

Raziskave izkoristka plinskega batnega akumulatorja v vodnohidravličnem sistemu

Franc MAJDIČ, Andrej BOMBAČ

Izveček: Prispevek prikazuje razvoj novega plinskega batnega akumulatorja, primerneza za vodno in oljno pogonsko-krmilno hidravliko. Maksimalen delovni volumen akumulatorja je 4 litre, najvišji dopustni tlak je 390 bar. Prototip akumulatorja je bil zasnovan in izdelan v Laboratoriju za fluidno tehniko ter certificiran v skladu z evropsko direktivo PED 97/23/EC. Z eksperimentalno raziskavo izkoristka dela batnega plinskega akumulatorja smo analizirali sledeče vplive: (i) trajanje posameznih termodinamskih preobrazb dušika (hitre in počasne), (ii) vrsta hidravlične kapljevine (destilirana voda in mineralno hidravlično olje), (iii) tlak predpolnitve dušika (30, 60 in 90 bar) in (iv) lega akumulatorja (horizontalno in vertikalno). Pri tem so bile ugotovljene velike razlike med izkoristki akumulatorja v odvisnosti od trajanja posamezne preobrazbe in tlaka predpolnitve plina (najvišji izkoristek (95 %) je bil izmerjen v primeru počasne preobrazbe plina pri najvišjem tlaku predpolnitve dušika (90 bar)), medtem ko imata hidravlična kapljevine in lega akumulatorja zanemarljiv vpliv.

Ključne besede: pogonsko-krmilna hidravlika, voda, mineralno hidravlično olje, batni hidravlični akumulator, termodinamski proces, politropna preobrazba, izkoristek

■ 1 Uvod

Pogonsko-krmilna hidravlika predstavlja pomembno področje strojništva [1–3], kjer lahko večje količine škodljive hidravlične kapljevine v primeru nesreč ali razlitij povzročijo ekološko katastrofo [4]. Dobro je poznano dejstvo, da kljub ustreznemu vzdrževanju dnevno prihaja do izlitij škodljivih hidravličnih kapljev in v okolico [5]. Uporaba vode kot hidravlične kapljevine pa pomeni velik napredek v smeri varovanja naravnega okolja in pitnih voda. Pri uporabi vode kot hidravlične kapljevine so drugačne predvsem dinamične in mazalne lastnosti, to pa zahteva izbiro novih materialnih parov glede triboloških lastnosti in drugačno

konstrukcijsko zasnovano vodnohidravličnih sestavin in sistemov [6].

Prva industrijska hidravlična naprava, hidravlična stiskalnica, patentirana leta 1795, je za svoje delovanje potrebovala vodo brez dodatkov [7]. Leta 1851 je Armstrong [8] na osnovi Bramahove ideje o visokotlačni batni črpalki (iz leta 1812) izumil hidravlični akumulator. Po tej iznajdbi se je hidravlični akumulator začel množično uporabljati za dušenje nihanja tlakov [9] in za shranjevanje [10, 11] hidravlične energije. Po pojavu mineralnega hidravličnega olja na trgu leta 1906 se voda kot hidravlična kapljevine skoraj sedemdeset let ni več uporabljala [6]. Danes je že najti na trgu nekaj preprostejših vodnohidravličnih sestavin in sistemov. V primerjavi z oljnohidravličnimi sistemi pa primanjkuje veliko kompleksnejših sestavin za gradnjo zahtevnejših industrijskih vodnohidravličnih sistemov [12]. Glede na zapisano je jasno, da je nujno raz-

viti nove vodnohidravlične sestavine. Vodnohidravlični plinski batni akumulator je ena od sestavin, ki se uporablja v večini hidravličnih sistemov, a še vedno primanjkuje znanja o razvoju in obnašanju teh akumulatorjev [12]. Poleg omenjenega je v literaturi [13] najti izboljšave izkoristka hidravličnih akumulatorjev z uporabo toplotne regeneracije znotraj akumulatorja z različnimi polnili.

Omenjeni razlogi so nas motivirali za razvoj novega batnega plinskega akumulatorja za uporabo v vodni hidravliki, kar pogojuje nekaj posebnih zahtev. Relativno »slaba« hidravlična kapljevine, kot npr. voda, predstavlja nevarnost pojava večjega trenja in obrabe drsnih površin, kar pri zasnovi novega batnega akumulatorja narekuje poznavanje triboloških razmer, možnost obdelave in ceno.

Prispevek prikazuje rezultate eksperimentalne raziskave novega batne-

Doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., doc. dr. Andrej Bombač, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

ga plinskega akumulatorja, ki je bil zasnovan in izdelan v Laboratoriju za fluidno tehniko. Meritve na novem hidravličnem akumulatorju so bile izvedene pri uporabi dveh kapljev (destilirana voda in mineralno hidravlično olje), pri treh različnih tlakih predpolnitve dušika (30, 60 in 90 bar), s štirimi različnimi termodinamskimi procesi (cikel 1, cikel 2, cikel 3 in cikel 4) in dvema različnima legama akumulatorja (horizontalno in vertikalno). Rezultati meritev kažejo izrazite razlike med izkoristki naprave in razvrščajo posamezne vplive glede na izkoristek. Najvišji izkoristki so tako bili izmerjeni pri počasnih termodinamskih preobrazbah in visokih tlakih predpolnitve plina, medtem ko lega akumulatorja in vrsta hidravlične kapljevine nimata pomembnejšega vpliva.

■ 2 Eksperimentalni del

2.1 Prototip – hidravlični akumulator

Novi vodnohidravlični batni plinski akumulator (slika 1) je bil zasnovan tako [17], da je lahko preprosto zamenjati tesnila ter testirati tribološko in hidravlično obnašanje drsnega kontakta znotraj batnega hidravličnega akumulatorja pri uporabi vode



Slika 1. Prototip vodnohidravličnega batnega plinskega akumulatorja

oziroma hidravličnega olja. Testirani akumulator ima maksimalen delovni volumen 4 litre in najvišji dopustni tlak 390 bar. Prototip akumulatorja je bil izdelan in certificiran v skladu z evropsko direktivo PED 97/23/EC. Hidravlični batni akumulator sestavljajo: bat s posebnimi tesnili in vodilnima obročema za dušik in vodo, cev, batnica, dva končna pokrova, dve temperaturni in dve tlačni zaznavali ter merilnik pomika bata. Nujna dodatna oprema so še prednastavljeni tlačni reducirni ventil in dva zaporna ventila.

2.2 Preizkuševališče

Slika 2 prikazuje vodno preizkuševališče (a) s plinskim akumulatorjem v vertikalni legi (b), na sliki 3 pa je prikazana hidravlična funkcijska

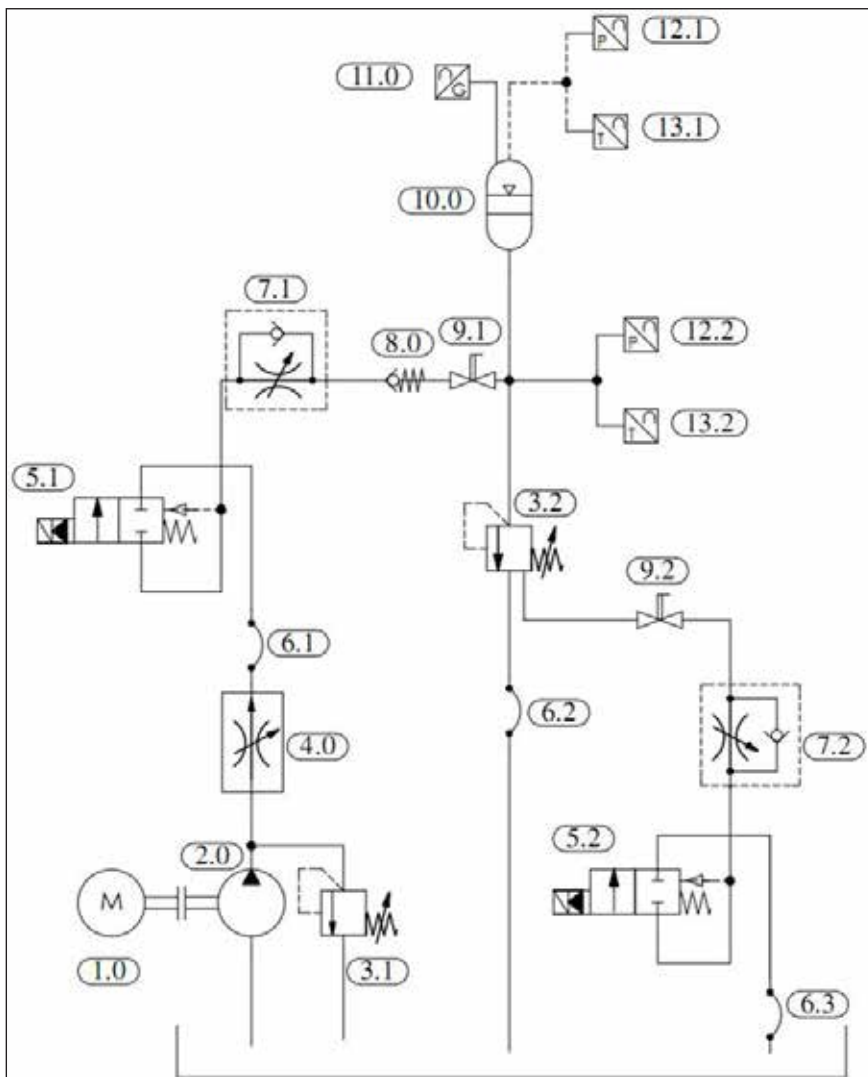
shema vodnohidravličnega preizkuševališča, ki je bilo uporabljeno za raziskave novega akumulatorja. Batni plinski akumulator je bil testiran z vodo na vodnem preizkuševališču in z mineralnim hidravličnim oljem na oljnem hidravličnem preizkuševališču, ki je bilo funkcionalno enako vodnemu (slika 3). Vodnohidravlično preizkuševališče sestavljajo: rezervoar, vrstna batna črpalka (poz. 2.0) s pogonskim elektromotorjem (poz. 1), glavni tlačni omejitni ventil (poz. 3.1), tokovni ventili (poz. 4.0, 7.1 in 7.2), 2/2-potna ventila (poz. 5.1 in 5.2), protipovratni ventil (poz. 8.0), prototip hidravličnega batnega akumulatorja (poz. 10.0), dve tlačni zaznavali (poz. 12.1 in 12.2), dve temperaturni zaznavali (poz. 13.1 in 13.2) in merilnik pomika bata plinskega akumulatorja (poz. 11.0). Najvišji tlak, ki je bil nastavljen na tlačnem omejitnem ventilu (poz. 3.1), je bil 150 bar. Tlaki in temperature plina in kapljevine ter pomik bata akumulatorja so bili merjeni in nadzirani z lastnim programom, razvitim v Laboratoriju za fluidno tehniko. Vodno- in oljno-hidravlično preizkuševališče sta bili v celoti sestavljeni iz sestavin, dostopnih na tržišču. Meritve so bile izvedene z destilirano vodo in mineralnim hidravličnim oljem ISO VG 46 [18].

2.3 Testirani parametri

Nov vodnohidravlični batni akumulator je bil testiran v različnih kombinacijah uporabljenih hidravličnih kapljev, različnih tlakov predpolnitve plina, položajev akumulatorja in različnih termodinamskih procesov. Kombinacije so povzete shematično na sliki 4. Aplikacijo osnovnih zako-



Slika 2. a) Vodno preizkuševališče, ki je preko gibke cevi povezano z batnim plinskim akumulatorjem v vertikalni legi.



Slika 3. Hidravlična funkcijska shema preizkuševališča

nitosti termodinamike, kot je prenos toplote, je najti na številnih področjih [19] industrijske dejavnosti, kjer se intenzivnost procesa posredno lahko opiše kot časovna odvisnost. Termodinamski proces je v osnovi zaporedje posamičnih termodinamskih preobrazb, ki si sledijo. Termodinamske preobrazbe plina lahko obravnavamo glede na trajanje same preobrazbe (kompresija, ekspanzija) po viru [15] z modelom za idealni plin:

$$p V^n = m R T \quad (1)$$

kjer pomenijo: p – tlak plina [N/m^2], V – volumen plina [m^3], T – absolutna temperatura [K] in R – plinska konstanta plina (N_2) [J/kgK]. V literaturi [5,15] je najti priporočila glede načrtovanja in snovanja plinskega batnega akumulatorja, obravnava kompresije oziroma ekspanzije plina pa je vezana na izmenjavo toplo-

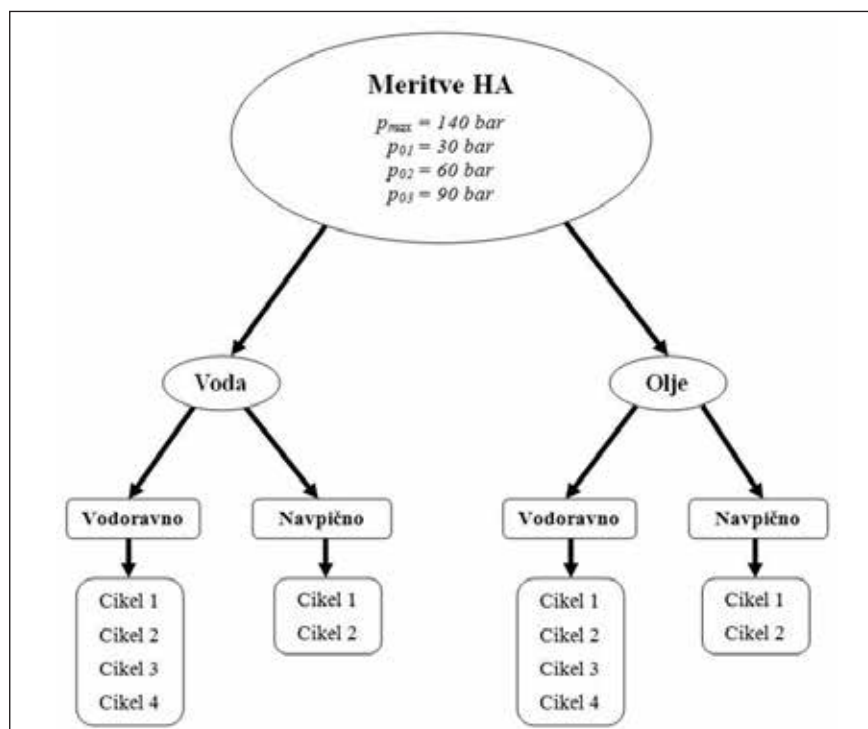
te z okolico. Tako je počasnejša preobrazba ($t \geq 180$ s) obravnavana kot izotermna preobrazba (eksponent politrope je v tem primeru $n = 1$).

Pri hitri kompresiji/ekspanziji plina, kjer je trajanje preobrazbe krajše ($t < 60$ s), pa je preobrazba obravnavana kot adiabatna (eksponent politrope je za dvoatomni plin (dušik v našem primeru) $n = 1,4$). Pri trajanju kompresije/ekspanzije med ($60 \leq t \leq 180$ s) velja preobrazba kot politropna z eksponentom politrope ($1 \leq n \leq 1,4$), pri čemer je eksponent odvisen od trajanja preobrazbe $n = -\frac{1}{300}t + 1,6$. V nadaljevanju so bili izvedeni naslednji termodinamični cikli (slika 5):

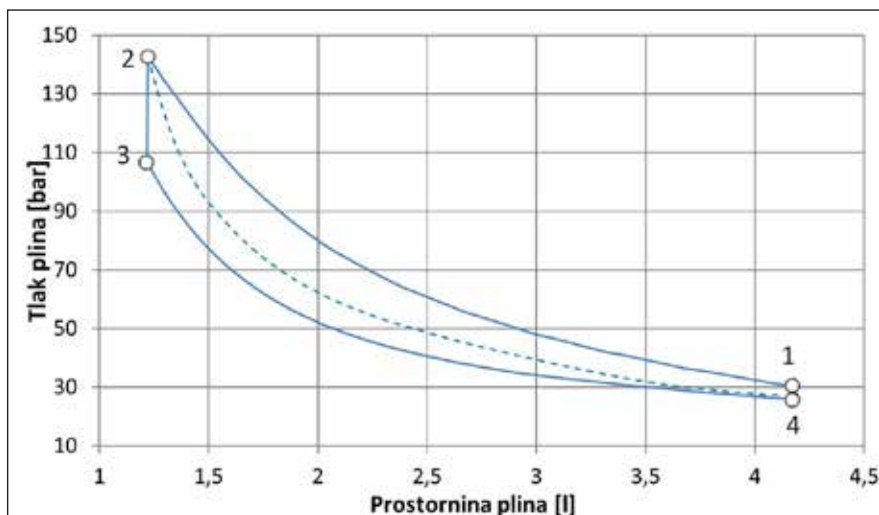
cikel 1: hitra kompresija 1–2, izohorno ohlajanje plina 2–3 (3 min), hitra ekspanzija plina 3–4 in ponovno izohorno segrevanje plina 4–1 (3 min);

cikel 2: srednje hitra kompresija 1–2, izohorno ohlajanje plina 2–3 (3 min), srednje hitra ekspanzija 3–4 in ponovno izohorno segrevanje plina 4–1 (3 min);

cikel 3: počasna kompresija 1–2, izohorno ohlajanje plina 2–3 (3 min), počasna ekspanzija 3–4 in ponovno izohorno segrevanje plina 4–1 (3 min).



Slika 4. Testirani parametri vodnohidravličnega batnega plinskega akumulatorja



Slika 5. Termodinamski proces batnega plinskega akumulatorja

Vsem trem ciklom je skupno izohorno ohlajanje 2–3 po kompresiji 1–2 in po ekspanziji plina 3–4 izohorno segrevanje plina 4–1 do začetne temperature, kot je razvidno iz primera krožnega procesa na sliki 5.

cikel 4: hitra kompresija plina 1–2, ki ji sledi takojšnja hitra ekspanzija plina 2–4 in izohorno segrevanje plina 4–1 do začetne temperature.

Izkoristek pri vseh omenjenih procesih je definiran kot razmerje med pridobljenim delom pri ekspanziji plina (W_{eks}) v batnem akumulatorju in vložnim delom pri kompresiji plina (W_{kom}).

3 Rezultati meritev in analiza

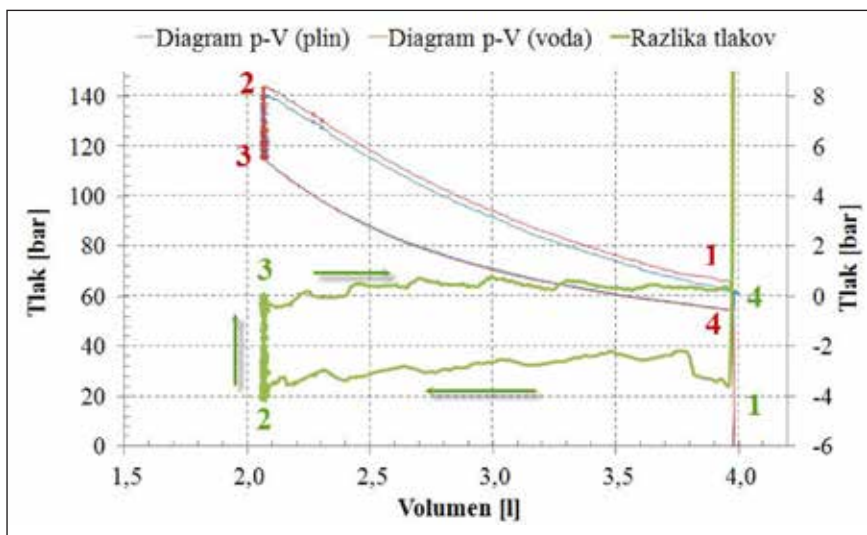
3.1 Trenje tesnil

Že pri montaži bata in batnice v ohišje akumulatorja smo zaznali trenje tesnil. Na to opozarjajo tudi v literaturi [9, 15], kjer je predstavljena primerjava poteka tlaka plina in kapljevine pri različnih tesnilih.

Slika 6 prikazuje izmerjeno razliko tlakov pri termodinamičnem ciklu 1 in predpolnitvi dušika 60 bar na vodnohidravličnem sistemu v horizontalni legi hidravličnega akumulatorja. Na podlagi izmerjene razlike tlakov med plinsko in vodno stranjo lahko v diagramu p - V s trapezno metodo izračunamo izgubljeno delo zaradi trenja tesnil. Tako znašajo izgube dela zaradi trenja pri kom-

presiji za omenjeni primer 291 J, pri ekspanziji pa zgolj 98 J; glej *tabela 1*, kjer so prikazane vrednosti in spremljajoči parametri še za tlaka predpolnitve 30 bar in 90 bar za cikel 1 za vodnohidravlični sistem in sistem z mineralnim hidravličnim oljem.

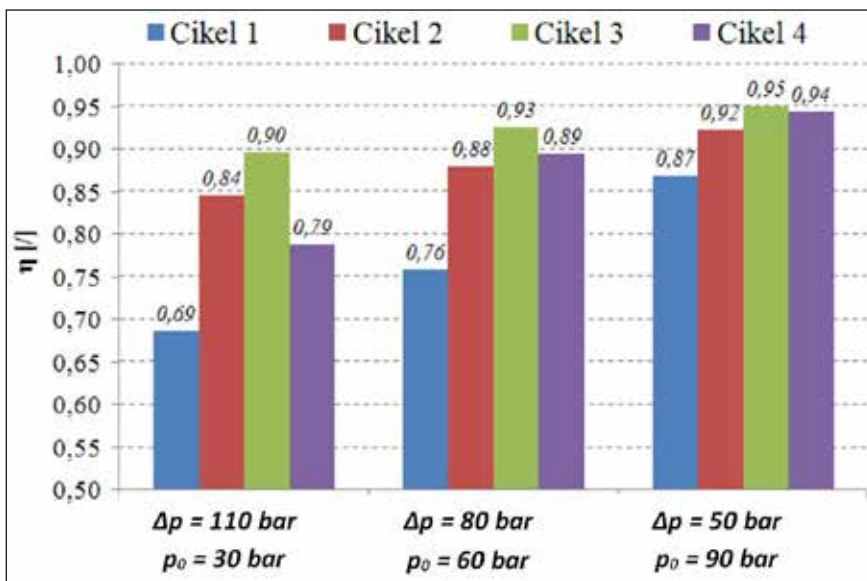
Ob predpolnitvi dušika s tlakom 60 bar je zelo velika razlika med izgubljenim delom v fazi kompresije v primerjavi s fazo ekspanzije. Razlog za približno do 3-krat nižjo vrednost pri ekspanziji plina v vodnohidravličnem sistemu je lahko v različnih triboloških lastnostih kontaktne para (tesnila/površina valja). Pri ekspanziji plina se bat pomika po »mokri« površini, ki je bila pred tem v kontaktu z vodo, medtem ko pri kompresiji tesnila nalegajo na »suho« površino. Izgube dela zaradi trenja tesnil pa predstavljajo, glede na celotno vloženo delo pri kompresiji plina, 1,6 %, medtem ko znašajo pri ekspanziji plina približno 0,7 %. Prikaz izgube zaradi trenja tesnil v diagramu p - V podaja slika 5, posamične vrednosti so prikazane v



Slika 6. Izmerjena razlika tlakov pri ciklu 1 in predpolnitvi 60 bar na vodnohidravličnem sistemu v horizontalni legi

Tabela 1. Izgube dela zaradi trenja pri kompresiji in ekspanziji plina v batnem akumulatorju

P_0	Cikel 1, voda – N_2					Cikel 1, hidravlično olje – N_2				
	trajanje preob. t_k [s]	$W_{izg, kom}$ [J]	trajanje preob. t_e [s]	$W_{izg, eks}$ [J]	$W_{izg, kom} / W_{izg, eks}$	trajanje preob. t_k [s]	$W_{izg, kom}$ [J]	trajanje preob. t_e [s]	$W_{izg, eks}$ [J]	$W_{izg, kom} / W_{izg, eks}$
30	25,6	209	24,5	35	5,97	16,3	175	20	519	0,337
60	15,5	291	33,4	98	2,96	15,8	553	5,3	447	1,23
90	20,5	208	20,2	89	2,34	15,3	511	7,7	153	3,34



Slika 7. Vpliv tlaka predpolnitve in procesa na izkoristek hidravličnega batnega plinskega akumulatorja na vodnohidravličnem sistemu; horizontalna lega

tabeli 1. Pri tlaku predpolnitve dušika 30 bar je opisano razmerje celo 6-kratno v vodnohidravličnem sistemu. Podobno je pri uporabi batnega akumulatorja v oljnohidravličnem sistemu pri višjih tlakih, medtem ko je najti izrazito nasprotje pri najnižjem tlaku predpolnitve, skoraj trikrat manjše izgube dela zaradi trenja.

3.2 Vpliv tlaka predpolnitve dušika in vrste termodinamičnega procesa na delovanje batnega plinskega akumulatorja

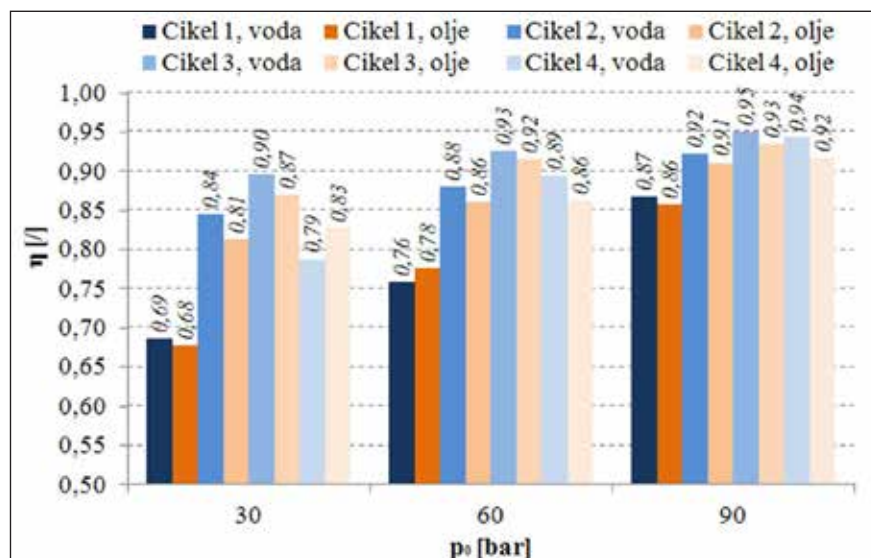
Na *sliki 6* je razviden vpliv tlaka predpolnitve in vrste termodinamičnega procesa (pogl. 2.3) na izkoristek akumulatorja, merjen na vodnohidravličnem sistemu. Pri vseh štirih ciklih se je izkazalo, da se izkoristek z dviganjem tlaka predpolnitve izboljša. Z dvigom tlaka predpolnitve dušika s 30 na 90 bar se izkoristek pri prvem ciklu izboljša za 18 %, pri ciklu 2 za 8 %, pri ciklu 3 za 5 % in pri ciklu 4 za 15 %. Večji kot je tlak predpolnitve, manjše so razlike med izkoristki med posameznimi cikli. Manjša kot je razlika med največjim delovnim tlakom in tlakom predpolnitve, boljši je izkoristek. Najslabši izkoristek akumulatorja (69 %) smo izmerili pri »hitrem« procesu (cikel 1). Najboljši izkoristek akumulatorja (95 %) pa smo izmerili pri počasnem

procesu, cikel 3.

3.3 Vpliv kapljevine na delovanje hidravličnega akumulatorja

Primerjavo dejanskih izkoristkov na podlagi 12 meritev, opravljenih na vodnohidravličnem sistemu, in 12 meritev, opravljenih na oljnohidravličnem sistemu, prikazuje *slika 8*. Rezultati kažejo, da je le v dveh primerih (cikel 4, p₀ = 30 bar, in cikel 1, p₀ = 60 bar) izkoristek batnega hidravličnega akumulatorja pri uporabi olja kot hidravlične kapljevine večji kot pri vodi. V vseh ostalih

primerih je dejanski izkoristek boljši pri uporabi vode kot hidravlične kapljevine. Razlike so najvišje pri nižjih tlakih predpolnitve dušika in so v velikostnem razredu od 1 % do 4 % v prid uporabe vode. Manjše razlike se pojavijo pri višjih tlakih predpolnitve akumulatorja z dušikom in so v velikostnem razredu od 1 % do 2 %. Vzrok za slabše izkoristke pri olju je verjetno njegova visoka kinematična viskoznost, ki znaša 30 mm²/s pri optimalni delovni temperaturi 50 °C. Pri vodi pa je kinematična viskoznost pri optimalni delovni temperaturi 40 °C 0,67 mm²/s, kar je približno 48-krat manj kot pri olju [16]. Razlog bi lahko bil tudi v zamenjavi hidravličnega sistema, kjer smo batni akumulator polnili z oljno črpalko, ki ima drugačno iztisnilno kot vodna črpalka. Upoštevati je treba tudi, da so se časi posameznih termodinamskih preobrazb delno razlikovali pri meritvah na oljnohidravličnem in vodnohidravličnem sistemu. Pri meritvah smo namreč pretok hidravlične kapljevine, ki definira trajanje termodinamične preobrazbe plina, uravnavali s tokovnim ventilom, dušilkami in ventili. Z razpoložljivimi sestavinami za uravnavanje pretoka hidravlične kapljevine žal ni bilo mogoče nastaviti enakega časa npr. kompresije plina od p₀ do p_max za posamezno preobrazbo pri merjenju različnih parametrov. Kljub naštetim možnim vzrokom pa rezultati izkoristkov ka-



Slika 8. Vpliv kapljevine na izkoristek batnega hidravličnega plinskega akumulatorja, prikazan pri treh predpolnitvah in štirih različnih termodinamskih ciklih v preobrazbah; horizontalna lega

žejo v prid vodni hidravliki. Najslabši izkoristek batnega plinskega akumulatorja pri uporabi vode (69 %) smo izmerili pri kratkotrajni kompresiji/ekspanziji plina (cikel 1, cikel 4). Prav tako smo izmerili najslabši izkoristek pri uporabi olja (68 %) pri ciklu 1 in tlaku predpolnitve dušika 30 bar. Najboljši izkoristek akumulatorja pri uporabi vode (95 %, olja 93 %) pa smo izmerili pri počasnem termodinamičnem procesu (cikel 3).

3.4 Vpliv lege hidravličnega akumulatorja

Izkoristki na *sliki 9* izhajajo iz meritev hidravličnega akumulatorja v vertikalni in horizontalni legi pri različnih tlakih predpolnitve, pri dveh različnih termodinamskih ciklih in uporabi dveh hidravličnih kapljev.

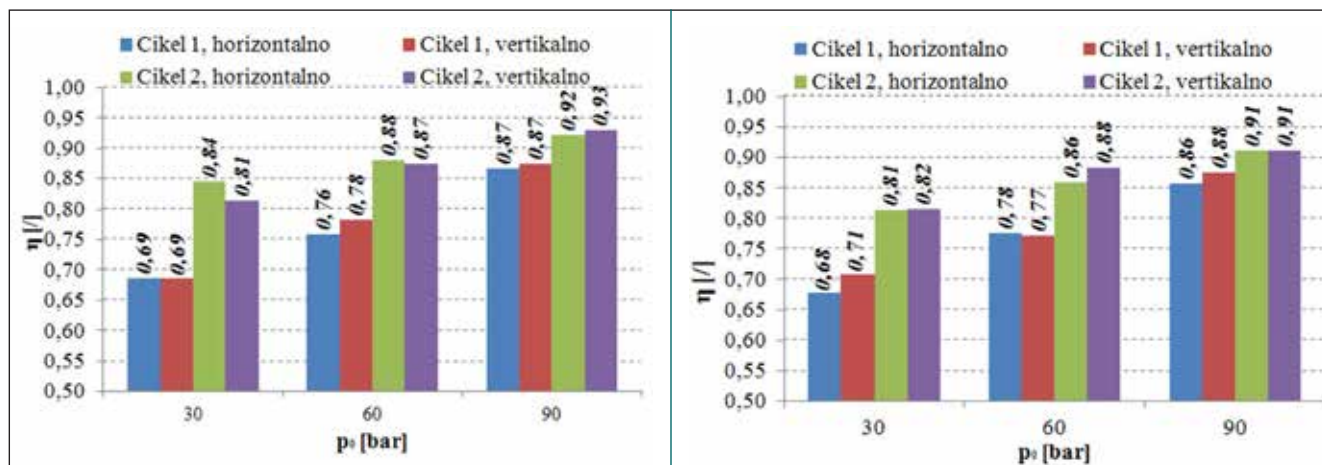
brazbe, lega akumulatorja ter vrsta hidravlične kapljevine. Analizirana je bila ponovljivost meritev. Srednja vrednost relativne napake je bila $\pm 0,3$ %. Na podlagi dobljenih rezultatov je mogoče sklepati, da so pri enakih obratovalnih pogojih nadaljnje meritve enake ponovljivosti.

Rezultati analize kažejo, da različni tlaki predpolnitve akumulatorja vplivajo na izkoristek, saj se je izkoristek pri povečanju tlaka predpolnitve s 30 na 90 bar pri ciklu 1 izboljšal za 18 %, pri ciklu 2 za 8 %, pri ciklu 3 za 5 % in pri ciklu 4 za 15 %. Večji kot je tlak predpolnitve, manjše so razlike med izkoristki posameznih ciklov. Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da se je pri vseh izmerjenih ciklih z večanjem tlaka predpolnitve

V vseh ostalih primerih je dejanski izkoristek boljši pri uporabi vode kot hidravlične kapljevine. Razlike so najvišje pri nižjih tlakih predpolnitve in znašajo do 4 % in se manjšajo z večanjem tlaka predpolnitve akumulatorja.

Kot izhaja iz analize rezultatov meritev izkoristkov tako pri vodno- kot oljnih hidravličnem sistemu, vpliv lege hidravličnega akumulatorja nima bistvenega pomena za njegovo delovanje.

Predstavljeni rezultati meritev novega hidravličnega batnega plinskega akumulatorja kažejo v splošnem boljši izkoristek pri uporabi vode kot pri uporabi mineralnega hidravličnega olja. To nas navdaja z optimizmom za nadaljnji razvoj vodne pogonsko-krmilne hidravlike.



Slika 9. Dejanski izkoristki pri različnih legah akumulatorja, izmerjeni na ciklu 1 in ciklu 2, treh tlakih predpolnitve plina, izmerjeni na a) vodnohidravličnem in b) oljnihidravličnem sistemu

Izkoristki, določeni tako na vodnohidravličnem kot oljnihidravličnem sistemu, kažejo, da vpliv lege hidravličnega akumulatorja nima bistvenega pomena. Razlike pri obravnavanih legah so med 0 in 3 %.

4 Zaključek

Po postavitvi in zagonu vodnohidravličnega preizkuševališča so bili najprej kalibrirani vsi merilni elementi. Na hidravličnem batnem plinskem akumulatorju, polnjenem z dušikom, so bili izvedeni nizi meritev vpliva različnih dejavnikov na delovni izkoristek akumulatorja. Ti dejavniki so: tlak predpolnitve plina, trajanje termodinamične preo-

batnega plinskega akumulatorja izkoristek izboljšal.

Trajanje termodinamskih preobrazb vpliva na izkoristek akumulatorja. Pri počasnih termodinamskih preobrazbah (cikel 2 in cikel 3) je bil izkoristek boljši do 21 % v primerjavi s hitrimi preobrazbami. Do 10 % pa se izboljša izkoristek, če po kompresiji plina takoj izvedemo ekspanzijo.

Analiza rezultatov vpliva (vrste) hidravlične kapljevine je pokazala, da je le v dveh primerih od osmih (cikel 4, $p_0 = 30$ bar, in cikel 1, $p_0 = 60$ bar) izkoristek batnega plinskega akumulatorja pri uporabi olja kot hidravlične kapljevine večji kot pri vodi.

Literatura

- [1] Murrenhoff, H., Grundlagen der Fluidtechnik Teil 1: Hydraulik, 5th ed., IFAS, RWTH Aachen University, Shaker, Aachen, Germany, 2007.
- [2] Findeisen, D., Ölhydraulik, 5th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] Murrenhoff, H., Servohydraulik, first ed., RWTH Aachen University, Shaker, Aachen, Germany, 1998.
- [4] Kržan, B., Vižintin, J., Environmentally adapted lubricants, Ventil 15 (3) 280–286, 2009.
- [5] Bartz, W. J., Lubricants and the environment, Tribology

- Intern. 31, p. 35–47, 1998.
- [6] Trostmann, E., Water hydraulics control technology, Technical University of Denmark, Lyngby, 1996.
- [7] Bramah, J., The Hydraulic Press, UK Patent No. 2045, 1795.
- [8] Gibson, J. W., Pierce, M., C., Remnants of Early Hydraulic Power Systems, 3rd Australasian Engineering Heritage Conference 2009.
- [9] Drexler, P., Faatz, H., Planning and Design of Hydraulic Power System, in The Hydraulic Trainer Volume 3, Mannesmann Rexroth AG, Würzburg, 1988.
- [10] James, D., Constant pressure hydraulic energy storage through a variable area piston hydraulic accumulator, Department of Mechanical Engineering, Vol. 105, str. 262–270, University of Minnesota, 111 Church St. SE, Minneapolis, United States, 2013.
- [11] Pourmovahed, A., Sizing energy storage units for hydraulic hybrid vehicle applications, Am Soc Mech Eng, Dyn Syst Control Div, str. 231–246, New Orleans, LA, 52, 1993.
- [12] Koskinen, K., Leino, T., Rii-pinen, H., Sustainable development with water hydraulics – possibilities and challenges, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium in Fluid Power, 2008, Toyama, Japan, Vol. 1, pp. 11–18.
- [13] Stroganov, A., Sheshin, L., Improvement of Heat-Regenerative Hydraulic accumulators, Ventil 17 (4) 322–334, 2011.
- [14] Majdic, F., Pezdinik, J., Advances in Water Power-Control Hydraulics Experimental Research, J. Mech. Eng. 54 (12) (2008) 841–849.
- [15] Korkmaz, F., Hydrospeicher als energiespeicher, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- [16] Majdič, F.: Voda kot kapljevina v pogonsko-krmilni hidravliki. Doktorsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2010.
- [17] Konda, S., Batni hidravlični akumulator za vodno pogonsko-krmilno hidravliko. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2012.
- [18] Demšar, J., Raziskave karakteristik vodnega batnega hidravličnega akumulatorja. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2013.
- [19] Bombač, A., Beader, D., Žun, I., Mixing times in a stirred vessel with a modified turbine. *Acta chimica slovenica*, 59 /4, 707–721, 2012.

Work efficiency of the new water hydraulic piston-type gas accumulator

Abstract: Environmental protection regulations are becoming increasingly stricter, so the storage and regeneration of energy are of great importance. In this paper, a newly-developed 4-litre water-hydraulic accumulator of working pressure up to 390 bars is presented. A prototype was manufactured and certificated by the European pressure directive PED 97/23/EC. The results, based on the measurements of the characteristic properties of the hydraulic dynamics and thermodynamic changes of the gas (nitrogen) in the hydraulic accumulator using two different liquids (hydraulic oil and water), are presented and compared for three different preset pressures of nitrogen (30, 60 and 90 bars) and four different thermodynamic processes. A significant difference in the efficiency of the tested hydraulic accumulator was found, depending on the duration of the thermodynamic transformation, the preset filling pressure of the nitrogen, and the type of working fluid.

Keywords: power-control hydraulics, water, mineral hydraulic oil, piston-type hydraulic accumulator, thermodynamic process, efficiency



TEHNOLOŠKI PARK LJUBLJANA
01

t: 01 620 34 03
f: 01 620 34 09
e: info@tp-lj.si
www.tp-lj.si

Tehnološki park Ljubljana d.o.o.
Tehnološki park 19
SI-1000 Ljubljana