

# PRIMERJAVA ODZIVOV MED SISTEMOM VODNE IN OLJNE POGONSKO KRMILNE HIDRAVLIKE

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

## Povzetek

Naravovarstveni predpisi postajajo vse strožji. Uporaba vode namesto mineralnega hidravličnega olja v pogonsko-krmilni hidravliki je eden izmed pozitivnih korakov v tej smeri. V tem prispevku predstavljamo prve, preliminarne rezultate na dvojnem, vodnem in oljnem hidravličnem preizkuševališču. Prva preizkušanja kažejo, da preizkuševališče uspešno deluje in da potrebujemo še nekaj dopolnitev za optimalno delovanje novega vodnega sistema. Prikazana je primerjava obnašanja med sistemom vodne in oljne hidravlike. Glavni merjeni parametri so bili tlak, premik krmilnega bata v ventilu in njegov odziv ter premik batnice v hidravličnem valju. Prav tako podajamo tudi primerjalno analizo prehodnih pojavov med vodnim in oljnim sistemom. Predstavljeni preizkusi so bili izvedeni na sistemu s hidravličnim valjem z in brez obremenitve. Rezultati prikazujejo očitne razlike v obnašanju med sistemom vodne in oljne hidravlike.

**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. In this paper we present some preliminary results on twin-type hydraulic experiments, employing equal parts containing water and oil. Our initial findings suggest the need for modifications to the test rig, and a comparison of the behaviour between two similar hydraulic test rigs is shown. The main parameters measured during the investigation were pressures, spool displacements and responses of the piston in the double-acting hydraulic cylinder. However, transient phenomena in the water and oil hydraulic test rig were also analysed and compared. Experiments were performed on systems with and without an applied load. The results reveal very different behaviours for the oil and the water hydraulics.

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

## 1. Uvod

Nepričakovani izlivi 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 desetletnem obdobju razvoja na področju vodne hidravlike je še vedno pomanjkljivo razumevanje mehanizmov delovanja in njihovih lastnosti. V tem prispevku prikazujemo nekaj preliminarnih rezultatov na novem, zvezno-krmiljenem 4/3 potnem ventilu, ki uporablja čisto vodo kot hidravlično tekočino.

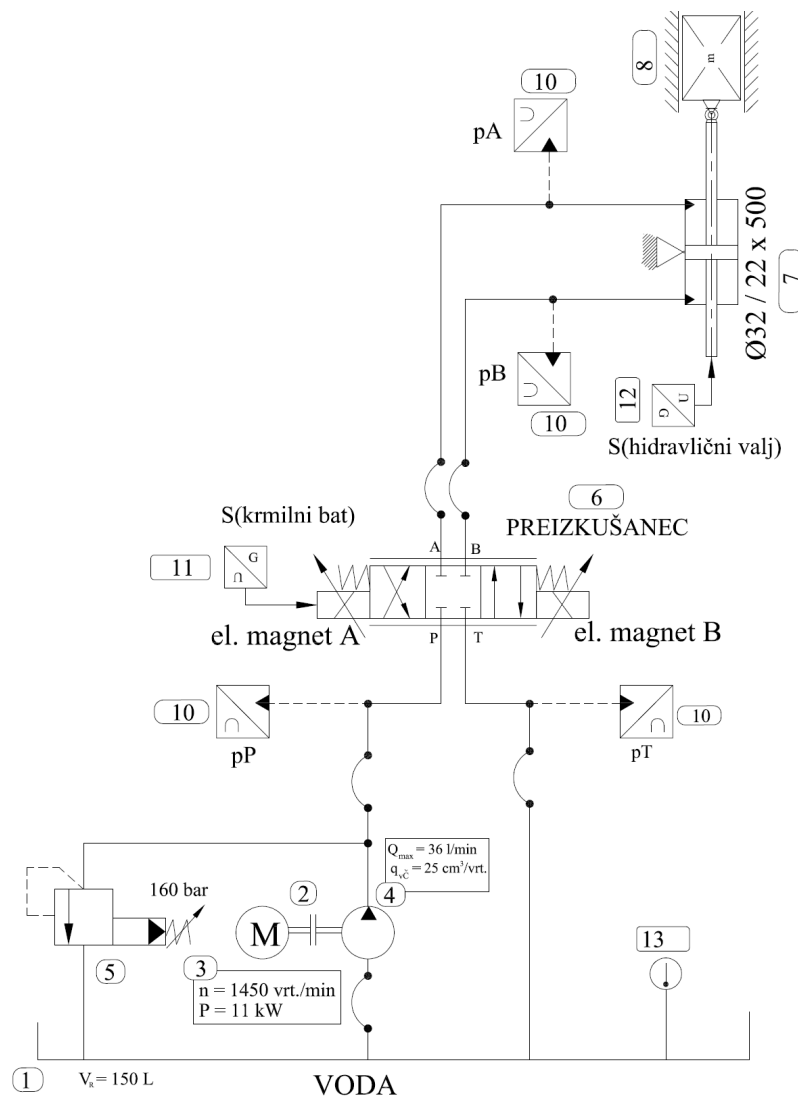
## 2. Eksperimentalni del

### 2.1. Preizkuševališče

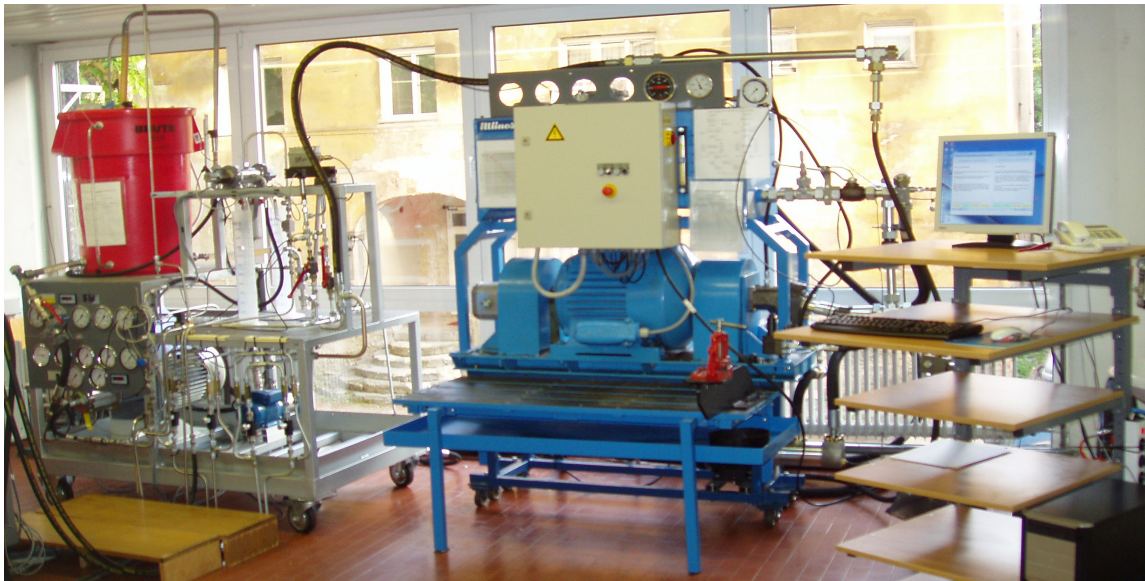
Zgrajeno je bilo dvojno preizkuševališče za raziskave vodne pogonsko-krmilne hidravlike (PKH) [9]. Preizkuševališče lahko uporabljamo za preizkušanje vodnega in vzporedno oziroma istočasno tudi oljnega proporcionalnega 4/3 potnega ventila drsniškega tipa. Omenjena, vodni in oljni ventil, lahko testiramo dinamično – prehodni pojavi in statično – dolgotrajno testiranje uporabne dobe pri enakih pogojih. Glavne sestavine vodnega dela preizkuševališča so prikazane na sliki 1: rezervoar, aksialna batna črpalka, varnostni ventil, preizkušanec – proporcionalni 4/3 potni ventil, dvostransko delujoči hidravlični valj z obojestransko batnico, utež z maso 162 kg, štiri tlačna zaznavala in dva merilnika položaja (LVDT). Prvi merilnik položaja meri pomik krmilnega bata v preizkušanjem ventilu, drugi pa pomik batnice v hidravličnem valju. Visokotlačna hidravlična črpalka dovaja okoli 30 l/min hidravlične tekočine na P priključek preizkušanca. Ta je krmiljen preko računalnika z uporabo posebnega programa. Opazovali smo tlake, pomike in temperature obeh hidravličnih tekočin. Varnostni ventil je bil nastavljen na 160 bar. Vodno hidravlično preizkuševališče (slika 2) je sestavljeno iz standardnih, na tržišču razpoložljivih

vodnih hidravličnih sestavin, razen proporcionalnega 4/3 potnega ventila in hidravličnega valja. Ti dve sestavini smo zasnovali in konstruirali v Laboratoriju za pogonsko-krmilno hidravliko. Cev vodnega hidravličnega valja je iz nerjavečega jekla, batnici sta iz trdo-kromiranega jekla. Tesnila in vodilni obroči za oba hidravlična valja so enaki, izdelani so iz nitritne gume in poliuretana ojačanega z vlakni.

Oljno hidravlično preizkuševališče (slika 2) je funkcijsko podobno vodnemu, vendar je sestavljeno iz standardnih oljnih, na tržišču dostopnih sestavin, razen hidravličnega valja. Hidravlični valj je zgrajen podobno kot so običajno zgrajeni hidravlični valji za oljno hidravliko. Ima pa enako konstrukcijo, dimenzije in lastnosti oz. parametre drsnih površin kot vodni hidravlični valj. Te posebnosti so upoštevane zaradi čimboljše primerljivosti obeh sistemov.



**Slika 1:** Vodno pogonsko-krmilno hidravlično preizkuševališče za preizkušanje prehodnih pojavov



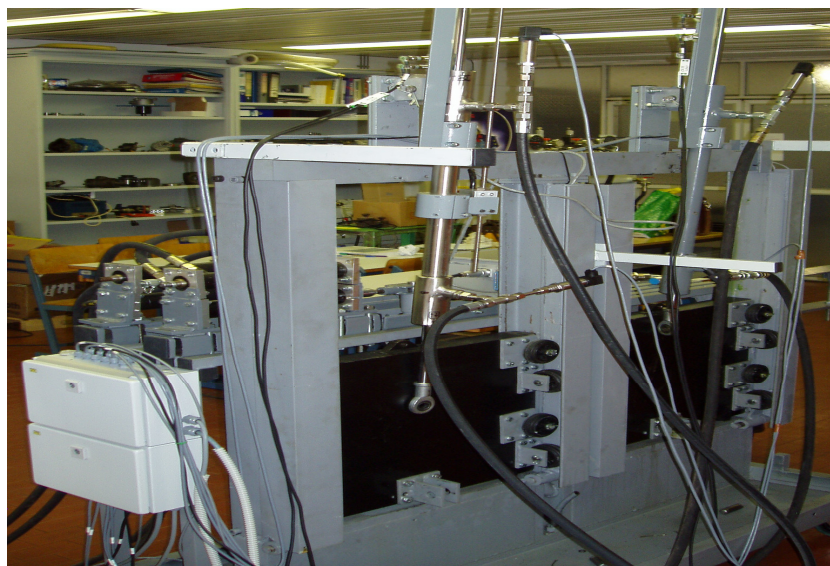
**Slika 2:** Vodni (levo) in oljni (desno) del hidravličnega preizkuševališča

## 2.2. Preizkušane

Glavna sestavna dela – elementa preizkušanca, uporabljena v novem, vodnem proporcionalnem 4/3 potnem ventilu, sta bila bat z zunanjim premerom 12 mm in puša. Reža med batom in pušo znaša nekaj mikrometrov. V tu predstavljenem preizkusu sta bila oba elementa (tribološki par) iz nerjavečega jekla. Ta par materialov v drsnem kontaktu in še nekaj drugih smo predhodno testirali na tribološkem preizkuševališču [9]. V vodnem delu hidravličnega preizkuševališča smo uporabili destilirano vodo kot hidravlično tekočino z namenom, da zagotovimo nevtralne pogoje, ki niso odvisni od tipa vode. Le ta se lahko precej razlikuje od okolja do okolja. V oljnem delu preizkuševališča pa smo uporabili mineralno hidravlično olje po ISO VG 46.

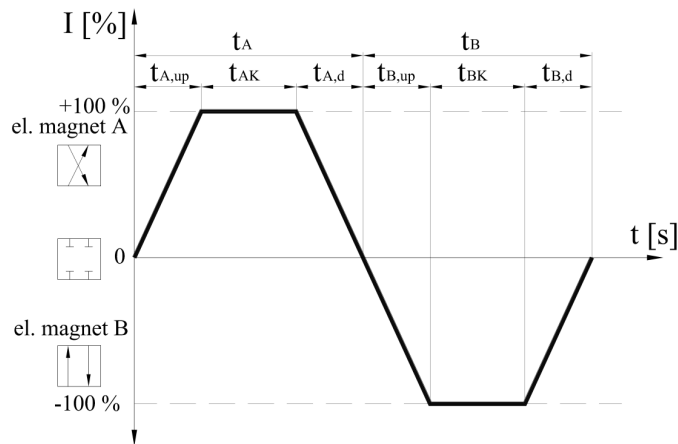
## 2.3. Postopek preizkušanja

Izvedli smo dve vrsti preizkusov: enega z utežjo mase 162 kg in drugega brez uteži. Utež je bila pritrjena na batnico hidravličnega valja. Omogočeno je bilo gibanje uteži v vertikalni smeri (dviganje/spušcanje) (slika 3).



**Slika 3:** Vodni (levo) in oljni (desno) hidravlični valj s pritrjeno utežjo

V obeh primerih smo izvedli enake preizkuse. Preizkusi so potekali samodejno s pomočjo posebnega prilagojenega računalniškega programa. Slika 4 prikazuje obliko krmilnega signala, ki je bil vnešen pri vsakem preizkusu. Časi, označeni v sl. 4, so zapisani v tabeli 1. Kot je razvidno iz sl. 4 je vhodni signal sestavljen iz šestih posameznih časovnih odsekov. Krmilni signal v prvem odseku vpliva preko elektromagneta A na premik krmilnega bata potnega ventila iz ničelnega v križni položaj (glej sl. 1). Kot odziv na nov spremenljivi položaj krmilnega bata se prične batnica v hidravličnem valju pospešeno pomikati navzgor. Ta električni krmilni signal naraste od 0% do 100% v času  $t_{A,up}$ . Signal ostane na vrednosti 100 % za čas  $t_{AK}$ . Po preteku tega časa se začne tretji časovni odsek krmilnega signala. V tem odseku se krmilni bat premakne iz te skrajne lege (v križnem položaju) v ničelni položaj (srednja lega bata v izvrtini – puši) v času  $t_{A,d}$ . V tem trenutku, ob zaključku časa  $t_{A,d}$ , se gibanje batnice navzgor ustavi. Takoj po poteku tretjega odseka krmilnega signala se nadaljuje četrti časovni odsek. Krmilni signal v četrtem časovnem odseku vpliva preko elektromagneta B na premik krmilnega bata potnega ventila iz, oziroma preko, ničelnega v vzporedni položaj. Kot odziv na novi, v času  $t_{B,up}$  spreminjajoči se, položaj krmilnega bata, se prične batnica v hidravličnem valju pospešeno pomikati navzdol. Ta električni krmilni signal naraste torej od 0% do 100% v času  $t_{B,up}$ . Signal ostane nato v tem časovnem odseku za čas  $t_{BK}$ . Po preteku tega časa se začne zadnji, šesti odsek krmilnega signala. V tem odseku se krmilni bat premakne iz skrajne lege, vzporednega položaja, v ničelni položaj v času  $t_{B,d}$ . V tem trenutku se gibanje batnice navzdol ustavi. V času opisanih faz gibanja oziroma položaja krmilnega bata v ventilu je bil največji krmilni signal 100 % za oba proporcionalna magneta in pri obeh proporcionalnih 4/3 potnih ventilih, vodnem in oljnem.



**Slika 4:** Oblika vhodnega signala za krmiljenje preizkušanca

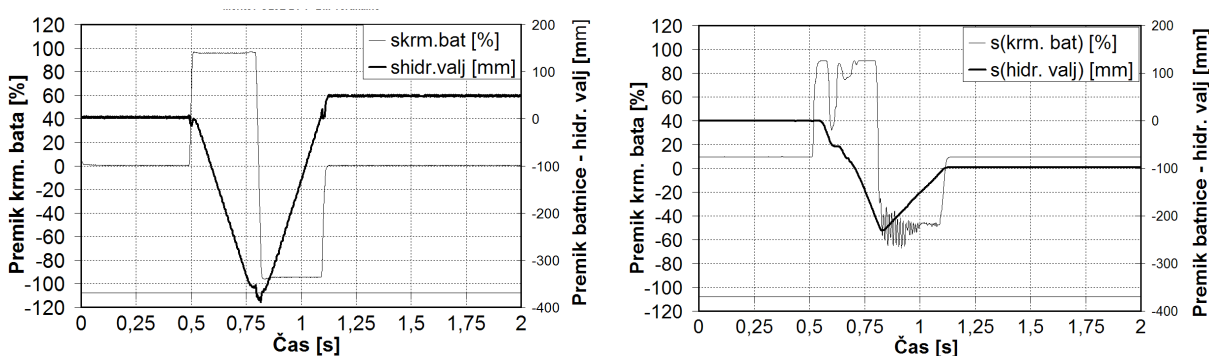
**Preglednica 1:** Nastavitev časovnih ramp in stacionarnih delov krmilnega signala za vodni in oljni proporcionalni 4/3 potni ventil (preizkušanca)

$t_A$	$t_{A,up}$	$t_{A,d}$	$I_A$	$t_B$	$t_{B,up}$	$t_{B,d}$	$I_B$
0,3 s	0,01 s	0,01 s	100 %	0,3 s	0,01 s	0,01 s	100 %

### 3. Rezultati

#### 3.1. Preizkusi s hidravličnim valjem v vertikalnem položaju brez obremenitve

Slika 5.a prikazuje gibanje krmilnega bata v ventilu in batnice v hidravličnem valju med meritvijo brez obremenitve za *oljni del* preizkuševališča. Krivulja gibanja krmilnega bata je praktično premica, je gladka in brez vidnih nepravilnosti. Druga krivulja, ki predstavlja odziv hidravličnega valja na gibanje krmilnega bata, je podobno gladka in skoraj simetrična. Razlika med dolžino giba batnice navzgor in dolžino giba batnice navzdol, ob sicer simetričnem krmilnem signalu, je približno 50 mm, kar pomeni razliko okrog 14 % v korist giba navzdol. Razlog za to različnost je verjetno v vztrajnosti batnice (teža celotne batnice je ca. 17 kg), ki vpliva, da je gib navzdol daljši od giba navzgor.

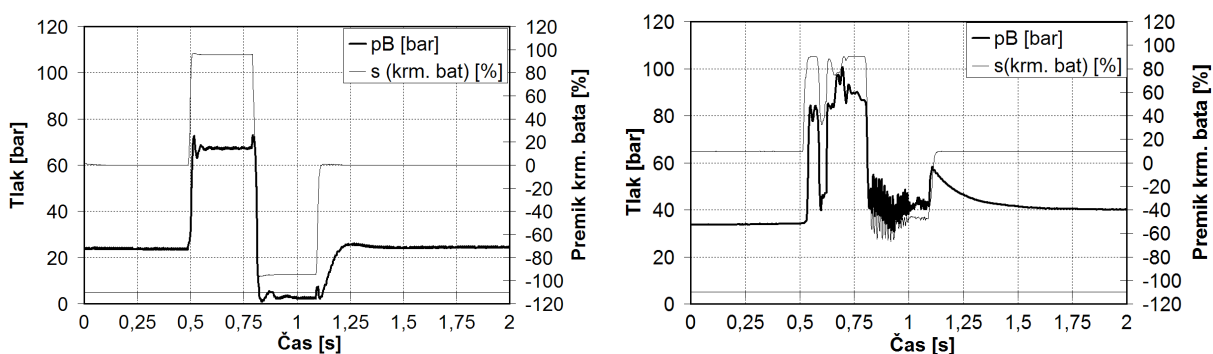


**Slika 5:** Gibanje krmilnega bata v ventilu in batnice v hidravličnem valju brez obremenitve; **a.** v oljnem delu preizkuševališča, **b.** v vodnem delu preizkuševališča



Slika 5.b prikazuje gibanje krmilnega bata v ventilu in batnice v hidravličnem valju med meritvijo brez obremenitve za *vodni del* preizkuševališča. Krivulja, ki popisuje izmerjeno pot krmilnega bata v vodnem ventilu, ima več nepravilnosti v primerjavi s podobno krivuljo za oljni ventil (sl. 5.a). Po vklopu ventila v križni položaj se pojavi grobo nihanje, signal z 90% pade na cca. 30% vrednosti in se nato vrne na največjo vrednost ter izniha v dveh nihajih. Po preklopu ventila iz križnega v vzporedni položaj pa se pojavi nihanje s frekvenco 77 Hz okoli vrednosti 45% celotnega krmilnega signala. Razlog za nesimetričen gib batnice vodnega hidravličnega valja za 100 mm, kar pomeni približno 43 % giba, je v nesimetričnem oziroma vmesnem položaju krmilnega bata v ventilu kljub simetričnemu oziroma celotnemu vhodnemu krmilnemu signalu. Vhodni električni krmilni signal je bil v obeh položajih, križnem in vzporednem 100% (tab. 1). Krmilni bat v križnem položaju je bil odmaknjen za ca. 80% celotnega giba iz ničelne lege, medtem, ko je bil gib v vzporedni položaj le za ca. 45 % iz ničelne lege - priprta reža.

Slika 6. a prikazuje spremembo tlaka po času na B priključku potnega ventila, ko premikamo krmilni bat v oljnem proporcionalnem potnem ventilu brez obremenitve na hidravličnem valju. Priključek B se nahaja na tlačni strani, ko dvigamo batnico navzgor. Potek tlaka na priključku B prikazuje prvi tlačni skok ob vklopu potnega ventila v križni položaj, to je pri času ca 0,5 s. Prvi tlačni skok je bil ca. 4 bare nad stacionarnim delovnim tlakom, ki je ca. 68 bar. Po preklopu ventila iz križnega preko ničelnega v vzporedni položaj (pri času ca 0,8 s) je tlak upadel na 0 bar in v nekaj mili-sekundah narasel na ca. 5 bar. Po končanem preklopu potnega ventila iz vzporednega položaja v ničelni se je spuščanje batnice ustavilo in tlak je zaradi vztrajnosti batnice narasel za ca. 23 bar nad trenutni delovni tlak, to je na 25 bar. Omenjeni porasti tlaka niso nevarni, saj je absolutni tlak relativno nizek.

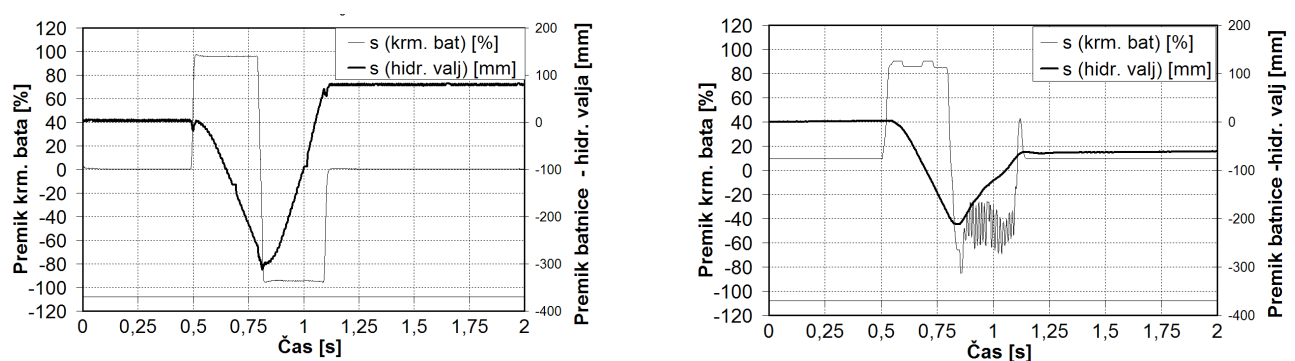


**Slika 6:** Spremembe tlakov po času na priključku B potnega ventila ter gibanje krmilnega bata v ventilu ob delovanju hidravličnega valja brez obremenitve; **a.** v oljnem delu preizkuševališča, **b.** v vodnem delu preizkuševališča

Slika 6.b prikazuje spremembo tlaka po času na B priključku potnega ventila, ko s krmilnim električnim signalom premikamo krmilni bat v vodnem proporcionalnem potnem ventilu v vodnem delu preizkuševališča brez obremenitve na hidravličnem valju. Krivulja spremembe tlaka po času na priključku B prikazuje porast tlaka za ca. 50 barov nad trenutni delovni tlak, to je na 85 bar. Glede na prej omenjeno nihanje krmilnega bata v potnem ventilu temu ustrezno niha tudi tlak. Pri dviganju batnice je bil najvišji tlak na priključku B ca. 100 bar. Po preklopu v vzporedni položaj, kar pomeni spuščanje batnice, je tlak upadel na ca. 40 bar. Tlak je med spuščanjem batnice nihal s frekvenco nihanja krmilnega bata. Po končnem preklopu ventila v ničelni položaj se je batnica ustavila, tlak je tedaj narasel nad trenutni delovni tlak za ca. 15 bar, to je na 58 bar, kar pomeni ca. 35% nad delovni tlak. Tlak je po tem skoku počasi upadel na 40 bar.

### 3.2. Preizkusi s hidravličnim valjem z obremenitvijo 162 kg v vertikalnem položaju

Slika 7. a prikazuje časovni potek gibanja bata krmilnega potnega ventila in batnice hidravličnega valja z maso 162 kg v oljnem delu preizkuševališča. Potek gibanja bata v proporcionalnem potnem ventilu je ponovljiv, zopet gladek kot v primeru brez obremenitve (sl. 5.a in 6.a). Batnica se je v križnem položaju potnega ventila premaknila navzgor za ca. 310 mm, medtem ko se je po simetričnem položaju batnica premaknila navzdol za 400 mm, kar je za 90 mm več. To pomeni razliko približno 22 % v korist giba navzdol. Nesimetričnost giba batnice pri simetričnem vhodnem signalu je pričakovana, saj na to v večji meri vpliva poleg vztrajnosti batnice (teža celotne batnice je ca. 17 kg) predvsem vztrajnost 162 kilogramske uteži.

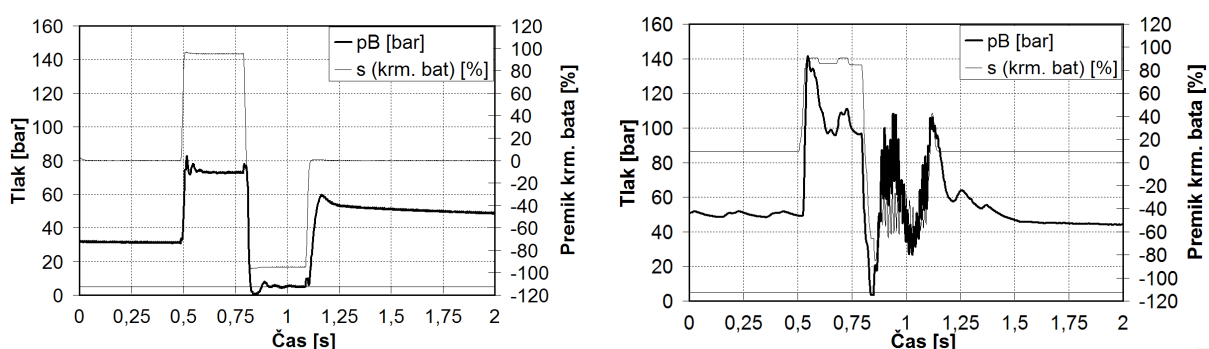


**Slika 7:** Gibanje krmilnega bata v ventilu in batnice v hidravličnem valju z obremenitvijo 162 kg; **a.** v oljnem delu preizkuševališča, **b.** v vodnem delu preizkuševališča



Slika 7.b prikazuje gibanje krmilnega bata v proporcionalnem potnem ventilu in batnice v hidravličnem valju pri obremenjenem hidravličnem valju z utežjo 162 kg v vertikalnem položaju za vodni del preizkuševališča. Gibanje bata v vodnem potnem ventilu je v primeru križnega položaja izvedeno z manjšimi nepravilnostmi in sicer se krmilni bat dvakrat v celotnem vklopljenem času križnega položaja stopničasto odmakne za ca. 90% iz ničelne lege in nato pade na 85% največjega možnega odmika iz ničelne lege. Pri preklopu v vzporedni položaj se bat po času 0,86 sekunde od začetka merjenja postavi kratkotrajno v položaj 85% največjega odmika od ničelne lege in se nato nihajoče, sunkovito premakne v položaj ca. 50% odmika iz ničelne lege ter niha okoli te lege s ca. 17 % amplitude in frekvenco 83 Hz. Po izteku časa vklopa ventila v vzporednem položaju se bat sunkovito premakne skozi ničelni položaj za 40% giba in se nato ustavi na sredini v ničelnem položaju. Potek gibanja batnice vodnega hidravličnega valja ni simetričen verjetno predvsem zaradi nepopolnega prekrmljenja potnega ventila – povprečno odprtje ventila za spust batnice je bilo 50% celotnega odprtja. Batnica se je v križnem položaju dvignila za ca. 211 mm, v vzporednem položaju pa se je, kljub simetričnemu vhodnemu električnemu signalu in pomoči vztrajnosti uteži in batnice, spustila le za 150 mm. Dolžina spusta batnice je za ca. 62 mm manjša od dolžine dviga, to je za ca. 29% manj, kljub dejstvu, da bi morala biti dolžina spusta daljša zaradi vztrajnosti batnice.

Slika 8.a spremembo tlaka po času na priključku B, ko premikamo krmilni bat v oljnem proporcionalnem potnem ventilu z obremenitvijo na hidravličnem valju. Prvi porast tlaka je bil ca. 10 barov nad delovnim tlakom, ki je ca. 73 bar. Po preklopu ventila iz križnega preko ničelnega v vzporedni položaj je tlak upadel na 0 bar in v nekaj mili-sekundah narasel na ca. 8 bar. Po končanem preklopu potnega ventila iz vzporednega položaja v ničelni se je spuščanje batnice ustavilo in tlak je zaradi vztrajnosti batnice in uteži narasel za ca. 52 bar nad trenutni delovni tlak, to je na 60 bar.



**Slika 8:** Potek tlakov pri hidravličnem valju v odvisnosti od položaja krmilnega bata v ventilu pri obremenitvi 162 kg na hidravličnem valju;  
**a.** oljni del preizkuševališča, **b.** vodni del preizkuševališča

Slika 8.b prikazuje spremembo tlaka po času na priključku B glede na pomik krmilnega bata v proporcionalnem potnem ventilu na vodnem delu preizkuševališča z obremenitvijo na hidravličnem valju. Iz krivulja spremembe tlaka po času na priključku B je razviden porast tlaka za ca. 90 barov nad trenutni delovni tlak, to je na 140 bar. Ta tlak je med dviganjem batnice nihajoče upadel na 95 bar. Po preklopu ventila v vzporedni položaj, ki pomeni spuščanje batnice, je tlak upadel s ca. 90 bar na ca. 5 bar. Tlak je med spuščanjem batnice nihal z dvema frekvencama. Prvo, glavno, dušeno sinusno nihanje, je nihanje zaradi vztrajnosti mase s frekvenco ca. 11 Hz in povprečno amplitudo ca. 40 bar. Drugo nihanje tlaka, ki niha okoli glavne sinusoide, je nihanje zaradi nihanja krmilnega bata in verjetno zaradi nihanja stebra tekočine v cevi. Frekvenca drugega nihanja je ca. 70 Hz in amplituda ca. 14 bar. Po končnem preklopu ventila v ničelni položaj, se je batnica ustavila, tlak je takrat narasel nad trenutni delovni tlak za ca. 10 bar, to je na 60 bar, kar pomeni ca. 17% nad delovnim tlakom. Tlak je po tem skoku počasi upadel na 49 bar.

#### 4. Diskusija

Izdelano je bilo novo preizkuševališče za raziskave in razvoj vodne pogonsko-krmilne hidravlike. Preizkuševališče je sestavljeno iz dveh delov. Omogoča nam primerjavo obnašanja vodnega hidravličnega sistema z analognim oljnim sistemom. V tem prispevku je prikazanih nekaj rezultatov, ki prikazujejo razliko v dinamičnem obnašanju med vodnim in analognim oljnim sistemom. Glavna opazovana sestavina je bil proporcionalni 4/3 potni drsniški ventil za vodo. Ta ventil je osrednji preizkušanec in je bil zasnovan ter izdelan namensko za to preizkuševališče. Primerjali smo ga s standardnim proporcionalnim potnim ventilom za olje. Ta ima podobne reže med batom in pušo. Iz rezultatov je razvidno, da proporcionalni oljni ventil deluje idealno, kar smo tudi pričakovali, vodni ventil pa ima nekaj nepravilnosti v določeni smeri gibanja krmilnega bata – predvsem v smeri, kjer se bat prekrmili v vzporedni položaj. Če primerjamo rezultate v slikah 5.a in 5.b ugotovimo, da je krivulja za gibanje krmilnega bata v oljnem ventilu gladka, podobna je vhodnemu električnemu krmilnemu signalu (sl. 4 in tab. 1). Krivulja gibanja krmilnega bata za vodni ventil pa je precej naključne oblike. Ob ponovitvah meritev smo ugotovili, da se krivulja gibanja krmilnega bata v vodnem proporcionalnem 4/3 potnem ventilu spreminja, ni ponovljiva. Krmilni bat očitno na določenem mestu (pri ca. 50 % odmika iz ničelne lege) v primeru gibanja v vzporedni položaj (posledično gibanje batnice hidravličnega valja navzdol) zadržujejo neke sile. Nihanja krmilnega bata v vodnem proporcionalnem potnem ventilu nastopajo verjetno zaradi vplivov "stick-slip" efekta, efekta zagozdenja vršičkov hrapavosti, nepravilnosti oblike krožnice in valja krmilnega bata ter izvrtine in reagiranja PID kartice v zaprti regulacijski zanki. Nihanja krmilnega bata verjetno nastopijo zaradi prehitrega in prekomerna ojačanja signala, ker dejanski položaj bata

v ventilu ni dosegel zelenega položaja. Do blokirajočega zadržanja bata na določenem mestu verjetno prihaja zaradi vpliva nizke reže med batom in pušo ter majhne debeline "vodnega mazalnega filma".

Krivulji gibanja batnice hidravličnega valja pri oljnem in vodnem sistemu sta si podobni, gladki. Pri oljnem sistemu je nesimetričnost giba batnice hidravličnega valja popolnoma v skladu s pričakovanji – zaradi vertikalne lege hidravličnega valja je opravljena dolžina giba batnice pri spustu daljša v primerjavi z dolžino giba pri dvigu. Razlika v dolžini giba pri spustu med primerom brez obremenitve in primerom s 162 kg utežjo je 40 mm, kar je v skladu s pričakovanji. Pri vodnem sistemu je nesimetričnost giba v nasprotju z oljnim sistemom. Dolžina giba pri dviganju je za 43% daljša kot pri spustu v primeru ko ni obremenitve. V primeru pritrditve 162 kg uteži na batnico pa se ta razlika zmanjša na 29%, kar je zopet v skladu s pričakovanji. Nesimetričnost med gibom pri dvigu in spustu v vodnem sistemu je pričakovano drugačna kot pri oljnem sistemu, ker se krmilni bat proporcionalnega vodnega potnega ventila kljub dobljenemu 100% električnemu vhodnemu signalu ni premaknil v obe smeri (križna in vzporedna) enako. Ker se je v primeru vzporednega signala odmikal vedno le s polovičnim odmikom v primerjavi s križnim položajem, je temu podobna tudi krajša dolžina spusta batnice.

## 5. Zaključki

1. Gibanje krmilnega bata v oljnem proporcionalnem potnem ventilu je pričakovano, tako rekoč idealno, medtem, ko gibanje v funkcijsko analognem vodnem proporcionalnem potnem ventilu »ni popolno«. Vzroki za nestabilno gibanje vodnega krmilnega bata so verjetno v "stick-slip" efektu in/ali kratkotrajnem oz. občasnem blokiranju zaradi nizke reže, majhne debeline mazalnega filma ter vpliva hrapavosti in nepravilnosti oblike krožnice / valja.
2. Nestabilno gibanje krmilnega bata v vodnem proporcionalnem potnem ventilu direktno ne vpliva na gladkost oziroma pravilnost krivulje gibanja batnice hidravličnega valja. Vpliv je očiten pri hitrosti in dolžini gibanja batnice pri istem vhodnem krmilnem električnem signalu.
3. Potek tlakov je odvisen od poteka giba krmilnega bata. Posredno je tlak odvisen tudi od načina spremembe električnega vhodnega krmilnega signala.
4. V primerih izvedenih z obremenitvijo so nepravilnosti še bolj poudarjene, predvsem tlaki se pri prehodih med posameznimi krmilnimi fazami močno povečajo.
5. V skladu s pričakovanji je bil efekt hidravličnega udara pri vodnem sistemu za 40 bar večji kot pri analognem oljnem sistemu.

## 6. Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Slovenski raziskovalni agenciji (ARRS), ki je finančno podprla ta projekt (št. proj.: L2-9407, 1.2006 ). 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. Pezdernik, 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, pp.11013-1 – 11013-8.
- [2] M. Kalin, F. Majdič, J. Vižintin, J. Pezdernik. 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) 22-31.
- [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 [1] (2006) 9-14.
- [5] Kalin, M., Vižintin, J., 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, Technical University of Denmark; ISBN: 0-8247-9680-2.
- [9] F. Majdic, J. Pezdernik, M. Kalin, Comparative tribological investigations of continuous control valves for water hydraulics, *SICFP'07*, May 21-23, 2007, Tampere, Finland