

Razvoj in raziskave delovanja novega konvencionalnega vodnega potnega ventila

Franc Majdič

LPKH/Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Dominik Mikuž

LPKH/Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Jožef Pezdernik

LPKH/Fakulteta za strojništvo Ljubljana

*LPKH Laboratorij za pogonsko-krmilno hidravliko

Povzetek

Ponovno oživljanje raziskav in razvoja pogonsko-krmilne hidravlike, delujoče na pitno vodo kot hidravlično kapljevino, pomeni pozitiven korak k zaščiti naravnega okolja pred onesnaževanjem, predvsem pitnih voda.

Prispevek predstavlja rezultate raziskav in razvoja novega konvencionalnega vodnega 4/3 potnega ventila drsniškega tipa nazivne velikosti CETOP 2. Razvit, izdelan in preizkušen je bil vložni tip vodnega potnega ventila s potisno-vlečnim elektromagnetom. V prispevku so prikazani rezultati simulacije in meritev delovnih karakteristik novega vodnega potisno-vlečnega elektromagneta. V nadaljevanju prikazuje prispevek še rezultate meritev bistvenih delovnih karakteristik ventila ($\Delta p-Q$, $p-Q$).

Rezultati meritev potrjujejo uporabnost in nadpričakovano funkcionalnost ventila. Ventil je primeren za vgradnjo v enostavnejše aplikacije vodne pogonsko-krmilne hidravlike.

Ključne besede: voda, pogonsko-krmilna hidravlika, drsniški konvencionalni potni ventil

1. Uvod

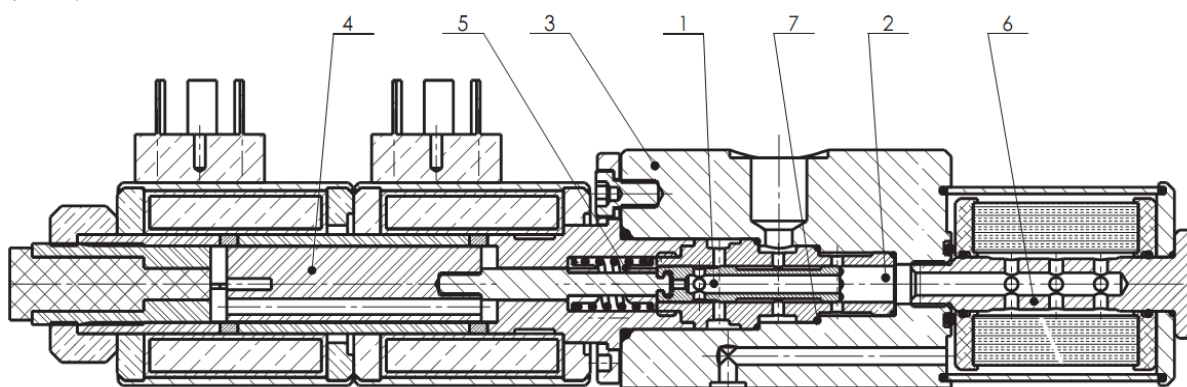
Vedno večje zahteve po uporabi ekoloških, naravi prijaznih tehnologij v zadnjih desetletjih so z razvojem novih materialov in izdelovalnih tehnologij vrnile na svetovno prizorišče že skoraj pozabljeno vodno hidravliko. Voda, najpogostejša naravna kapljevina na našem planetu, je že v stoletjih pred Kristusom služila kot vir energije. Človek je sprva znal izrabljati predvsem dinamično komponento energije vode, že pred več kot 2000 leti pa je staro-grški izumitelj in matematik Ktezibij izdelal prvo hidravlično črpalko [1]. Tudi v naslednjih dveh tisočletjih se je za gradnjo hidravličnih naprav kot pogonska kapljevina uporabljala voda. Znani so primeri iz časov industrijske revolucije, na primer prva industrijska hidravlična stiskalnica, patentirana leta 1795 v Angliji, je kot pogonsko kapljevino uporabljala vodo. Znano je tudi podjetje "London Hydraulic Power" s svojim hidravličnim sistemom, zgrajenim okoli leta 1868 [1], ki je s tlakom 50 bar in 105 km dolgim cevovodom oskrbovalo porabnike po celotnem Londonu. Znan je še primer dvigala na Eiffel-ov stolp iz leta 1887, ki je prav tako delovalo na vodno hidravliko, pa londonski Tower Bridge iz leta 1894 s svojim sistemom za dvigovanje na vodno hidravliko. Kljub takratni skoraj izključni uporabi vode kot hidravlične kapljevine je potrebno dodati, da so bili problemi s korozijo in pomanjkanjem ustreznih materialov precejšnji, kar je v naslednjem stoletju odpravila oljna hidravlika, saj je leta 1906 Janney razvil prvi oljno-hidravlični sistem z aksialno batno črpalko. Mineralno hidravlično olje je zaradi svojih odličnih mazalnih in anti-korozivnih lastnosti izpodrinilo vodo praktično za celo stoletje. Velik razmah pogonskih oljnih hidravličnih sistemov v 20. stoletju je botroval tako k izjemnemu razvoju sestavin za oljno hidravliko kot tudi k razvoju različnih hidravličnih pogonskih kapljev. Mineralna olja so izdelana iz naftnih frakcij in tako neposredno povezana z gibanjem cen nafte na svetovnih trgih in z omejenimi zalogami naftnih derivatov. Poleg vsega so mineralna hidravlična olja ekološko oporečna, saj vsak hidravlični sistem prej ali slej pušča navzven in tako onesnažuje okolje, pitno vodo itd. Z velikim razmahom hidravlike v primarnih gospodarskih panogah in gradbeništvu pa je problem onesnaževanja zaradi direktnega kontakta olja z okoljem vedno bolj pereč. Problem predstavlja tudi iztrošeno olje, ki ga je potrebno posebej zbirati in, v skladu s predpisi, oddati v razgradnjo naprej. Vse to pa je povezano s stroški. Pogosto predstavlja velik problem tudi gorljivost olja in s tem povezana potencialno velika požarna ogroženost ob morebitnem puščanju v vročem okolju. Kljub mnogim dobrim lastnostim olja kot hidravlične kapljevine se ob naštetih pomanjkljivostih poraja vprašanje glede alternative. Da bi se izognili požarni nevarnosti, se uporabljajo vodno-oljne (HFA) in vodno-polimerne (HFC) emulzije, ki so ekološko oporečne in drage. Z ekološkega vidika bi lahko alternativa bila rastlinsko olje, ki pa ni ognjevarno in je dražje kot mineralno. Kot zadnja alternativa nam preostane voda, ki se je že kot prva kapljevina uporabljala za prenos hidravlične energije. V zadnjih letih so vodi z razvojem novih materialov in tehnologij zopet odprta vrata na področje sodobne pogonsko-krmilne hidravlike. Prve raziskave na področju ponovne uporabe vode so začeli v Veliki Britaniji in na Japonskem ob koncu sedemdesetih let. V naslednjem desetletju so s podobnimi raziskavami začeli tudi na Danskem. Njihovi rezultati so kmalu pokazali uporabnost vode kot pogonske kapljevine v hidravliki. Ob koncu devetdesetih let so z veliko ekipo raziskovalcev začeli razvoj vodne pogonsko-krmilne hidravlike na Finskem [1]. Navedena dejstva glede truda in vlaganja v razvoj vodne hidravlike v zadnjih desetletjih kažejo na to, da je voda očitno primerna kapljevina, ki pa zaradi svojih precej specifičnih lastnosti zahteva dodaten trud pri obvladovanju nekaterih novih pojavov znotraj sistema ter drugačen pristop pri razvoju novih sestavin. Tiste pogloblitve prednosti vode, ki govorijo v prid njene uporabe, so: nizka cena, ekološka neoporečnost, negorljivost, nizka viskoznost in posledično manjše izgube energije pri pretakanju. Nizka, oziroma zanemarljiva cena kapljevine, torej vode, nam v uporabni dobi sestavine tako upraviči začetno višjo ceno njene izdelave kot posledice uporabe novih

materialov in tehnologij. Temu v prid govori tudi ekološka neoporečnost. Na tem mestu velja omeniti tudi mednarodni okoljski standard ISO 14000, ki podpira delovne procese in tehnologije, prijazne okolju. Z vidika ekologije je voda izjemno zanimiva za uporabo v rudarstvu, kmetijstvu, gozdarstvu in gradbeništvu. Pomanjkanje zanesljivih zvezno delujočih sestavin na tem področju pa je eden od razlogov, da se vodna hidravlika še ni širše uveljavila. Na trgu tudi nismo zasledili vodnih vložnih tipov potnih krmilnih ventilov drsniškega tipa, temveč le sedežne ventile. Drsniški ventili pa so zanimivi tudi zaradi možnosti nadaljnjega razvoja v zvezno delujoče, kateri pa, kot smo že omenili, na področju vodne hidravlike še niso uveljavljeni. V naši nalogi se nismo usmerjali v razvoj zvezno delujočega vložnega ventila, temveč bomo poskusili razviti in izdelati ter v praksi preizkusiti konvencionalni vložni potni ventil s štirimi priključki in tremi položaji, kakršni se v pogonski hidravliki veliko uporabljajo.

Vložni ventili so zelo uporabni pri gradnji kompleksnih hidravličnih sistemov, kjer pocenimo drago izvedbo z uporabo kompaktnega hidravličnega bloka, v katerem izdelamo potrebne povezave in vložna mesta za ventile. Tako privarčujemo pri porabi prostora, povezovalnih cevi, zmanjšamo pa tudi linijske izgube v sistemu. Z izdelavo posamičnega bloka iz cenene materiala pa je tak ventil uporaben tudi kot samostojna enota. Med razvojem pa smo stremeli k temu, da bo ventil po prestani fazi testiranja in uporabi v praksi, ob potrebnih izboljšavah, mogoče razvijati naprej v zvezno delujočega. Ventil, ki smo ga razvijali, je namenjen uporabi v gozdarstvu, torej na področju, kjer je varovanje okolja še posebej pomembno.

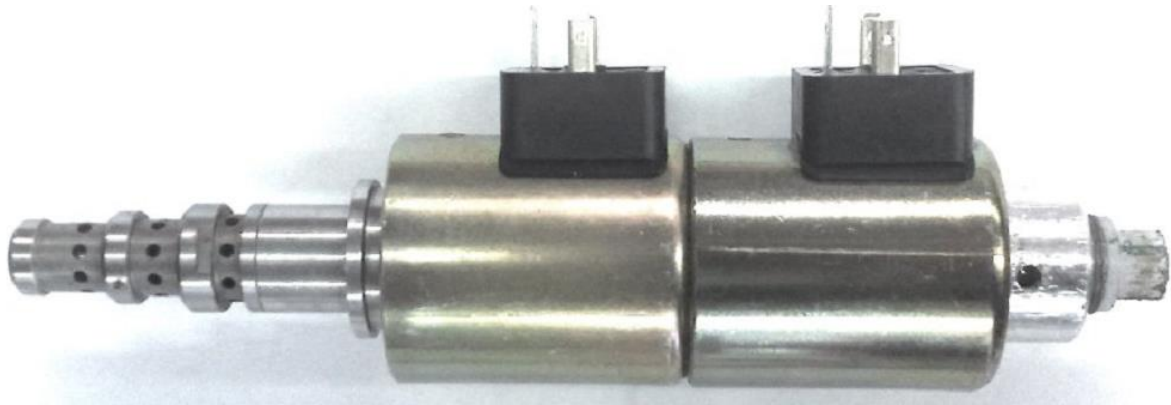
2. Tehnični opis ventila

Prezre novega vodnega konvencionalnega 4/3 potnega ventila na sliki 1 prikazuje njegove glavne sestavne dele. Na poziciji 1 je krmilni bat, na poziciji 2 pa vložna puša, ki je glede na ohišje (poz. 3), štirikrat tesnjena preko elastičnega tesnjenja z O-ringi (poz. 7). Levo je sestav elektromagneta (poz. 4). Pod pozicijo 5 je sistem s povratno tlačno vzmetjo, ki vrača ventil v ničelni položaj po izklopu magnetnega polja. S pozicijsko številko 6 je označena mikrofiltrirna enota. Prikazan vodni potni ventil je uporaben za tlake do 210 bar in pretoke do 30 l/min.



Slika 1: Prezre prototipa vložnega vodnega potnega ventila

Slika 2 prikazuje prvi izdelani prototip vodnega konvencionalnega 4/3 potnega ventila, vložnega tipa. Rezultati meritev in simulacij tega ventila so prikazani v poglavju 3.



Slika 2: Izdelani prototip vodnega vložnega 4/3 potnega ventila

3. Rezultati simulacij in meritev ventila

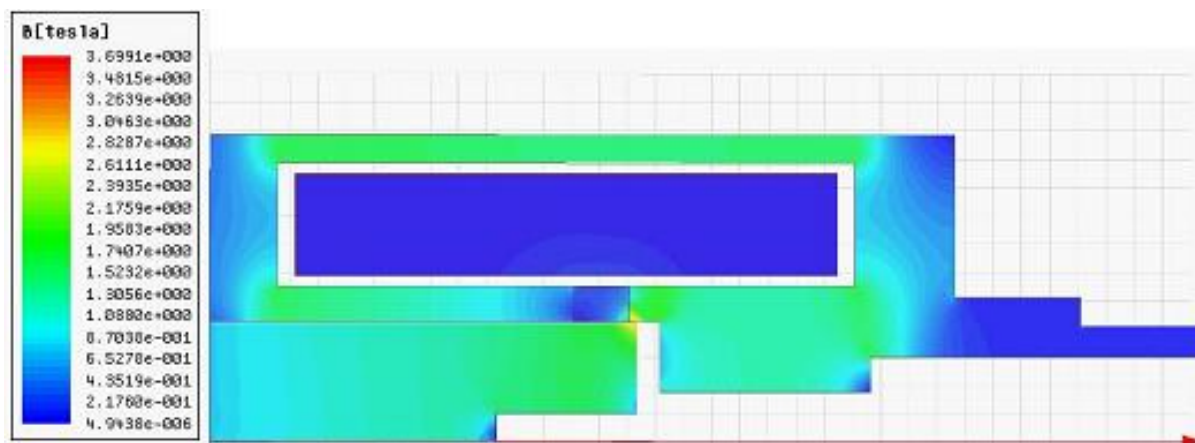
3.1. Nov nerjavni potisno-vlečni magnet

3.1.1. Simulacija delovanja potisno-vlečnega magneta

Zaradi problemov pri določitvi nadomestnega magnetnega vezja elektromagneta in želje po hitri analizi različnih konstrukcijskih rešitev elektromagneta smo se odločili za numerično analizo prototipa po metodi končnih elementov. Uporabili smo komercialni programski paket za analizo elektromagnetnih strojev. Programski vmesnik je 3D modelirnik, v katerem definiramo realno geometrijo obravnavanega sistema v kartezičnem ali cilindričnem koordinatnem sistemu v kolikor gre za osno-simetrični problem. Konstrukcijski pogoji, ki so nam definirali dimenzije in osnovne karakteristike elektromagneta, so bili: uporaba obstoječih tuljav serijske izdelave, gib v eno smer 3,6 mm. Tuljave so nam določale zunanje dimenzije sestava in potreben gib kotve, želja po nadaljnji uporabi elektromagneta na ventilih nazivne velikosti 6 pa največjo zeleno silo. V primeru obravnavanega elektromagneta imamo opravka z osno-simetričnim problemom, zato smo obravnavali le četrtno prečnega prereza, torej rezino ki rotira okoli osi z. Tak pristop je smotrni, saj prihranimo precej računalniškega dela. Glede na to, da v ravnini lahko postavimo gostejšo mrežo, pa pridobimo tudi na natančnosti rezultatov ob enako zmogljivem računalniku. Predvsem pa smo prihranili na svojem času; na rezultate 3D simulacije smo čakali tudi do 10-krat več časa kot na rezultate ravninskega izračuna. Rezultati med 3D in ravninsko simulacijo so odstopali za zanemarljiv odstotek, kar pomeni, da so rezultati simulacije v ravnini zaradi možnosti gostejšega mreženja lahko zelo natančni.

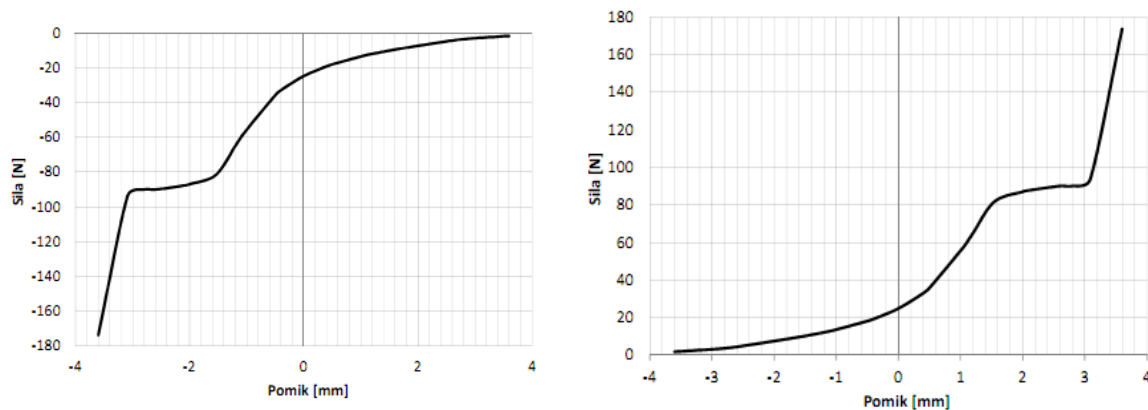
Prez elektromagneta smo poenostavili zaradi lažjih in hitrejših numeričnih simulacij. Glavne poenostavitve je bilo deležno jedro elektromagneta, ki je v prikazanemu modelu spojeno z jeklenimi ohišji tuljav. V realnosti so v sestavu jedra in ohišij tuljav prisotne majhne zračne reže, ki v manjši meri vplivajo na tok magnetnega polja, vseeno pa so reže tako majhne, da smo se jih pri preliminarnih izračunih odločili izločiti ter jih po potrebi upoštevati kasneje. Poenostavljen del prereza in kotva v sredini sta iz feromagnetnega materiala z nelinearno magnetilno krivuljo B-H. Ker v knjižnici programa ni magnetilne krivulje za uporabljeni material AISI 440B, smo uporabili krivuljo jekla AISI 1010. Po navedbah virov [2] in [3] pa se jeklo AISI 440B uporablja tudi pri podobnih aplikacijah in naj bi se v

nepopoljšanem stanju obnašalo podobno kot ostala nizko-ogljčna jekla. Za uvodne raziskave smo tudi v tem primeru uporabili približek, saj več podatkov o jeklu AISI 440B nismo našli. Lotne spoje, ki so iz bakrove zlitine, smo definirali kot bakrene. Prav tako sta bakreni navitji tuljav. Na koncu smo definirali še velikost območja, v katerem so se računali obravnavani elektromagnetni pojavi. Naslednji korak v modeliranju problema so bile nastavitve vhodnih in izhodnih parametrov. Kot vhodna parametra smo določili električni tok skozi posamično tuljavo glede na število ovojev ter premik kotve v jedru elektromagneta. Izhodni parameter je sila, ki se pojavi na kotvi pri premiku skozi magnetno polje. Pred začetkom simulacije smo nastavili še osnovne parametre mreženja, konvergence in števila iteracij. Sledi zagon simulacije, ki navadno traja uro ali več, odvisno od nastavljenih parametrov. Po izračunu sledi analiza rezultatov in sklep o ustreznosti rešitve prototipa. Med razvojem smo geometrijo modela spreminjali in prišli do zelenih rezultatov. Magnetno polje opišeta njegova poljska jakost H in gostota B . Kotva je iz ničelne lege izmaknjena za 2,057 mm. Slika 3 prikazuje gostoto magnetnega polja B v desnem delu elektromagneta. Razvidno je, da je največja gostota polja v jedru na prehodu iz kotve na ohišje. Lotni spoj je ustrezno opravil svojo funkcijo, saj je gostota polja na tem področju praktično nična.



Slika 3: Rezultat numerične določitve magnetnega polja, ko je tok v drugi tuljavi in je kotva 2,057 mm iz ničelne lege

Na sliki 4.a je z grafom prikazan potek sile kotve, odvisno od pomika za potisni del elektromagneta, na sliki 4.b pa potek sile za vlečni del elektromagneta. Grafa predstavljata dosežene delovne karakteristike po večkratnih popravkih konstrukcije in optimiranju detajlov ob upoštevanju predhodno predstavljenih izračunov. Prišli smo do zaključka, da mora biti prerez potisno-vlečnega elektromagneta v območju največje intenzivnosti magnetnega polja popolnoma simetričen, sicer pride do odstopanj med delovnimi karakteristikama posameznih delov. Zaželeno pa je, da je karakteristika sila-pot simetrična v obe smeri delovanja glede na ničelni izhodiščni položaj. V nasprotnem primeru lahko upravičeno pričakujemo prehitro nastop mejnega področja v katerem ventil ne deluje več zanesljivo. Prikazana grafa s svojo simetrijo potrjujeta, da nam je uspelo doseči željeno karakteristiko. Potisni del elektromagneta deluje v območju od 3,6 do 0 mm, vlečni del pa v območju od 0 do 3,6 mm. Razlog za predznak je postavitev izhodišča koordinatnega sistema. Iz rezultata izračuna (sliki 4.a in 4.b) je razvidno, da je sila v ničelnem položaju v vsakem primeru 25 N, v prvih 1,5 mm hoda progresivno narašča na približno 85 N, nato je v drugih 1,5 mm skoraj konstantna, v zadnjih 0,6 mm giba kotve pa sila strmo naraste na približno 175 N.

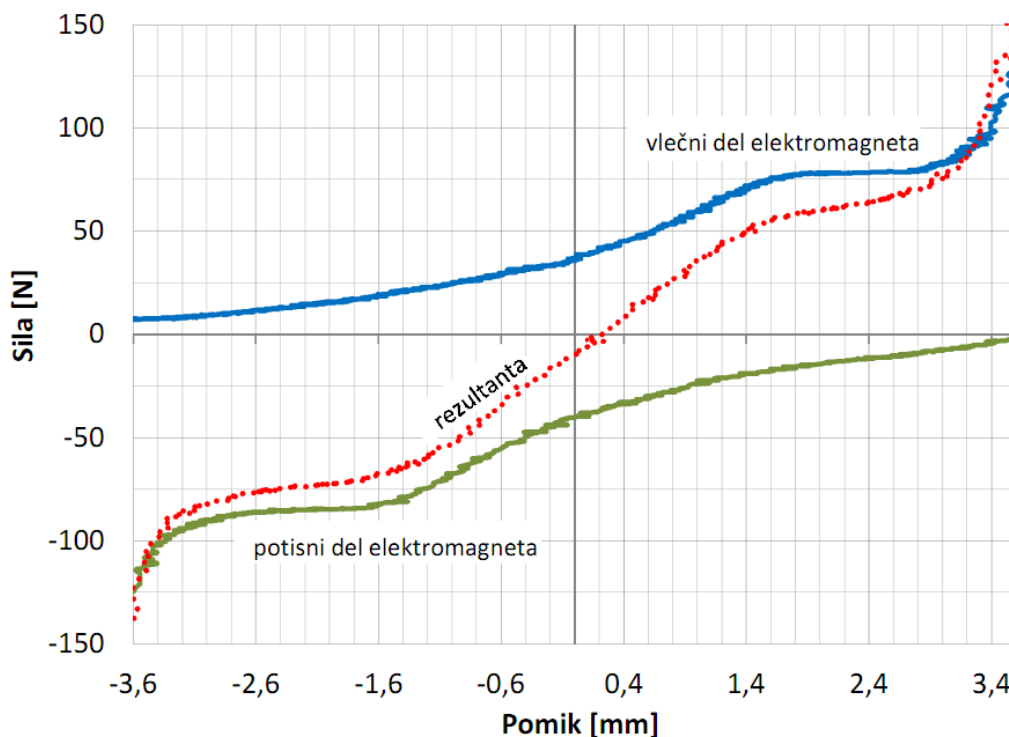


Slika 4: Rezultat numeričnega izračuna delovnih karakteristik a) potisnega in b) vlečnega dela elektromagneta

3.1.2. Meritve delovne karakteristike potisno-vlečnega magneta

Napetostne signale iz ojačevalcev smo preko merilne konzole NI compactDAQ zajemali in shranjevali s pomočjo namensko izdelanega programa za potrebe naših meritev. Končni rezultat merilne verige je bila tekstualna datoteka, kamor so se izmerjeni signali zapisovali po kanalih v posamezne stolpce. Vsak kanal je "tekel" v odvisnosti od časovne skale, ki jo je generirala merilna konzola. Podatke meritev smo morali zaradi napetostnega signala pred obdelavo še ustrezno pretvoriti s pomočjo izmerjenega kalibra posameznega sensorja. Sensor sile smo kalibrirali z utežmi v natezni in tlačni smeri, sensor pomika pa z digitalnim kljunastim merilom. Meritve so potekale po sledečem postopku: Elektromagnet smo s pomočjo pomičnih čeljusti pozicionirali v eno izmed dveh končnih leg in vklopili električni tok skozi tuljavo. Ta je induciral magnetno polje, ki je s silo privlačilo kotvo ob ohišje. Kotvo, povezano s pomično čeljustjo primeža prek sensorja sile, smo nato s premikom čeljusti odmaknili od ohišja. Zaradi zaporedne vezave čeljust-senzor-kotva smo s sensorjem sile izmerili rezultirajočo silo na kotvi elektromagneta, odvisno od pomika, ki smo ga zaznavali preko sensorja pomika. Postopek smo večkrat ponovili za vklop vsake posamične tuljave in za vklop obeh hkrati zaradi ugotavljanja simetričnosti delovne karakteristike glede na izhodiščni položaj elektromagneta. Z opisanim preizkuševališčem in postopki smo izmerili delovne karakteristike prototipa potisno-vlečnega elektromagneta. Na sliki 5 so za lažjo primerjavo in analizo prikazane karakteristike obeh delov elektromagneta ter rezultanta, ko je tok tekel skozi obe tuljavi hkrati in smo merili karakteristiko po celotnem območju. Namen te meritve je lažja analiza simetrije delovne karakteristike potisno-vlečnega elektromagneta. Potek izmerjenega naraščanja sile kotve odvisno od giba, kaže na podobnost z dobljeno karakteristiko v numerični analizi elektromagneta. Ob natančnejšem pogledu karakteristik potisnega in vlečnega dela elektromagneta, opazimo, da s pomikom kotve proti končni legi sila najprej progresivno narašča, se v določenem območju ustali na konstantno vrednost, nato pa s še večjo intenzivnostjo progresivno naraste do končne vrednosti, približno 150 N. Opazimo lahko tudi, da je sila potisnega dela elektromagneta nekoliko višja od sile vlečnega; v ravnem delu se ustali pri približno 85 N, medtem ko se vlečna sila ustali pri približno 80 N. Razlog za to, sicer majhno razliko, je verjetno v manjši nesimetriji izdelanega jedra elektromagneta. Na sliki 5 je na grafu vidna izmerjena rezultanta na kotvi elektromagneta pri vključenih obeh tuljavah. Razvidno je, da krivulja ne seka abscise osi pri 0 mm, kjer je ničelni položaj elektromagneta, temveč pri 0,2 mm, kar je posledica večje sile na potisni

strani, ki zato premakne skupno rezultanto v desno. Vzroke za to odstopanje lahko iščemo na strani sestava jedra vlečnega magneta, kjer je privijačen čep. Zaradi zračnosti prihaja v kontaktu med čepom in jedrom do povečane upornosti, kar otežuje pretok magnetnega toka v primerjavi z nasprotno stranjo. Poleg tega se izkaže za problematično tudi natančno pozicioniranje končnega čepa v jedru, saj se že z majhnim zasukom čepa poveča zračnost glede na kotvo, posledično pa se spremeni tudi upornost v magnetnem krogu. Kljub podanim ugotovitvam lahko zaključimo, da karakteristiki odstopata le za približno 6%, kar je zelo dobro za potrebe novega vodnega konvencionalnega 4/3 potnega drsniškega ventila.

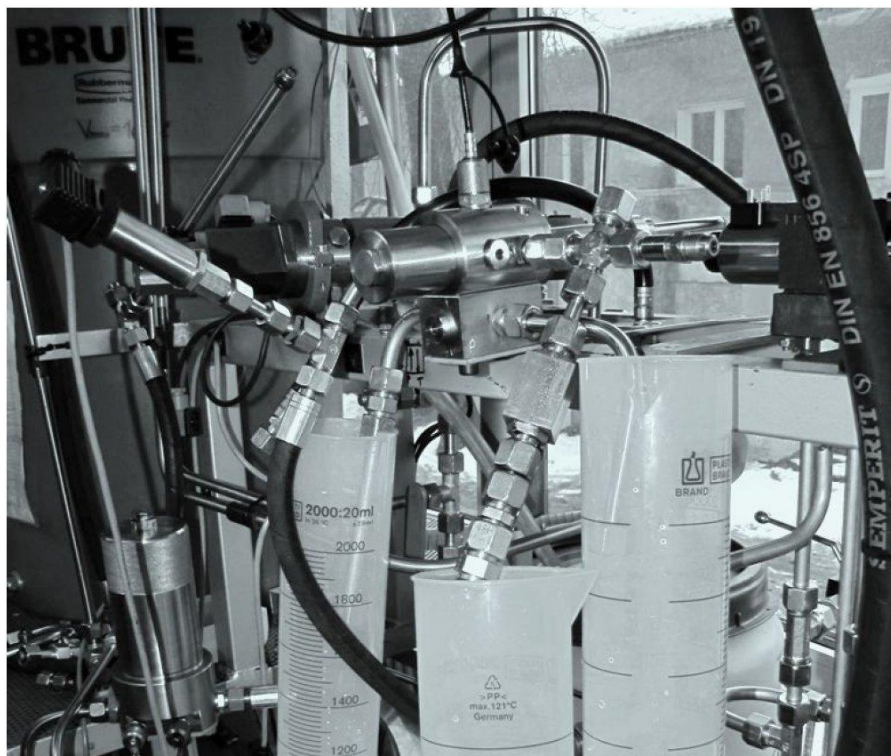


Slika 5: Rezultat meritev delovne karakteristike prototipa vodnega potisno-vlečnega elektromagneta

3.2. Delovne karakteristike vodnega 4/3 konvencionalnega potnega ventila

3.2.1. Meritve notranjega puščanja

Meritve smo izvajali na obstoječem vodnem hidravličnem preizkuševališču [4] (sl. 6) v Laboratoriju za pogonsko-krmilno hidravliko (LPKH). Vodna vrstna batna črpalka daje 30 l/min pretoka, pri največjem tlaku 150 bar, ki ga nastavimo na tlačnem ventilu. Testirani ventil smo preko gibkih cevi pritrdili na obstoječe vodno preizkuševališče. Na posamezne priključke ventila P, A in B smo za vsako serijo meritev priključili tlačni vod. Tok notranjega puščanja smo zbirali v merilne valje (menzure), po posameznih priključkih. Meritve smo izvajali tako, da smo najprej zagnali črpalko, vklopili obtočni ventil in odprli krogelni ventil. S tem smo s tlakom obremenili posamezen priključni vod ter sočasno vklopili štoparico in merili čas zajemanja toka notranjega puščanja v merilne valje. Dobljene rezultate smo vpisovali v merilne tabele in izračunali tok notranjega puščanja (preglednica 1).



Slika 6: Priključitev ventila na vodnem preizkuševališču v primeru meritve notranjega puščanja

Preglednica 1: Rezultati meritev notranjega puščanja vodnega drsniškega konvencionalnega 4/3 potnega ventila pri uporabi pitne vode, temperaturi 20°C in tlaku 150 bar za blokirani (B-vsi štiri priključki; P, T, A in B; so zaprti) in mali h (h =P-priključek blokiran in A, B in T priključki medsebojno spojeni) ničelni položaj

Ventil - tlak	B - P	B - A	B - B	h - P
Q_A [l/min]	0.0191	-	0	0
Q_B [l/min]	0.0294	0	-	0
Q_T [l/min]	0	0.0123	0.011	0.0806
Q_P [l/min]	-	0.0141	0.0145	-
$\sum Q_{np}$ [l/min]	0.0486	0.0264	0.0255	0.0806

3.2.2. Simulacija Δp -Q karakteristike

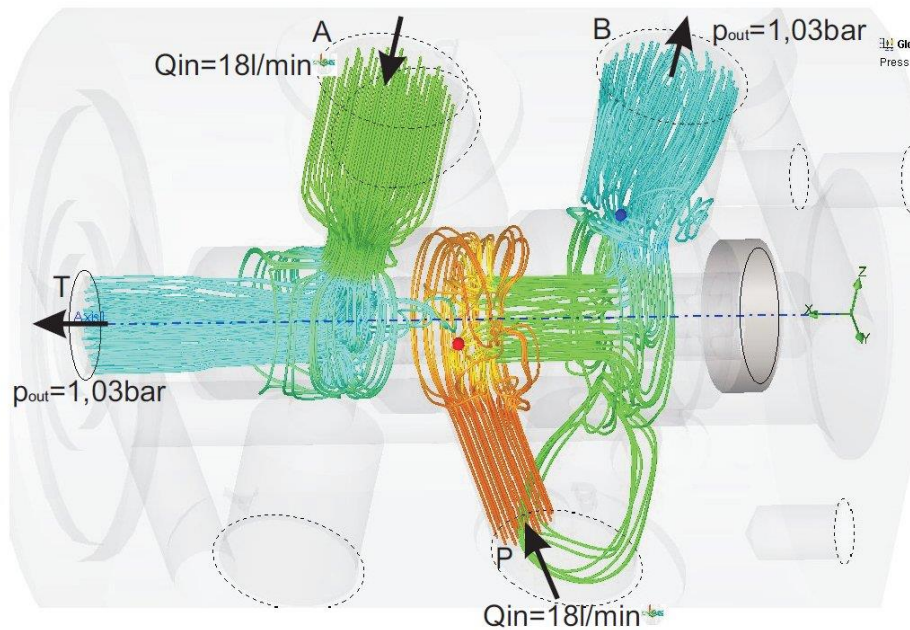
Sodobna programska orodja računalniške dinamike tekočin (CFD-Computational Fluid Dynamics) omogočajo poglobljeno opazovanje dogajanja znotraj sestavin fluidne tehnike. Nelinearni sistemi parcialnih diferencialnih enačb, ki popisujejo gibanje tokov, so s pomočjo sodobne računalniške opreme relativno hitro rešljivi. Od uporabnika je sicer še vedno zahtevano dobro poznavanje fizikalnega ozadja dogajanja in robnih pogojev sistema, samo reševanje pa je odvisno od računalnika in programa, ki to izvaja. S takšnimi zmogljivimi orodji je enostavno analizirati tokovne razmere znotraj posamezne sestavine fluidne tehnike in na podlagi pridobljenih rezultatov in poznavanja problematike ukrepati z optimiranjem

geometrije. Z odpravo ostrih prehodov znotraj tokovodnikov in ostalih nepravilnosti lahko zmanjšamo izgube in povečamo energetsko učinkovitost celotnega sistema. Pri analizi prototipa ventila smo uporabili komercialni programski paket za konstruiranje in numerično analizo izdelkov. Danes je ponudba kvalitetne programske opreme za numerične simulacije pretakanja fluidov precej razširjena. Za sodobnega inženirja je priporočljivo, da uporablja simulacijska orodja, predvsem zaradi trenda k čim hitrejši poti od ideje do realizacije izdelka.

Numerične simulacije s področja računalniške dinamike tekočin potekajo v vrstnem redu štirih faz [5]: izdelava geometrijskega modela in mreženje, modeliranje fizike pojava in nastavitve "solverja", reševanje sistema enačb, spremljanje poteka simulacije in obdelava podatkov ter po potrebi revizija postopka. V primeru obravnavanega ventila je bilo območje računanja 3-dimenzionalen volumen, na vse strani omejen s ploskvami. Območje računanja je program sam razdelil na pretočne elemente - heksaedre (kocke), katerih oglišča so predstavljala vozlišča s koordinatami x , y in z . Opisana volumska mreža je strukturirana in opisana z algoritmom, s čimer je zmanjšana zahtevnost numerične simulacije. Če bi bilo območje razdeljeno na tetraedre (trirobe piramide), bi govorili o nestrukturirani mreži, ki je ne bi mogli več opisati s splošnim algoritmom. V drugi fazi predprocesiranja smo izbrali fizikalne modele, definirali snovske lastnosti kapljevine ter robne pogoje problema. S temi smo podali informacije o toku skozi mejne ploskve območja; v našem primeru sta bila to pogoja časovno odvisnega vtoka na tlačnem vodu in povratnega vtoka na delovnem vodu ter pogoja odprtja na koncu voda posameznega vtoka (statični tlak). V tej fazi smo definirali tudi povprečno hrapavost mejnih ploskev območja R_a in model turbulence.

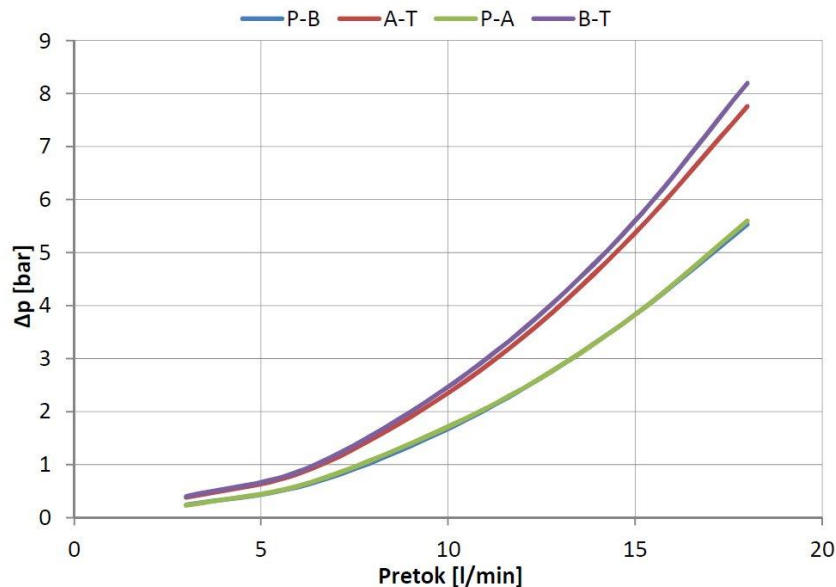
Za najmanjši (3 l/min) in največji (18 l/min) pretok vode skozi izvrtino premera 6 mm pri kinematični viskoznosti vode, $v_{\text{vode}} = 1.01 \text{ mm}^2/\text{s}$ sta mejni Reynoldsovi števili: $Re_{\text{min}} = 9937$ in $Re_{\text{max}} = 59624$. Zgornja rezultata izračunanih mejnih vrednosti Re števila nam povesta, da smo ves čas v turbulentnem področju, saj je $Re > 2320$. V solverju smo tako definirali popolnoma turbulenten tok, njegovo intenzivnost in velikost. Posebnega turbulentnega modela nismo uporabili zaradi preobsežnosti naloge. V nadaljevanju je program nekaj ur računal vrednosti odvisnih spremenljivk v vsakem vozlišču posebej, za vsak nastavljen pretok, in sicer: tlak, hitrost, turbulentno kinetično energijo, disipacijo turbulentne kinetične energije in masni delež parne faze v primeru pojava kavitacije. Ko je program dosegel konvergenčne kriterije in je bila napaka med iteracijami manjša od prepisane, je bil izračun končan. Sledila je obdelava podatkov, katere rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.

Rezultati simulacije: ventil je bil prekrmljen v križni položaj. Slika 7 prikazuje potek tokovnic skozi ventil, in sicer iz priključka P na B in povratni tok iz A na T.



Slika 7: Potek tokovnic skozi obe poti v ventilu; $P \rightarrow B$ in $A \rightarrow T$

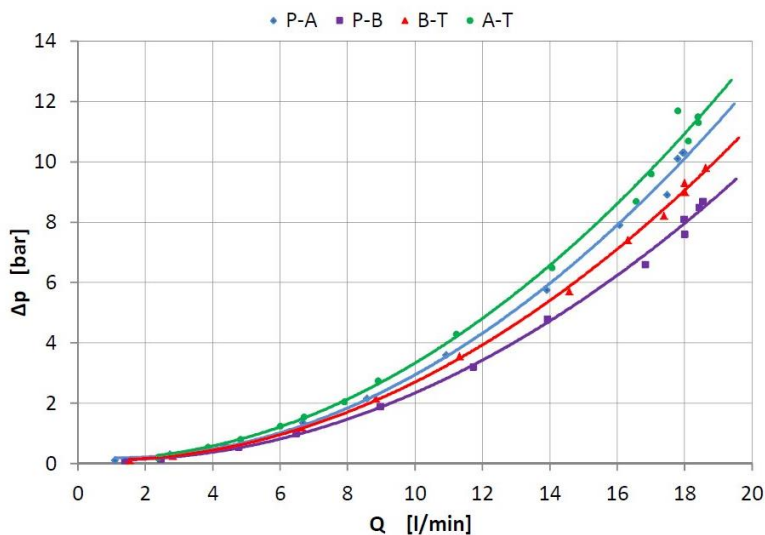
Izračunana Δp -Q karakteristika ventila: za izračun tlačne karakteristike ventila, v odvisnosti od pretoka, smo izvedli simulacije s časovno odvisnimi parametri. Pretok se je v realnem času 5 sekund povečal s 3 l/min na 18 l/min, in sicer v šestih korakih; vsako sekundo za 3 l/min. Enak pretok je vsakič tekkel iz tlačnega priključka na izbran delovni priključek (A in B) ter obratno, iz razbremenjenega delovnega priključka na povratni vod T. Računalnik je torej izračunal razmere v ventilu za 6 različnih pretokov, to je za oba krmilna položaja. Enake simulacije smo opravili za obe izvedbi ventila: z blokiranim in razbremenjenim (mali "h" položaj \rightarrow P blokirano, A, B in T medsebojno spojeni) ničelnim položajem. Na sliki 8 je prikazana izračunana tlačna karakteristika za ventil z blokiranim ničelnim položajem.



Slika 8: Izračunana Δp -Q karakteristika vodnega ventila za krmilni bat z blokiranim ničelnim položajem

3.2.3. Meritve Δp -Q karakteristike

Po opravljenih statičnih preizkusih ventila smo opravili še meritve padcev tlaka čez posamezen priključek ventila v prekrmljenem delovnem položaju. Namen meritev je bil izmeriti realno karakteristiko ventila in jo hkrati primerjati z že izračunano. Krivulje rezultatov meritev (sl. 9) so analogne krivuljam iz rezultatov simulacij tlačnih padcev v poglavju 3.2.2.



Slika 9: Izmerjena Δp -Q kakarakteristika vodnega ventila za krmilni bat z blokiranim ničelnim položajem

3.2.4. Meritve p-Q karakteristike

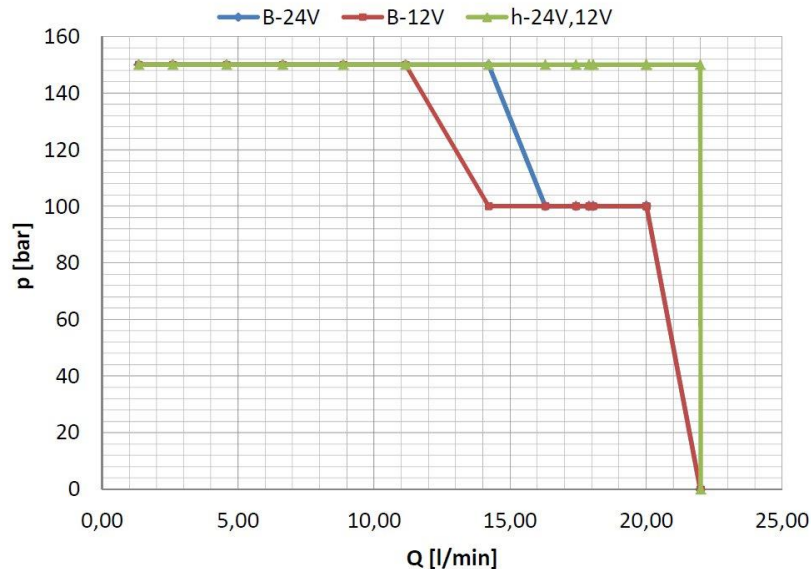
Karakteristika p-Q definira delovno območje ventila, v katerem se ventil še prekrmili. Z drugimi besedami lahko rečemo, da nam p-Q karakteristika pove, v katerem položaju se elektromagnetni ventil še zanesljivo vkrmlji. Preklapljanje ventila je v največji meri odvisno od karakteristike elektromagneta, torej od razpoložljive sile na kotvi v izhodiščni poziciji.

Za določitev p-Q karakteristike so bili postavljeni naslednji pogoji:

- napetost na tuljavi elektromagneta: 21.6V (10% manj od imenske napetosti) za 24V tuljavo, ter 10.8V za 12V tuljavo (2x);
- različna krmilna bata (za blokirani (B) in razbremenjen (h) ničelni položaj) (3x);
- obremenitev delovnih priključkov A in B (brez tlaka, z bremenom) (2x);
- vklop v različne delovne položaje (križni, vzporedni) (2x);
- vklop pri različnih vstopnih (sistemskih) tlakih na P vodu (0 bar, 50 bar, 100 bar in 150 bar) (4x).

Na delovna priključka A in B smo priključili vodni hidravlični valj s skožno batnico. Ventil je bil prvič z razbremenjenim in drugič z blokiranim ničelnim položajem. Poleg tega so bile najprej na jedro elektromagneta nameščene 24 V tuljave, drugič pa 12 V . Vsakič smo preklapljanje ventila testirali z 10% nižjo napetostjo od nominalne. Večkratne meritve, v skladu s predpisanimi pogoji, so nam dale rezultate, ki so prikazani na sliki 10. Preizkusi so pokazali, da ventil z razbremenjenim ničelnim položajem zanesljivo deluje na celotnem področju testiranja, torej pri tlaku v sistemu 150 bar, pretoku do 22 l/min in sicer ob uporabi 24 V ali 12V tuljave. Testi preklapljanja ventila z blokiranim ničelnim položajem so dali nekoliko slabše rezultate, saj postane ventil pri tlaku nad 100 bar in pretoku nad 11 l/min nezanesljiv. Ventil je v tem področju nad krivuljo preklopil le občasno. Z večkratnimi ponovitvami testov pod enakimi pogoji smo

ugotovili, da so za nezanesljivo delovanje oziroma zatikanje ventila v končni legi verjetno krive tudi konstrukcijske rešitve vpetja krmilnega bata na kotvo elektromagneta. Odločilen vpliv na rezultate so očitno imeli blokirani priključki v ničelnem položaju. Pri testih z 12 V tuljavami so bili rezultati slabši kot pri testih s 24 V tuljavami, verjetno na račun izkoristka pri pretvorbi električne energije v mehansko. Pri ventilu z razbremenjenim ničelnim položajem se takšne težave niso pojavile.



Slika 10: Izmerjena p-Q karakteristika vodnega ventila za krmilni bat z blokiranim (B) in "h" ničelnim položajem

4. Zaključki in povzetki

Zasnovan, izdelan in preizkušen je bil nov vložni tip vodnega drsniškega potnega ventila z novim potisno vlečnim elektromagnetom.

Rezultati simulacij in preizkusov novega nerjavnega potisno-vlečnega elektromagneta so zelo obetajoči, saj elektromagnet "mazan z vodo" deluje bolje od pričakovanj.

Rezultati meritev notranjega puščanja prototipa novega vodnega ventila, drsniškega tipa, dokazujejo, da je mogoče izdelati drsniški tip vodnega ventila z zelo nizkim notranjim puščanjem, ki je primerljivo s podobnimi oljno-hidravličnimi ventili.

Izdelane so bile simulacije in meritve padca tlaka pri pretakanju skozi vodni ventil. Rezultati simulacij so podobni rezultatom dejanskih meritev in so sprejemljivi za uporabo ventila v aplikacijah vodne hidravlike.

Z meritvami je bilo določeno p-Q področje zanesljivega preklapljanja novega vodnega potnega ventila pri različnih napetostih in dveh različnih ničelnih položajih ventila. Ventil zanesljivo preklaplja v celotnem področju (150 bar in 22 l/min) pri krmilnem batu za razbremenjen ničelni položaj (položaj "h", kjer je priključek P blokirán, priključki A, B in T pa so medsebojno povezani) tako pri 12 kot tudi pri 24 V elektromagnetu.

Rezultati pričujočega razvojno-raziskovalnega dela dokazujejo, da je bil vodni vložni konvencionalni 4/3 potni ventil drsniškega tipa dobro zasnovan in izdelan ter, da ga je mogoče takoj uporabiti v aplikacijah vodne hidravlike.

5. Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Javni agenciji za podjetništvo in tuje investicije (JAPTI), Ministrstvu za gospodarstvo RS ter Evropskemu socialnemu skladu, ki so finančno podprli raziskave v okviru predstavljenega projekta. Avtorji smo iskreno hvaležni tudi podjetju TAJFUN Planina d.o.o. za sofinanciranje projekta. Vsem omenjenim se zahvaljujemo za pomoč.

6. Literatura

- [1] Jože Hlebanja, Metodika konstruiranja, UL Fakulteta za strojništvo, 2003
- [2] Baoping Cai, Yonghong Liu, Xiaojie Tian, Zelu Wang, Fei Wang, Hang Li, and Renjie Ji: Optimization of Submersible Solenoid Valves for Subsea Blowout Preventers, College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China
- [3] George P. Gogue, Joseph J. Stupak, Jr.: Theory and Practice of Elektromagnetic Design of DC Motors and Actuators, G2 Consulting, Beaverton, OR 97007
- [4] Franc Majdič: Voda kot kapljevina v pogonsko-krmilni hidravliki, doktorska disertacija, FS, Ljubljana 2010
- [5] <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/guide/chp03.pdf>, dne 28.5.11