

RAZVOJ MINIATURNEGA PROPORCIONALNEGA HIDRAVLIČNEGA VENTILA ZA KRMILJENJE GIBOV HUMANOIDNEGA ROBOTA

Dominik Božič, Franc Majdič

Izvleček:

Za krmiljenje hidravličnih nog humanoidnega robota je bilo treba zasnovati in optimizirati hidravlični proporcionalni ventil čim manjše mase in velikosti. Poleg kompaktnosti mora ventil za hitre gibe robota omogočati velike pretoke, hkrati pa zagotoviti čim manjše notranje puščanje. Zaradi boljšega tesnjenja in poenostavljene izdelave so na krmilnem batu uporabljena tesnila. Izvedene so bile numerične simulacije osnovnih karakteristik ventila in rezultati primerjani z meritvami na izdelanem prototipu.

Ugotovljeno je, da novo razviti zasučni ventil v primerjavi z običajnimi proporcionalnimi ventili dosega bistveno boljše rezultate glede notranjega puščanja in pretočnih karakteristik, je manjši in enostavnejši za izdelavo.

Ključne besede:

hidravlika, humanoidni roboti,, zasučni proporcionalni ventili, tesnjenje v ventilih, krmiljenje s servomotorjem

1 Uvod

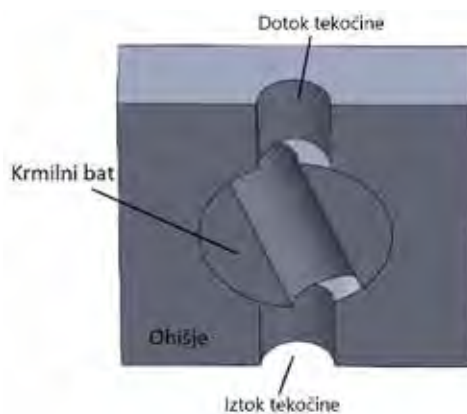
Hidravlika v današnjem času predstavlja nepogrešljiv del pogonske tehnike, tako na področju industrije, mobilnih strojev kot tudi v hitro razvijajočih se humanoidnih – človeku podobnih robotih.

Za gibanje posameznih delov robotov uporabljamo različne oblike pogona izvršnih sestavin. Mednje sodijo električni akuatorji, pnevmatični valji (predvsem na področju medicine za rehabilitacijo bolnikov [1]), ter hidravlični pogoni, ki imajo zaradi gostote moči, velikosti, varovanja pred preobremenitvijo in dobrega prilagajanja dinamičnim obremenitvam mnoge prednosti. Hidravlični sistem za pogon humanoidnega robota uporablja tudi eden izmed najbolj znanih ameriških razvijalcev [2].

V prispevku predstavljamo glavne korake razvoja in ugotovitve, do katerih smo prišli med testiranjem izdelanega prototipa zasučnega proporcionalnega ventila, ki smo ga razvili na podlagi sklepanja o manjših tokovnih silah pri zasučni izvedbi ventila [3].

2 Teoretična izhodišča

Potni ventili so hidravlične sestavine za krmiljenje pretoka olja v izvršne enote in iz njih. Z njimi omogočamo njihovo delovanje, spreminjanje smeri in hitrosti. Delujejo na principu ustvarjanja tlačne razlike, ki se pojavi ob zmanjševanju odprtine, čez katero teče tekočina. Glede na geometrijsko obliko in način delovanja lahko drsniške potne ventile delimo na vzdolžno pomične in na zasučne. Vzdolžno pomični se na vseh področjih hidravlike zelo uporabljajo, medtem ko se zasučni ventili (*slika 1*) v hidravliki uporabljajo za posebne namene [4].



Slika 1 : Princip krmiljenja pretoka tekočine z zasukom krmilnega bata v prerezu

Dominik Božič, univ. dipl. inž., doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Glavne slabosti vzdolžno pomičnih ventilov so predvsem notranje puščanje in močen vpliv tokovnih sil. Notranje puščanje je posledica reže med ohišjem in krmilnim batom, ki je potrebna za zagotavljanje delovanja ventila, saj s postopki izdelave ne moremo izdelati idealnih sestavnih delov in imamo vedno nekaj odstopanja.

Področje zasučnih ventilov je v splošni hidravliki manj zastopano, uporabljajo pa se v določenih posebnih primerih, tudi za krmiljenje humanoidnih robotov [5]. Raziskava kartušne izvedbe zasučnega ventila [3] je pokazala, da lahko z zelo majhnimi krmilnimi močmi direktno krmilimo tudi velike pretoke, celo do 1000 l/min.

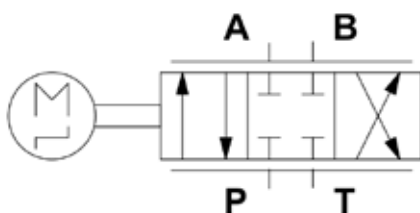
Osnovna ideja delovanja novega ventila temelji na kotni odvisnosti položaja bata v ohišju. Skozi obe komponenti je narejena izvrtina, tako da ta poteka radialno skozi središče bata (*slika 1*).

V popolnoma odprtem stanju to predstavlja le kanal skozi ohišje in bat, brez spremembe pretočnega preseka, kar pomeni minimalne izgube tlačne energije pri pretakanju tekočine. Z vrtenjem bata dosežemo spreminjanje pretočnega preseka odprtine na stičišču bata in ohišja in s tem različen pretok. S tovrstno izvedbo se izognemo predvsem vplivom tokovnih sil na krmilnih delih, ki se v klasičnih vzdolžno-pomičnih ventilih odražajo na ravnih kolobarjastih ploskvah, kjer povzročajo nekontrolirano gibanje bata, ki ga mora krmilnik skupaj z elektromagneti kompenzirati.

3 Razvoj novega zasučnega ventila

Po principu zasučnega ventila je bil zasnovan grobi model 4/3 ventila (*slika 2*), primeren za krmiljenje dvosmernih hidravličnih valjev nog humanoidnega robota [6], pri čemer so bila upoštevana priporočila dobrih praks za konstruiranje hidravličnih komponent.

S spremembo giba bata ventila iz premega gibanja v rotacijo okrog iste osi smo dosegli, da se bat med delovanjem vzdolžno ne premika prek ostrih robov. Tako so za doseganje boljšega tesnjenja na batu izdelani utori za tesnila, kot je prikazano na *sliki 3*. Ker bat sučemo, so uporabljeni dinamični tesnilni obroči X. Da bi dosegli dobro tesnjenje, je bilo treba posamezne prekate (območja na krmilnem batu in



Slika 2 : Simbol novo zasnovanega 4/3 potnega zasučnega ventila



Slika 3 : Grobi model ventila z izdelanimi utori za tesnila na bat (54 mm x 29 mm x 27 mm)

ohišju) med seboj ločiti, kar v obravnavanem primeru pomeni uporabo petih tesnil.

Ta korak optimizacije je bil pravzaprav najpomembnejša točka razvoja te vrste ventila, saj se je tako doseglo bistveno boljše tesnjenje ventila v primerjavi z doslej uporabljanimi klasičnimi ventili.

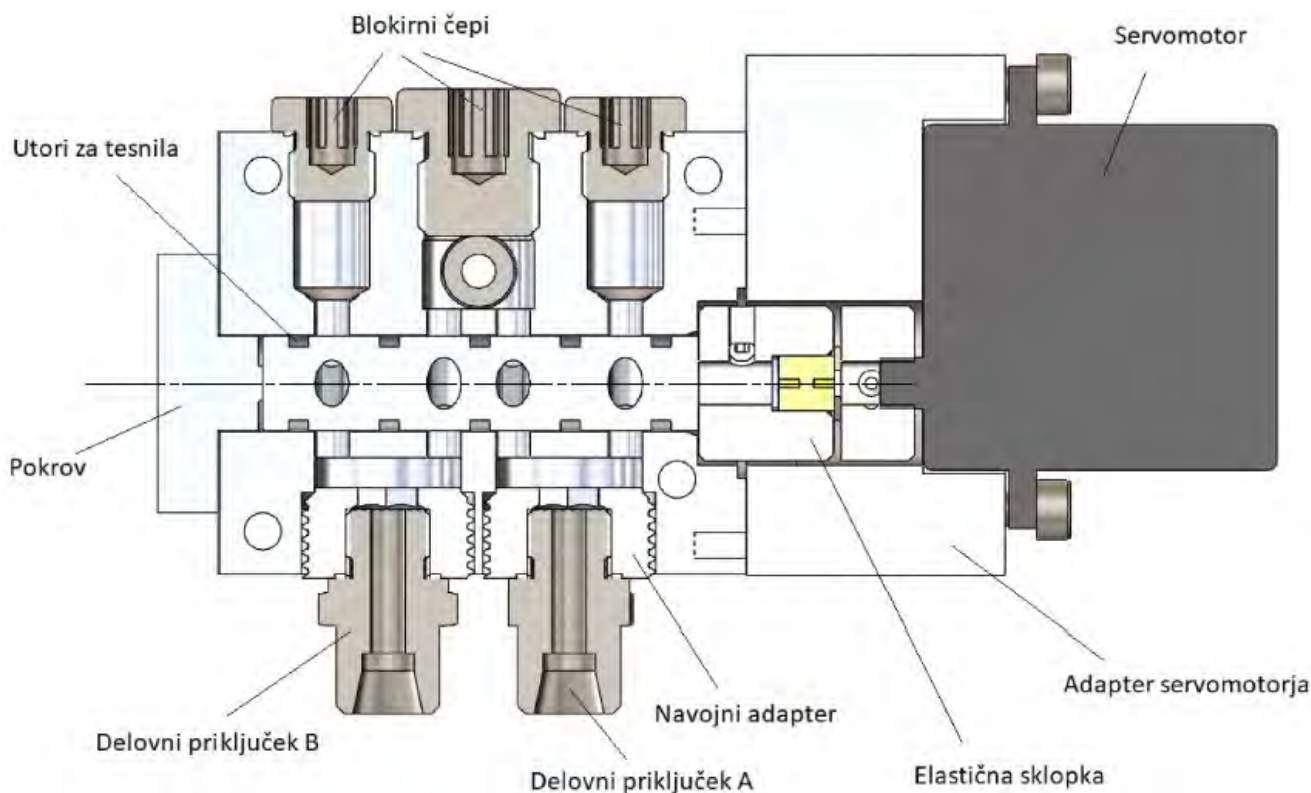
4 Snovanje oblike ventila za vgradnjo in izdelavo

Zasnovani ventil mora za krmiljenje noge humanoidnega robota krmiliti tri hidravlične valje, zato je naš razvoj stremel k snovanju za blokovno vgradnjo več ventilov. Pri prilagajanju standardnim delom smo morali ohišje ventila nekoliko povečati, ob tem pa so sledile še dodatne geometrijske operacije za združevanje več kanalov v skupne priključke.

Pri uporabi tesnil se kljub temu, da pri samem obratovanju ventila ne prihaja do prehoda tesnil preko ostrih robov, pojavi težava pri začetni montaži bata v ohišje. To težavo se je rešilo z dodatno optimizacijo oblike ventila, ki omogoča dostop do vseh krmilnih robov na ohišju. Tako dosežemo, da pri montaži bata v ohišje izvrtine s krmilnimi robovi zapolnimo s posebnima montažnima vstavkoma (*slika 4*) in tako omogočimo vzdolžni premik bata s tesnili preko krmilnih robov brez nastalih poškodb tesnil.



Slika 4 : Razviti montažni vložki



Slika 5 : Prerez celotnega zasučnega ventila z označenimi sestavnimi deli (129,5 mm x 76,1 mm)

Za pogon bata je bil izbran servomotor, ki ob majhnem volumnu omogoča potreben navor in hitrost zasuka. Krmiljenje ventila poteka preko spletnega grafičnega vmesnika. Za ta namen je bila narejena tudi programska koda (python), ki teče na mikrokontrolerju Raspberry pi Zero, in ob uporabi dodatnega modula za tvorjenje signala s pulzno širinsko modulacijo upravlja servomotor in s tem tudi ventil [7].

Za povezavo med krmilnim batom in servomotorjem se je zaradi izničenja vpliva nesoosnosti osi motorja z osjo bata uporabilo gibljivo vzmetno sklopko.

Za pritrditev servomotorja je bil izdelan namenski nosilec, za zaprtje ventila na zadnji strani pa je bil skonstruiran pokrov, ki hkrati skrbi tudi za aksialno pozicioniranje krmilnega bata. Na *sliki 5* je prikazan novo razviti zasučni ventil v prerezu z označenimi elementi, na *sliki 6* pa je prikazana blokovna izvedba treh sestavljenih zasučnih ventilov.

Za material sestavnih delov prototipnega ventila sta bila izbrana medenina in aluminij z dodatno površinsko kemično obdelavo (eloksacijo), ki poveča trdoto površinske plasti. S tem se je želelo ob enostavnejši izdelavi aluminijastih delov predvsem ugotoviti uporabnost aluminija za tlake do 350 bar kot alternative jeklu, ki se navadno uporablja za izdelavo tovrstnih hidravličnih komponent. Po končani optimizaciji je sledila izdelava nestandardnih delov in sestavljanje celotnega ventila. Rezultat, enojni zasučni ventil kot končni izdelek je prikazan na *sliki 7*.



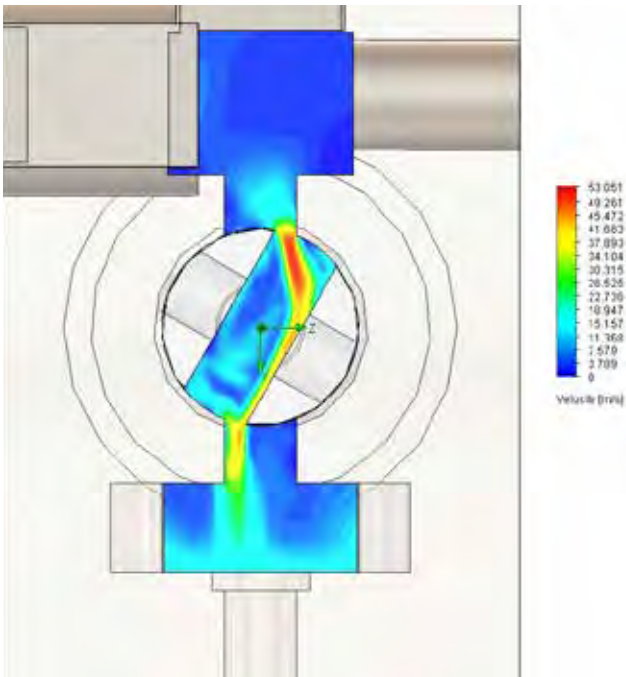
Slika 6 : Končni model trojnega zasučnega ventila v blokovni izvedbi za krmiljenje ene noge humanoida (129,5 mm x 118 mm x 76,1 mm)



Slika 7 : Končni videz sestavljenega zasučnega ventila

5 Numerične analize in eksperimentalne meritve

Na modelu ventila so bile izvedene numerične simulacije CFD, s katerimi so se ugotovile karakteristike novega ventila in pretočne razmere v njem. Za potrebe simulacij je bil model geometrijsko poenostavljen. Na *sliki 8* je prikazana numerično izračunana hitrost olja po preseku krmilnega kanala pri pretoku olja 5 l/min in kotu zasuka 15°.

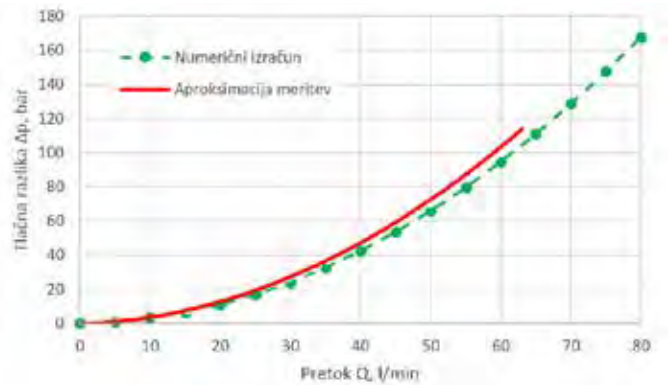
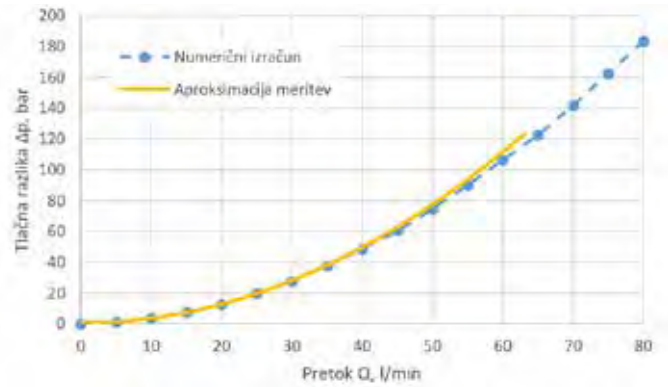


Slika 8 : Simulirano hitrostno polje olja v prečnem prerezu ventila

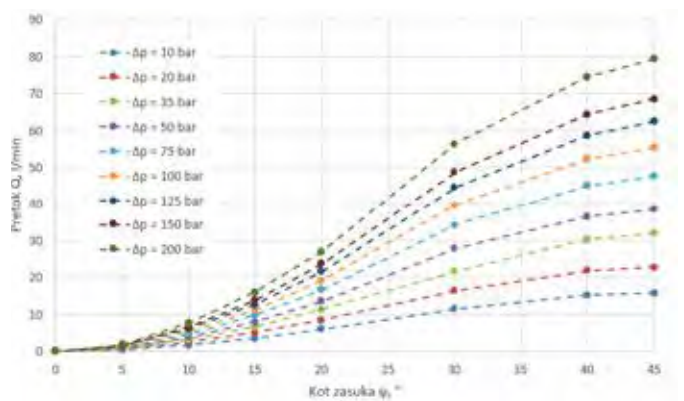
V nadaljevanju je bilo sestavljeno preizkuševališče za eksperimentalne meritve karakteristik na izdelanem prototipnem ventilu [7]. Za karakteristiko ventila Δp - Q so bile meritve izvedene na povezavi P-A in B-T. Rezultate prikazujeta naslednja grafa na *sliki 9*.

Iz rezultatov meritev in simulacij (*slika 9*) lahko odberemo, da ventil pri tlačni razliki 35 bar, kar po nekaterih virih [8] velja za kriterij za določanje nazivnega pretoka olja, omogoča pretok 33 l/min. Prav tako je razvidno, da je odstopanje eksperimentalnih meritev od numeričnih izračunov zelo majhno [7].

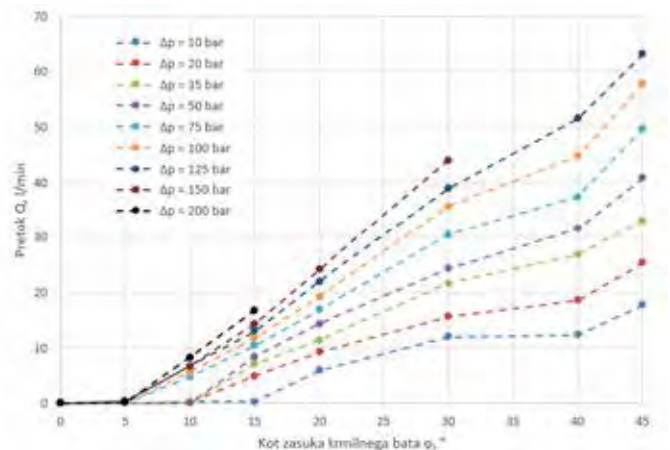
Pri karakteristiki novega ventila Q - φ je iz grafov na *slikah 10* in *11* razvidna nekoliko drugačna oblika krivulj, kot je običajna za klasične proporcionalne ventile. Vzrok za nastalo obliko krivulj je v spremenjenih krmilnih robovih. Iz grafa je razvidno, da se pretok z večanjem odprtja in povečevanjem tlačne razlike stalno povečuje. Pri primerjavi rezultatov meritev in numerično izračunanih vrednosti lahko opazimo manjša odstopanja izmerjenih vrednosti. Ta so najverjetneje posledica ugotovljene nena-



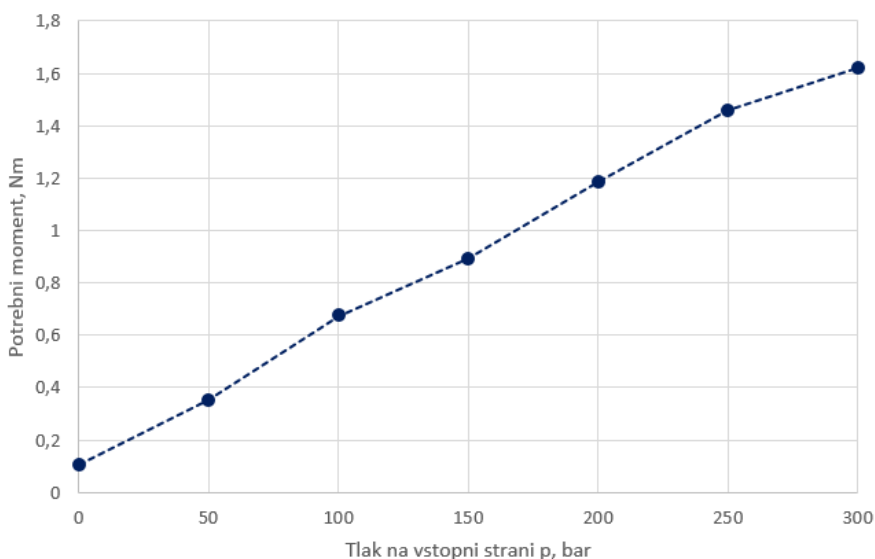
Slika 9 : Karakteristika ventila Δp - Q na povezavi P-A (zgoraj) in B-T (spodaj)



Slika 10 : Numerično izračunane vrednosti karakteristike Q - φ



Slika 11 : Izmerjena karakteristika Q - φ ventila



Slika 12 : Potrebni moment v odvisnosti od tlaka na dovodu

tančnosti pozicioniranja servomotorja. Prav tako za izmerjeni krivulji pri tlačni razliki 150 bar in 200 bar zaradi omejenosti moči hidravličnega agregata ni bilo mogoče doseči vseh zelenih pretokov.

Z meritvami se je izmerilo tudi največji potreben moment za prekrmljenje ventila (*slika 12*). Pri testiranju se je pojavil največji upor pri premiku iz popolnoma zaprte lege krmilnega bata. Iz grafa na sliki 12 je razvidno skoraj linearno naraščanje potrebnega momenta, ki pri tlačni razliki 0 bar sicer dosega vrednost 0,1 Nm. Rezultat tudi kaže, da za krmiljenje ventila pri 300 bar tlačne razlike potrebujemo servomotor navora 1,6 Nm. Iz tega lahko sklepamo, da je ta moment predvsem posledica trenja tesnil na ohišju in bat, saj pri popolnoma zaprtem ventilu pretočnih sil v ventilu ni, torej ne morejo povzročati momenta. Del tega momenta pri popolnoma zaprtem ventilu lahko ustvari tudi sila na bat preko obeh krmilnih robov P v ohišju, ki bat pritiska ob nasprotno steno, saj med batom in ohišjem obstaja določena ohlapnost.

6 Rezultati trajnostnega testiranja

S trajnostnim testiranjem ventila smo želeli ugotoviti uporabno dobo ventila. Testiranje smo izvajali pri tlaku 200 bar ter z zaslonko med delovnimi priključkoma (A in B), ki je predstavljala obremenitev. Rezultati so pokazali, da je novo razviti zasušni ventil do odpovedi (*slika 13*) opravil 733.000 preklapov. S testiranjem smo tudi ugotovili, da čas posameznega preklopa znaša približno 0,6 s, kar pomeni, da je ventil sposoben preklapljati s frekvenco 1,6 Hz.

Med trajnostnim testiranjem smo naleteli na nekaj nepričakovanih težav, saj je odpovedalo nekaj kupljenih sestavnih delov. Po 296.000 preklapih je odpovedal servomotor zaradi obrabe zobnika v njegovem prenosniku moči. Ker pa na kvaliteto ser-

vomotorjev ne moremo vplivati, smo servomotor zamenjali in nadaljevali s testiranjem. Zanimala nas je predvsem uporabna doba glavnih delov ventila, torej ohišja in bata, ter njuna obraba.

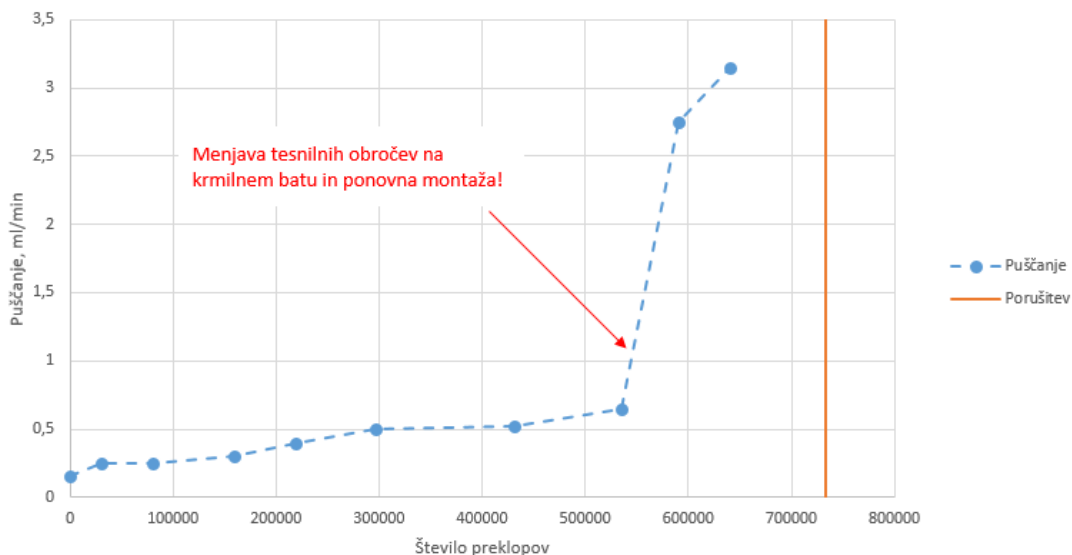
Pri opravljenih 544.000 ciklih se je izkazalo, da je ventil prenehal delovati zaradi loma elastične sklopke med batom in servomotorjem. Tudi v tem primeru smo porušeni del zamenjali in nadaljevali s testiranjem, vendar je po menjavi sklopke prišlo do aksialnega pomika bata, ki je povzročil poškodbo tesnil. Zato je sledila še menjava tesnil, ki pa so se pri ponovni montaži bata v ohišje očitno nekoliko bolj poškodovale na vstopnem posnetju. Posledično je količina izteklega olja pri merjenju nekoliko večja po menjavi, kar je vidno in označeno na *sliki 14*.

Po končanem testiranju je bil na podlagi rezultatov meritev olja na posameznih časovnih intervalih izdelali graf, prikazan na sliki 14. Zadnje meritve puščanja (po poružitvi) zaradi zloma krmilnega bata ni bilo več mogoče izvesti.

Rezultati meritev puščanja so bili že v začetku testiranja zelo presenetljivi, saj je bila izmerjena količina izteklega olja zelo majhna. Kljub temu ventil na nobenem drugem mestu ni izkazoval puščanja, kar nas je presenetilo, saj na obeh straneh med povra-



Slika 13 : Lom krmilnega bata na stiku z elastično sklopko



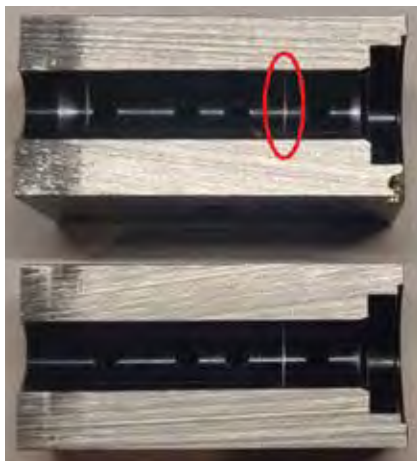
Slika 14 : Izmerjeno notranje puščanje ventila med trajnostnim testom



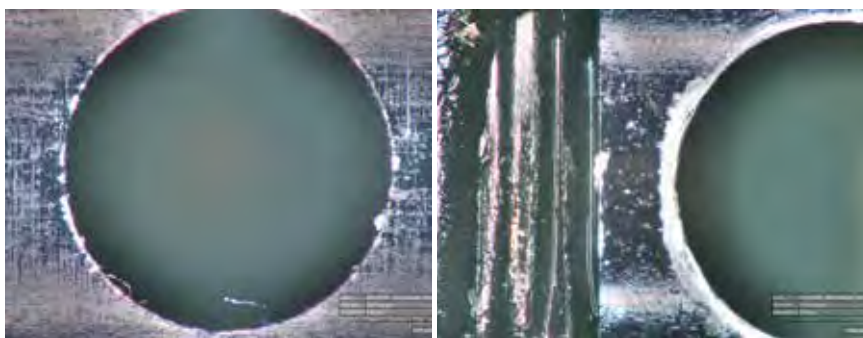
Slika 15 : Krmilni bat po 733.000 prekopih z vidnimi poškodbami tesnil in krmilnega roba

tno cono in okolico, tesnjenje zagotavlja le po en tesnilni obroč.

Po končanem trajnostnem testiranju je sledil pregled obrabe krmilnih robov na batu in ohišju. Na krmilnem batu je bila obraba vidna na krmilnih robovih, ki smo jih primerjali z robovi na ohišju. Opazna je tudi sprememba te-



Slika 16 : Obe polovici prerezanega ohišja po trajnostnem testiranju



Slika 17 : Primerjava obrabe na krmilnem robu ohišja (levo) in krmilnega bata (desno)

snilnih obročev X. Pri drugem tesnilu (z leve strani) je na *sliki 15* mogoče opaziti, da je v uto-ru ostal le del tesnila. Sklepamo, da je prav to tesnilo povzročilo v grafu nenaden skok vrednosti puščanja. Zanimivo pa je dejstvo, da kljub skoraj popolnoma poškodovanemu tesnilu ventil še vedno zelo dobro tesni. Zaradi uporabe črnega oksidnega nanosa na krmilni bat je bilo mogoče vizualno opazovati obrabo. Konkretnije analize obrabe še niso bile izvedene. *Slika 16* prikazuje prerezano ohišje, na katerem so vidna področja obrabe ventila. Iz *slike 17* pa je razvidno, da je obraba krmilnega roba na batu veliko večja od obrabe na ohišju.

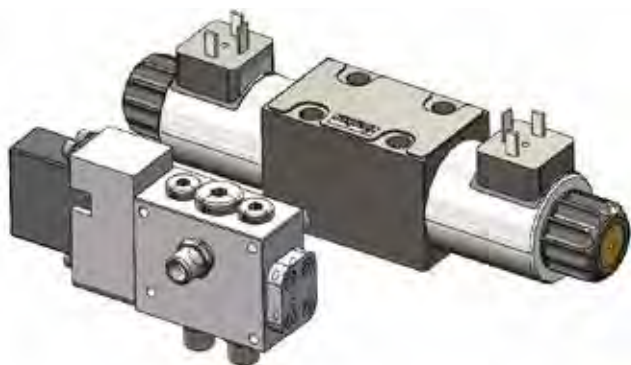
Opazna je presenetljivo velika obraba na zgornjem delu ohišja, kjer so dovodni in povratni kanali. Iz obrabljene površine in kontaktnih

površin bata z ohišjem lahko sklepamo, da tesnila bat v ohišju centrirajo, saj se je pri poškodovanem tesnilu na mestu stika z ohišjem površina obrabila (na *sliki 16* osvetljena ozka linija na desni strani).

7 Zaključek

Razvit in izdelan je bil nov hidravlični proporcionalni zasučni ventil, s katerim lahko krmilimo ciljni pretok 60 l/min. Ugotovljeno je bilo, da po kriteriju 35 bar tlačne razlike nazivni pretok novega ventila znaša 33 l/min.

S trajnostnim testiranjem se je pokazalo, da obraba tudi po precej velikem številu ciklov še ni povzročila velikega skoka v vrednosti puščanja, kar je razvidno iz grafa na *sliki 14* in je bilo bi-



Slika 18 : Primerjava velikosti novo razvitega ventila z običajnim ventilom

stveno manjše, kot je navadno pri klasičnih vzdolžno pomičnih proporcionalnih hidravličnih ventilih. Za primer lahko podamo merjene vrednosti notranjega puščanja novo razvitega drsniškega ventila, ki so znašale med 200 ml in 420 ml/min [9]. V primerjavi s tem je puščanje našega ventila (3 ml/min po izvedenih 600.000 preklonih) od 100- do 200-krat manjše. K presenetljivim rezultatom tesnjenja gotovo prispeva tudi odločitev za vpeljavo tesnil v samo sestavo ventila. Uporabno dobo ventila bi lahko podaljšali z optimizacijo bata na mestu, kjer je med trajnostnim testiranjem prišlo do porušitve, saj med zasnovo bata nismo dovolj pozornosti namenili temu detajlu in vplivu zareznega učinka na trajno dinamično trdnost.

S primerjavo velikosti novega ventila s primerljivim klasičnim ventilom, za katerega smo izbrali hidravlični proporcionalni drsniški ventil proizvajalca Parker z oznako D1FBE02FC0NMW0[10], ki po karakterističnih točkah pretoka ustreza novemu ventilu, smo ugotovili, da je novo razviti ventil po volumnu 3-krat manjši (slika 18).

Novo zasnovani ventil tako predstavlja nov pristop v krmiljenju hidravličnih komponent, uporaben je tako za krmiljenje humanoidnih robotov kot tudi za krmiljenje drugih naprav v industrijski in mobilni hidravliki.

V nadaljnjem razvoju ventila bi bilo smiselno razmisliti in testirati vpliv materiala bata na samo uporabno dobo ventila. Prav tako bi bilo treba raziskati, kako izbor tesnil vpliva na tesnjenje in tudi potreben moment za krmiljenje ventila.

Literatura

- [1] Q. Liua, J. Zuoa, C. Zhua, S. Q. Xie: Design and control of soft rehabilitation robots actuated by pneumatic muscles: State of the art, *Future Generation Computer Systems* 113 (2020), str. 620-634.
- [2] K. Khokar, P. Beeson, R. Burrige: Implementation of KDL Inverse Kinematics Routine on the Atlas Humanoid Robot, *Procedia Computer Science* 46 (2015), str. 1441-1448.
- [3] I. Okhotnikov, S. Noroozi, P. Sewell, P. Godfrey: Evaluation of steady flow torques and pressure losses in a rotary flow control valve by means of computational fluid dynamics, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 64 (2017), str. 89-102.
- [4] D. Will, N. Gebhardt, H. Ströhl (Hrsg.): *Hydraulik*, Springer-Verlag, Heidelberg, 2007.
- [5] S. Potter, J. A. Saunders (1990): Rotary directional control valve, US patent US4966192A.
- [6] M. Bešter: Prototip hidravličnih humanoidnih robotskih nog: diplomsko delo. Ljubljana, 2021.
- [7] D. Božič: Razvoj miniaturnega proporcionalnega hidravličnega ventila za krmiljenje gibov humanoidnega robota: diplomsko delo. Ljubljana, 2022.
- [8] P. Chapple: *Principles of hydraulic system design*, Oxford, 2003.
- [9] J. Bartolj: Razvoj 4/3 proporcionalnega hidravličnega ventila za izdelavo s postopkom 3D tiska kovin, diplomsko delo, Ljubljana 2022.
- [10] Parker Hannifin Corporation: Direct Operated Proportional DC Valve Series D1FB / D1FB OBE, Catalogue (Europe and Asia).pdf, Parker, Dostopno na: <https://ph.parker.com/pl/en/direct-operated-proportional-dc-valves-series-d1fb-d3fb/d1fbe02fc0nmw0>, ogled 13. 9. 2022

Development of miniature proportional hydraulic valve to control the movements of a humanoid robot

Abstract:

To control a hydraulic humanoid robot, it is necessary to design and optimize a hydraulic proportional valve with the lowest possible mass and size. The valve for the robot's rapid movements must not only be compact, but also allow high flow rates while minimizing internal leakage. A seal on the control piston is used for better sealing and simplified fabrication. Numerical simulations of the basic characteristics of the valve were performed and the results were compared with measurements on the manufactured prototype. Compared to conventional proportional valves, the newly developed rotary valve achieves significantly better results in terms of internal leakage and flow characteristics, and is smaller and easier to start.

Keywords:

hydraulic, humanoid robots, proportional valves, rotary proportional valve, seals, controlling with servomotors