

# VPLIV TESNIL NA OBNAŠANJE VODNO-HIDRAVLIČNEGA VALJA

Franc Majdič, Mitjan Kalin  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

## Povzetek

Predpisi o zaščiti naravnega okolja postajajo vedno strožji. Z uporabo vode namesto mineralnega hidravličnega olja v pogonsko-krmilni hidravliki lahko naredimo pozitivni korak v smeri teh predpisov. Prispevek predstavlja dva različna hidravlična valja. Prvo razviti hidravlični valj, preproste konstrukcije, je bil najprej merjen z uporabo mineralnega hidravličnega olja in nato, pri enakih parametrih, še z uporabo vode brez dodatkov. Izkazalo se je, da je trenje v obeh primerih uporabljenih hidravličnih kapljevih visoko, zato je bil zasnovan in izdelan nov, modularni hidravlični valj. Z namenom po raziskavah tribološko–hidravličnih drsnih kontaktov je konstrukcija novega hidravličnega valja taka, da lahko enostavno zamenjamo njegova tesnila in/ali vodila. Na omenjenem hidravličnem valju so bile izvedene meritve z dvema različnima serijsko izdelanima kombinacijama tesnil. Ugotovljeno je, da je trenje pri tesnilih iz PTFE (poli-tetrafluor-etilena) z dodatkom bronca izrazito nižje kot je trenje pri tesnilih iz PU (poliuretana).

**Ključne besede:** Hidravlični valj, konstrukcija, oljna, vodna hidravlika, vrste tesnil

## Abstract

Environmental protection regulations are becoming increasingly strict. 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 measurement results of a water hydraulic cylinder on a newly developed water hydraulic test rig. The new water hydraulic cylinder (specimen) was simulated, constructed and tested. This construction was such that we could simply exchange its sealings and/or guiding to investigate the tribological and hydraulic behaviour of the sliding contacts. Combinations of two different types of special, serial produced sealings for the water hydraulics cylinder were first simulated, tested and then compared. Some important results about the dynamic responses of the water hydraulic system at different combinations of sealings, different combinations of the assembled water cylinder, different loads and positions of the hydraulic cylinder rod, different inlet pressures and different inlet flows are presented and compared. The results show significant differences between the different sealings in the water hydraulic cylinder.

**KEYWORDS:** water hydraulics, hydraulic cylinder, sealings and guidings

## 1. Uvod

Ena izmed možnih alternativ glede zaščite naravnega okolja v pogonsko-krmilni hidravliki je uporaba vode kot hidravlične kapljevine. Ko govorimo o vodni hidravliki, imamo v mislih uporabo vode brez dodatkov. Problem pri uporabi mineralnega olja je v nevarnosti pred onesnaževanjem okolja, predvsem pitne vode in zemlje. Dosedanje stanje tehnike glede razpoložljivosti sestavin vodne hidravlike še vedno ne prepriča uporabnikov, da bi jih začeli širše uporabljati [1].

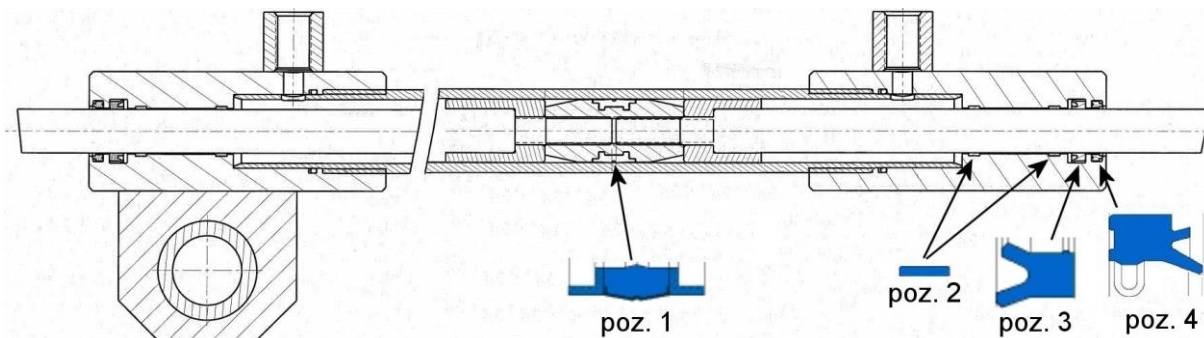
Z namenom raziskati in razvijati področje vodne hidravlike, je bilo v preteklosti razvito in izdelano dvojno, vodno in oljno hidravlično preizkuševališče [2-4]. Prav tako je bil razvit, izdelan in dinamično ter trajnostno preizkušen nov vodni proporcionalni 4/3 potni ventil [5]. V nadaljevanju raziskav bilo eksperimentalno in analitično primerjano obnašanje vodnega in ekvivalentnega oljnega hidravličnega sistema [6].

V prispevku najprej prikazujemo dve različni konstrukcijski izvedbi hidravličnih valjev s skožno batnico. Sledijo rezultati uporabe različnih elastičnih tesnil in vodil iz različnih materialov, ki igrajo eno bistvenih vlog pri izkoristkih hidravličnih valjev. Meritve so se izvajale pri različnih pretokih (1, 11 in 22 l/min), ter različnih tlakih varnostnega ventila (70, 110 in 150/160 bar). Pri meritvah se je uporabljala demineralizirana voda brez dodatkov. Temperatura vode med meritvami je znašala med 30 in 35 °C.

## 2. Hidravlični valj s skožno batnico

### 2.1. Prva konstrukcija vodnega in oljnega hidravličnega valja

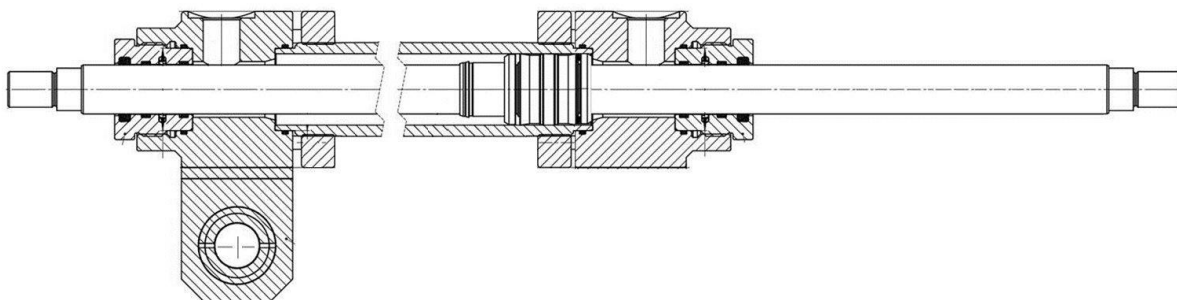
Pri začetnih raziskavah na področju vodne hidravlike, smo poleg omenjenega dvojnega, vodnega in oljnega preizkuševališča, razvili tudi preprost vodni in ekvivalentni oljni hidravlični valj [4]. Hidravlična valja sta konstrukcijsko podobna, razlika je le v materialih. Vodni hidravlični valj je izdelan iz nerjavnega jekla. Tesnila in vodila so bila enaka, podobna je bila tudi hrapavost drsnih površin. Pri prvi konstrukciji vodnega in oljnega hidravličnega valja smo uporabili standardna tesnila. Prerez hidravličnega valja in uporabljena tesnila ter vodila prikazuje slika 1. Po kataloških podatkih proizvajalca so vsa, v tem hidravličnem valju uporabljena tesnila in vodilni obroči, primerni za uporabo tako v oljni kot tudi v vodni hidravliki. Tesnilo bata (sl. 1, poz. 1) je izdelano iz olje-odporne sintetične gume (NBR). Tesnilo bata je oblikovano tako, da služi tudi kot vodilo bata. Vodilna obroča batnice (sl. 1, poz. 2) sta iz trde tkanine, tesnilo batnice (sl. 1, poz. 3) in posnemalni obroč (sl. 1, poz. 4) pa sta iz poliuretana (PU).



**Slika 1:** Prva konstrukcijska izvedba vodnega in oljnega hidravličnega valja

## 2.2. Izboljšana konstrukcija vodnega hidravličnega valja

Prve raziskave delovanja vodne hidravlike so pokazale, da prva, enostavna izvedba hidravličnega valja ni najprimernejša za nadaljnje raziskave, zato smo zasnovali in izdelali nov, modularno zgrajen vodni hidravlični valj. Hidravlični valj (sl. 2 in 3) je bil zasnovan tako, da mogoča enostavno menjavo tesnil na bat in v prirobnicah.



**Slika 2:** Prerez izboljšane konstrukcije vodnega hidravličnega valja

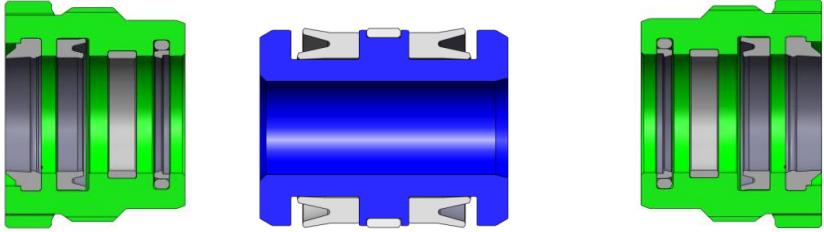
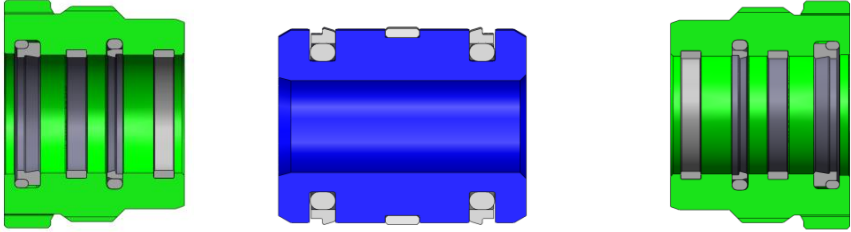


**Slika 3:** Izgled izboljšanega vodnega hidravličnega valja

V prispevku so prikazani rezultati raziskav na izboljšanem hidravličnem valju z dvema različnima kombinacijama tesnil/vodil, A oz. B (preglednica 1). V

kombinaciji tesnil/vodil A so uporabljena tesnila iz poliuretana (94 AU 925) s trdoto 94 Sh, v kombinaciji tesnil/vodil B pa tesnila iz poli-tertraflor-etilena z dodatkom bronu (PTFE B602). Kataloško podana–dopustna hitrost za prva (poliuretanska) tesnila znaša 0,5 m/s, za druga (poli-tetraflor-etilenska) tesnila pa je dopustna hitrost desetkrat večja (5 m/s).

**Preglednica 1:** Različna kombinacija tesnil/vodil za hidravlični valj s skožno batnico

<p>Kombinacija <b>A</b></p>	 <p>prirobnica [A] + bat [A] + prirobnica [A]</p>
<p>Kombinacija <b>B</b></p>	 <p>prirobnica [B] + bat [B] + prirobnica [B]</p>

### 3. Eksperimentalni del raziskav

#### 3.1. Preizkuševališče

Meritve na prvem hidravličnem valju (sl. 1) so se izvajale na vodnem in oljnem preizkuševališču [2-4], medtem, ko so se meritve na izboljšanem vodnem hidravličnem valju (sl. 2 in 3) izvajale le na vodnem preizkuševališču. Glavne sestavine vodnega hidravličnega preizkuševališča so: visokotlačna črpalka, varnostni ventil, tokovni ventil s tlačno kompenzacijo, proporcionalni potni ventil, tlačni senzorji, rezervoar, cevni razvod in hidravlični valj (preizkušanec). Za konstantno temperaturo in ustrezno čistočo hidravlične kapljevine skrbi obtočni filtrirno-hladilni sistem.

Vodno in oljno preizkuševališče sta si med seboj funkcionalno podobni, zato oljnega preizkuševališča ne bomo opisovali posebej.

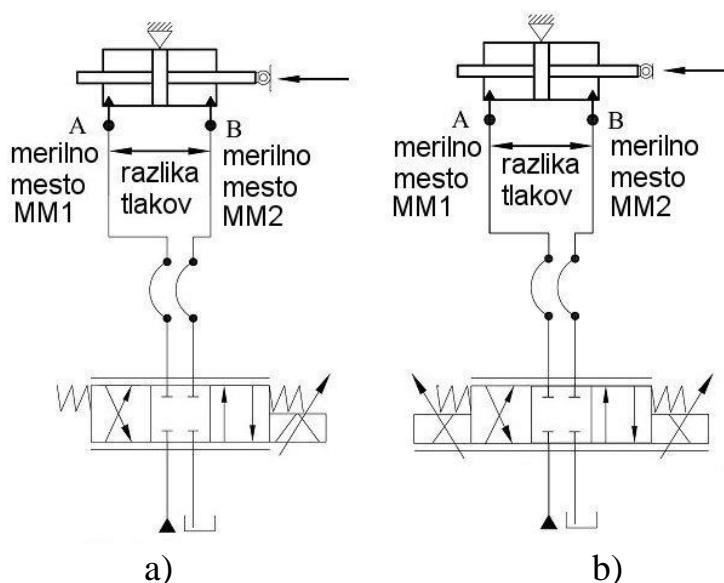
### 3.2. Postopek merjenja in vrednotenja rezultatov

Meritve za določitev razlike tlakov med priključkoma hidravličnega valja brez zunanje obremenitve, v odvisnosti od različnih vstopnih tlakov in pretokov, smo izvedli po sledečem postopku:

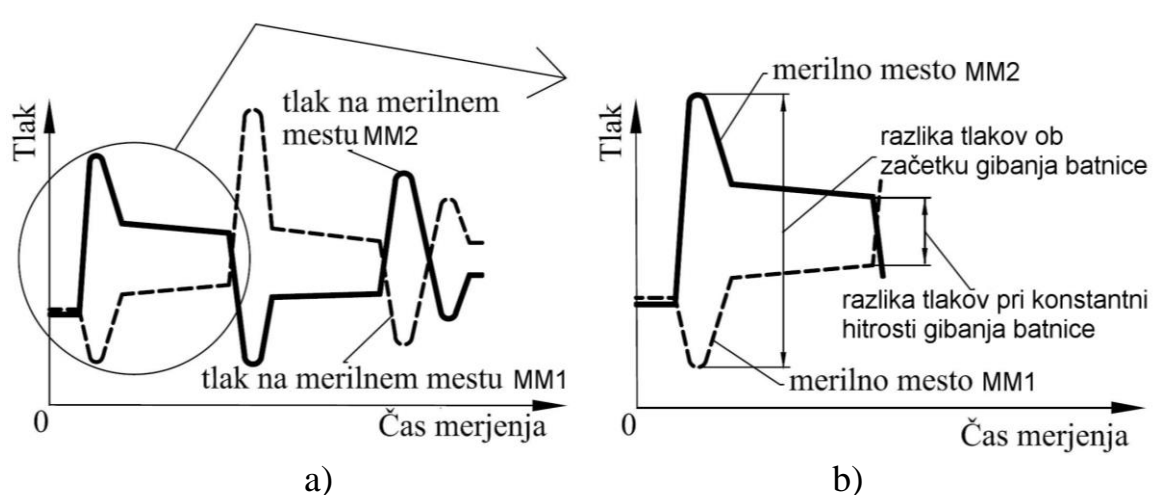
1. Nastavitev ustreznega tlaka na varnostnem ventilu (70, 110 ali 150/160 bar).
2. Nastavitev ustreznega pretoka na tokovnem ventilu s tlačno kompenzacijo (1, 11 ali 22 l/min).
3. Samodejna izvedba meritve po zagonu krmilno-merilnega programa v programskem okolju LabView. Batnica se pri meritvi premakne iz notranjega izhodiščnega položaja navzven in se po preklopu ventila vrne nazaj v izhodiščni položaj.
4. Zaradi doseganja ponovljivosti rezultatov se vsaka meritev izvede dva krat.

#### *Vrednotenje rezultatov meritev*

Tlak smo merili na obeh priključkih hidravličnega valja, tik pred vstopom (sl. 4, merilno mesto MM2 oz. B) in izstopom (sl. 4, merilno mesto MM1 oz. A). Razlika tlakov med priključkoma A in B prikazana na sl. 4 in sl. 5 se nanašajo na križni delovni položaj ventila. Slika 5a prikazuje načelna poteka tlakov na priključkih A in B hidravličnega valja za celotno meritev, slika 5b pa povečan prikaz poteka tlakov na priključku A in B za začetni del meritve (križni položaj). Prvi tlačni skok pomeni potreben delovni tlak za speljevanje. Na sl. 5b je kotirana tlačna razlika, potrebna za konstantno gibanje batnice hidravličnega valja. Iz posameznih meritev smo odčitali ti dve prikazani vrednosti in vrednotili rezultate (pogl. 4).



**Slika 4:** Merilna mesta za merjenje razlik tlakov med priključkoma hidravličnega valja na oljnem - a) in vodnem preizkuševališču - b)



**Slika 5:** Potrebni delovni tlak hidravličnega valja ob začetku gibanja in pri gibanju batnice s konstantno hitrostjo: a) celoten potek sprememb tlaka, b) podroben prikaz spremembe tlaka ob vklopu in izklopu križnega delovnega položaja ventila

## 4. Rezultati meritev

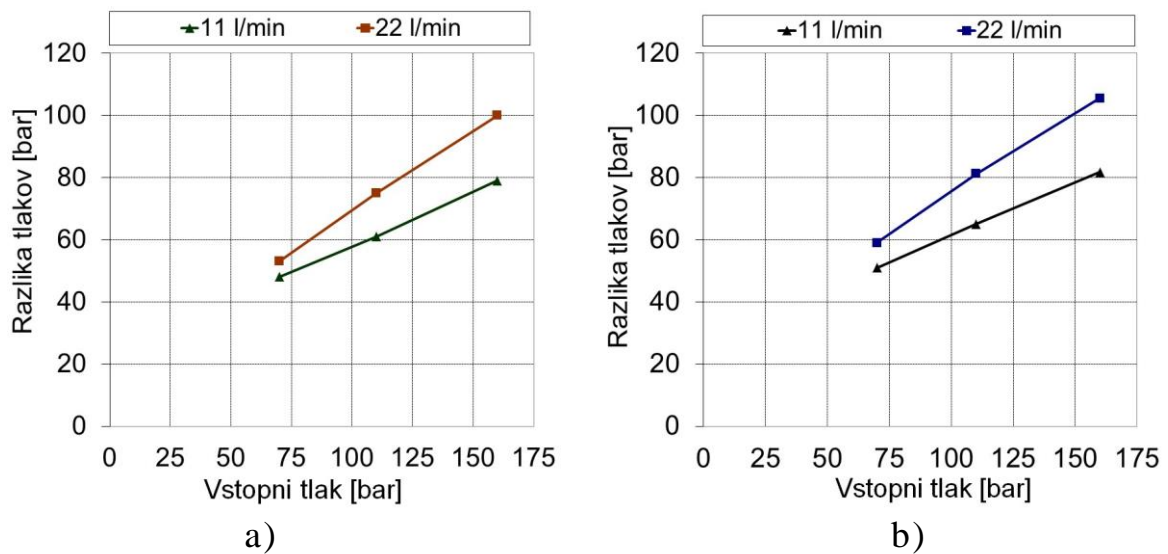
### 4.1. Prva izvedba hidravličnega valja

Rezultate meritev razlike tlakov med vtočnim in iztočnim priključkom hidravličnega valja s skožno batnico brez bremena v horizontalnem položaju, ob začetku gibanja oz. pospeševanju batnice iz mirujočega stanja do končne hitrosti, prikazuje slika 6. Na sliki 6a je prikazana razlika tlakov za oljni hidravlični valj v odvisnosti od pretoka in vstopnega tlaka. Razvidno je, da znaša najmanjša razlika tlakov ob začetku gibanja batnice oljnega hidravličnega valja 48 bar v primeru pretoka 11 l/min in pri vstopnem tlaku 70 bar, največja izmerjena razlika tlakov pri oljnem hidravličnem valju pa 100 bar pri pretoku 22 l/min in vstopnem tlaku 160 bar.

Slika 6b pa prikazuje razlike tlakov pri vodnem hidravličnem valju s skožno batnico, ki je konstrukcijsko ekvivalenten oljnemu. Najmanjša razlika tlakov ob začetku gibanja batnice vodnega hidravličnega valja znaša 51 bar in se je pojavila v primeru pretoka 11 l/min pri vstopnem tlaku 70 bar. Največja izmerjena razlika tlakov pri vodnem hidravličnem valju pa je znašala 105,5 bar in se je pojavila pri pretoku 22 l/min in vstopnem tlaku 160 bar.

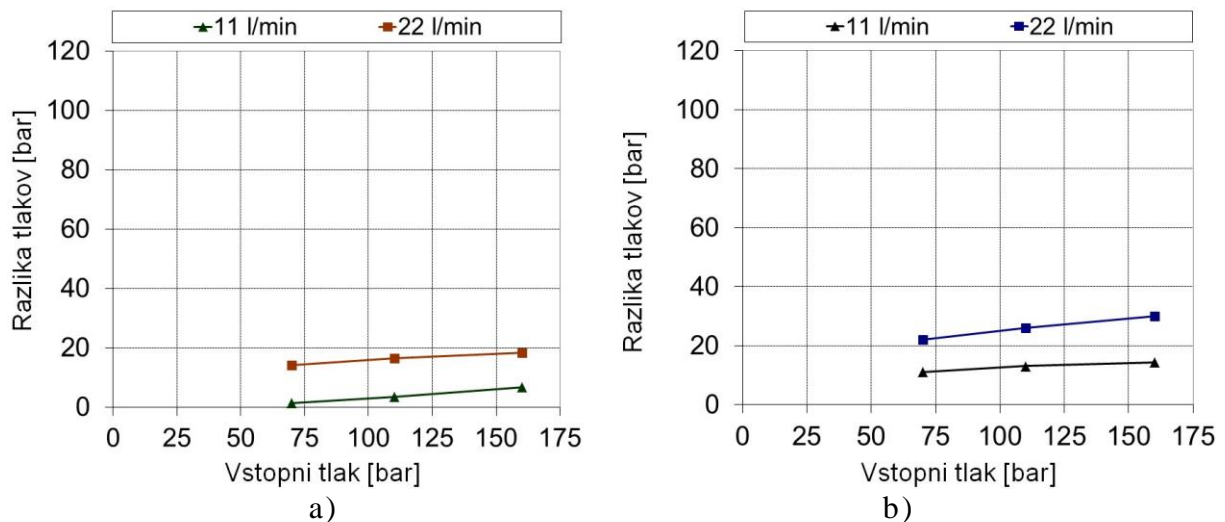
Če primerjamo rezultate meritev razlike tlakov med vtočnim in iztočnim priključkom oljnega in vodnega hidravličnega valja ugotovimo, da je pri vodnem hidravličnem valju ob začetku gibanja (pospeševanju) neobremenjene batnice razlika tlakov potrebna za pospeševanje med 3 in 6 bar višja kot v primeru oljnega hidravličnega valja pri enakih parametrih. Razlog za višje tlačne razlike pri vodnem hidravličnem

valju je verjetno v večjem trenju oziroma v izrazitejšem "lepljenju" tesnil pri začetku gibanja batnice (ang. "stick-slip" efekt).



**Slika 6:** Rezultati meritev razlike tlakov med vstopnim in izstopnim priključkom prvega hidravličnega valja pri speljevanju batnice brez bremena v horizontalnem položaju v odvisnosti od pretoka in tlaka nastavitve varnostnega ventila (vstopni tlak); a) oljna hidravlika, b) vodna hidravlika

Rezultate meritev razlike tlakov med vtočnim in iztočnim priključkom hidravličnega valja s skoznjo batnico brez bremena v horizontalnem položaju pri konstantni hitrosti gibanja batnice, prikazuje slika 7. Na sliki 7a je prikazana razlika tlakov za oljni hidravlični valj v odvisnosti od pretoka in vstopnega tlaka. Najmanjša razlika tlakov na oljnem hidravličnem valju 1,6 bar je bila izmerjena pri pretoku 11 l/min in vstopnem tlaku 70 bar, največja razlika pa je znašala 18,5 bar, in se je pojavila pri pretoku 22 l/min in vstopnem tlaku 160 bar. V primeru ekvivalentnega vodnega hidravličnega valja je najmanjša izmerjena razlika tlakov znašala 11 bar, pri pretoku 11 l/min in vstopnem tlaku 70 bar, ter največja 30 bar, pri pretoku 22 l/min in vstopnem tlaku 160 bar. Pri vodnem hidravličnem valju so razlike tlakov pri konstantni hitrosti gibanja neobremenjene batnice za 7 do 11 bar višje kot v primeru oljnega hidravličnega valja pri enakih pogojih. Tudi v tem primeru je verjetno glavni razlog za večjo tlačno razliko pri vodnem hidravličnem valju večje trenje.



**Slika 7:** Rezultati meritev razlike tlakov med vstopnim in izstopnim priključkom prvega hidravličnega valja pri konstantni hitrosti batnice brez bremena v horizontalnem položaju, v odvisnosti od pretoka in tlaka nastavitve varnostnega ventila (vstopni tlak); a) oljna hidravlika, b) vodna hidravlika

Na podlagi izmerjenih relativno visokih tlačnih razlik, ki se pojavljajo predvsem v primeru pospeševanja batnice, in so verjetno posledica slabše konstrukcijske zasnove in neustreznih tesnil hidravličnega valja, smo se v teku raziskav odločili za novo, izboljšano zasnovo hidravličnega valja.

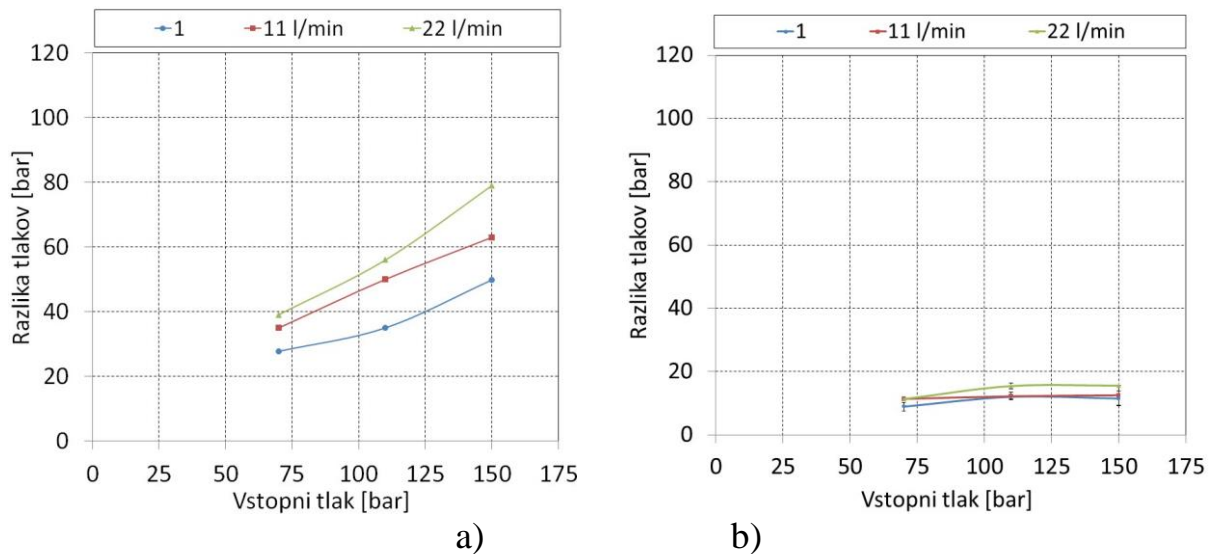
#### 4.2. Izboljšani vodni hidravlični valj

Pri prvi konstrukcijski zasnovi hidravličnega valja s skožno batnico je bilo ugotovljeno, da je pri vodnem hidravličnem valju sicer potrebna večja razlika tlakov za gibanje batnice kot pri oljnem, vendar le-ta pomembneje ne vpliva na samo funkcionalnost hidravličnega valja. To je bil tudi razlog, da smo v nadaljevanju preizkušali samo vodni hidravlični valj, pri različnih parametrih in z dvema različnima kombinacijama tesnil (preglednica 1).

Slika 8 prikazuje rezultate meritev razlike tlakov med vtočnim in iztočnim priključkom izboljšanega vodnega hidravličnega valja s skožno batnico ob začetku gibanja batnice, v odvisnosti od pretoka in vstopnega tlaka. Slika 8a prikazuje rezultate meritev za vodni hidravlični valj s kombinacijo tesnil A. Najmanjša razlika tlakov 28 bar, se je pojavila v primeru pretoka 1 l/min in vstopnem tlaku 70 bar, največja razlika 79 bar pa pri pretoku 22 l/min in pri vstopnem tlaku 150 bar. V primeru uporabe kombinacije tesnil B (slika 8b), pa so potrebne razlike tlakov ob začetku gibanja batnice izrazito nižje, kot pri tesnilih kombinacije A. Razlike tlakov v primeru uporabe kombinacije tesnil B se ob začetku gibanja neobremenjene batnice

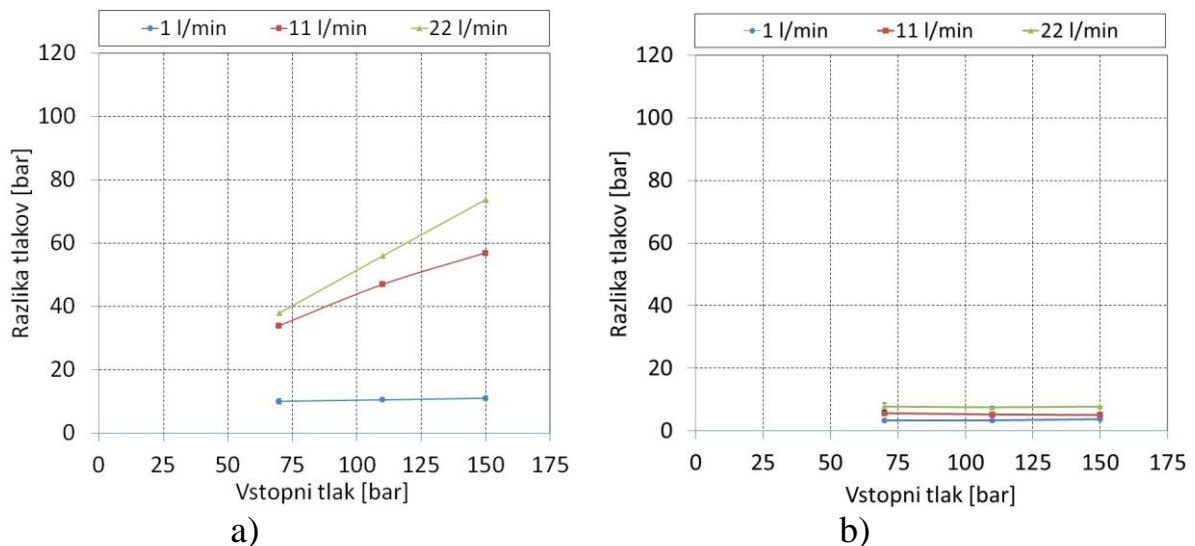


zelo malo spreminjajo s pretokom in vstopnim tlakom in znašajo okoli 12 bar ( $\pm 2$  bar).



**Slika 8:** Rezultati meritev razlike tlakov med vstopnim in izstopnim priključkom izboljšane vodnega hidravličnega valja ob začetku gibanja batnice, brez bremena, v horizontalnem položaju, v odvisnosti od pretoka in tlaka nastavitve varnostnega ventila (vstopni tlak); a) kombinacija tesnil A, b) kombinacija tesnil B

Slika 9 prikazuje izmerjene razlike tlakov med vtočnim in iztočnim priključkom izboljšane vodnega hidravličnega valja s skožno batnico za primer gibanja batnice s konstantno hitrostjo, v odvisnosti od pretoka in vstopnega tlaka. Slika 9a prikazuje rezultate meritev za vodni hidravlični valj s kombinacijo tesnil A. Najmanjša razlika tlakov 10 bar se je v tem primeru pojavila pri pretoku 1 l/min in vstopnem tlaku 70 bar, največja razlika 73 bar, pa pri pretoku 22 l/min in vstopnem tlaku 150 bar. V primeru uporabe kombinacije tesnil B (slika 9b) so, podobno kot v primeru pospeševanja batnice, tudi v primeru gibanja batnice s konstantno hitrostjo, razlike tlakov ob začetku gibanja batnice izrazito nižje kot pri tesnilih kombinacije A. Razlike tlakov v primeru uporabe kombinacije tesnil B se pri konstantni hitrosti gibanja batnice zelo malo spreminjajo s pretokom in vstopnim tlakom in znašajo okoli 5 bar ( $\pm 2$  bar).



**Slika 9:** Rezultati meritev razlike tlakov med vstopnim in izstopnim priključkom izboljšane vodnega hidravličnega valja, pri konstantni hitrosti batnice, brez bremena v horizontalnem položaju, v odvisnosti od pretoka in tlaka nastavitve varnostnega ventila (vstopni tlak); a) kombinacija tesnil A, b) kombinacija tesnil B

## 5. Zaključki

Zasnovana, izdelana in testirana sta bila dva, konstrukcijsko različna hidravlična valja. Izkazalo se je, da je v primeru prve, običajne konstrukcijske rešitve hidravličnega valja razlika tlakov, potrebna tako za pospeševanje kot tudi gibanje batnice s konstantno hitrostjo, nesporejmljivo visoka, tako v primeru oljnega kot tudi vodnega hidravličnega valja.

Rezultati raziskav novega, modularnega vodnega hidravličnega valja kažejo, da je mogoče tudi v primeru vodnega hidravličnega valja z izbiro ustreznih tesnil zmanjšati izgube, t.j. potrebno tlačno razliko na 3 do 8 % od nazivnega tlaka pri premeru bata 32 in batnice 22 mm. V primeru uporabljenih tesnil iz poli-tetrafluor-etilena z dodatkom bronca so za naš primer vodnega hidravličnega valja s skožno batnico znašale tlačne izgube med 3 in 14 bar, kar je nekajkrat manj, kot v primeru uporabe poliuretanskih tesnil.

## Zahvala

Raziskave je delno sofinancirala Slovenska Raziskovalna Agencija (ARRS), proj. L2-9407.

## Literatura

- [1] K. Koskinen, T. Leino & H. Riipinen, Sustainable development with water hydraulics – possibilities and challenges, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium in Fluid Power, Toyama, Japan (1) (2008) 11 – 18.
- [2] F. Majdic & J. Pezdirnik, Advances in Water Power-Control Hydraulics Experimental Research, Journal of Mechanical Engineering 54 (12) (2008) 841-849.
- [3] F. Majdic, J. Pezdirnik & M. Kalin, Experimental validation of the life-time performance of a proportional 4/3 hydraulic valve operating in water, Tribology International 44 (2011) 2013-2021
- [4] Majdič, F, Voda kot kapljevina v pogonsko-krmilni hidravliki, doktorska disertacija, Ljubljana 2010.
- [5] F. Majdic, J. Pezdirnik & M. Kalin, Lifetime test of new water hydraulic proportional directional control valve, The Seventh International Conference on Fluid Power, Aachen, Germany, 7th IFK (2010).
- [6] F. Majdic & J. Pezdirnik, Oscillations of Cylinder Piston Rod – Comparison of Amplitudes and Frequencies Resulting the Transient Phenomena in Tap Water- and Oil-based PCHS, Journal of Vibroengineering 14 (1) (2012) 352-362.

