Nadalje je potrebno omeniti, da je celoten vodni hidravlični sistem uspešno prestal dolgotrajni trajnostni test, kar nas navdaja z velikim optimizmom za nadaljnje delo na tem področju.

## **6. Zahvala**

Avtorja sva za finančno in tehnično podporo iskreno hvaležna slovenskemu podjetju *Tajfun Planina d.o.o.*, enemu večjih izdelovalcev gozdarske opreme na svetu. Za predlagano področje raziskave na vodni hidravliki in vso podporo pri raziskavah se zahvaljujemo *prof. dr. Jožetu Vižintinu*, vodji Centra za tribologijo, tehnično diagnostiko in hidravliko (CTDH). Raziskave je sofinancirala *Slovenska Raziskovalna Agencija (ARRS)*, proj. L2-9407. Večji del sestavin oljne hidravlike je prispevalo podjetje *Kladivar Žiri d.d.*, za kar se jim zahvaljujemo. Podjetje *HIB Kranj* je delno doniralo hidravlične gibke cevi, podjetje *OLMA* pa prispevalo mineralno hidravlično olje. Hvala vsem, da smo to lahko dosegli!

## **7. Literatura**

- [1] Bramah, J.: The Hydraulic Press, UK Patent Nr. 2045 (1795)
- [2] Kržan, B., Vižintin, J.: Okolju prijazna maziva; Ventil 15 (2009), števil. 3; str. 232 - 238
- [3] Koskinen, K., Leino, T., Riipinen, H. : Sustainable development with water hydraulics – possibilities and challenges, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium in Fluid Power, 2008, Toyama, Japonska, Vol. 1, pp. 11 – 18
- [4] Majdič, F., Pezdirnik, J., Kalin, M.: Primerjava sistemov vodne in oljne pogonsko-krmilne hidravlike, Zbornik konference Fluidna tehnika, 2007, Maribor.