

EKSPERIMENTALNO PREVERJANJE TOKOVNIH SIL V HIDRAVLICNIH VENTILIH

Blaž Bobnar, Anže Čelik, Franc Majdič

Izvleček:

Tokovna sila je ena od sil, ki delujejo na krmilni bat in pomembno vplivajo na delovanje ventila. Za eksperimentalno preverjanje tokovnih sil smo razvili dva tipa merilnega sistema. Pri prvem smo tokovno silo merili z merilnikom sile, pri drugem pa z elektrodinamičnim aktuatorjem, ki deluje na principu zvoka. Tokovno silo meri posredno preko električnega toka. Tokovne sile smo merili pri različnih pogojih toka kapljevine, različnih odprtjih ventila in različnih pretokih. Po analizi izmerjenih vrednosti smo eksperimentalne rezultate primerjali z rezultati predhodno izvedene numerične simulacije. Numerične simulacije smo izvedli v podjetju Poclain Hydraulics. Ugotovili smo, da se eksperimentalni rezultati večinoma ujemajo z numerično simulacijo. Izjema so določena odstopanja, ki so posledica težav pri meritvah.

Ključne besede:

tokovne sile, hidravlični ventili, numerične simulacije, meritve, simetrični pogoji, nesimetrični pogoji

1 Uvod

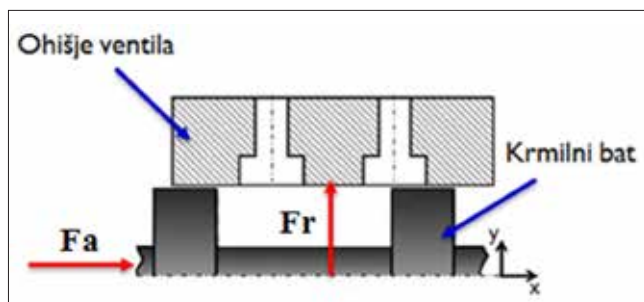
Hidravlični ventili so hidravlične sestavine, s pomočjo katerih krmilimo izvršilne sestavine. Za ustrezno oz. natančno krmiljenje potrebujemo ventile, ki ustrezajo tem zahtevam. Eden od najpomembnejših faktorjev, ki vplivajo na dinamične lastnosti ventilov, so tokovne sile. Še zlasti pri razvoju hidravličnih potnih ventilov imajo tokovne sile zelo pomembno vlogo, saj predstavljajo enega glavnih faktorjev pri določanju ustrezne velikosti aktuatorja za krmiljenje ventilov. Z zmanjšanjem tokovnih sil se posledično zmanjša tudi potrebna moč aktuatorja in s tem tudi poraba energije. Problema tokovnih sil se lahko lotimo na dva načina, in sicer numerično ali eksperimentalno. Pri numeričnem načinu reševanja problema se izvede simulacija s pomočjo ustreznega numeričnega modela. Pri eksperimentalnem načinu pa se izvedejo ustrezne meritve, ki se nato ovrednotijo. Pogosto pa se pri raziskavah uporablja kombinacija numeričnega in eksperimentalnega načina. Pri tem se na osnovi numerične analize izvede eksperiment, s katerim se nato potrdi ustreznost numerične simulacije. Pogosto si lahko pri razvoju ventilov pomagamo prav z numeričnimi simulacijami, ki so precej hitrejše v primerjavi z eksperimentom, kjer je potrebnih več priprav. Vendar pa je za določitev ustrezno-

sti numeričnega modela oz. za njegovo potrditev potrebno izvesti eksperiment, saj nam ta služi kot referenca.

2 Sile znotraj potnih ventilov

Sile, ki se pojavijo na krmilnem batu med delovanjem drsnih ventilov, delimo na bočne ali radialne sile (F_r) ter aksialne sile (F_a) [1], kot prikazuje *slika 1*. Bistvo delovanja drsnih ventilov je oscilatorno aksialno gibanje krmilnih batov z zelo različnimi frekvencami in amplitudami v izvrtinah ohišij ventilov; praviloma so krožnega prečnega preseka. Znatne bočne sile nastanejo predvsem ob visokih tlakih zaradi nepravilne oblike krožnice prečnega prereza krmilnega bata in koničnosti (oblika prisekanega stožca). Koničnost je nezaželen, je reda velikosti do nekaj mikrometrov in posledica minimalnih napak pri izdelavi, ko ne dosežemo idealne cilindrične oblike krmilnih batov ali njihovih funkcionalnih delov. Bočne sile povečajo trenje med krmilnim batom in steno izvrtine v ohišju ventila. Razlog za večje bočne sile in posledično večje trenje in lepljenje med krmilnim batom in ohišjem ventila so lahko tudi delci v hidravlični kapljevini, ker povečujejo izsrednost lege bata v izvrtini. Eden od načinov za zmanjšanje bočne sile je uporaba razbremenilnih utorov na obodu krmilnega bata [2]. Med aksialne sile, ki delujejo na krmilni bat, pa spadajo sila viskoznega trenja, sila Coulombovega trenja, sila lepljenja in zagozdenja pri mirovanju, sila odpora proti pretakanju, vztrajnostne masne sile, sila vzmeti, sila vkrmiljenja (sila elektromagneta, sila mehanskega vkrmiljenja, sila tlaka hidravličnega ali pnevmatičnega vkrmiljenja) in tokovne sile.

Blaž Bobnar, mag. inž. str., Iskra Pio, d. o. o., Šentjernej; **mag. Anže Čelik**, univ. dipl. inž., Poclain Hydraulics, d. o. o., Žiri; **doc. dr. Franc Majdič**, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1 : Aksialne in bočne sile, ki delujejo na krmilni bat

Tokovna sila

Tokovna sila je posledica neravnovesja med statičnim in dinamičnim tlakom pri toku kapljevine iz komore ventila in pogosto povzroči poslabšanje natančnosti delovanja ventila [3]. Tokovna sila deluje v smeri zapiranja ventila, kar pomeni v nasprotni smeri kot sila aktuatorja. V večini primerov povečanje pretoka skozi ventil povzroči tudi večje tokovne sile, ki delujejo na krmilni bat. Tokovne sile predstavljajo enega od najbolj pomembnih faktorjev pri določanju velikosti aktuatorja, potrebnega za krmiljenje ventila. Še posebno pri razvoju proporcionalnih (zvezno delujočih) ventilov predstavljajo tokovne sile zelo pomemben faktor, ker vplivajo na njihove dinamične lastnosti ter linearnost. Z večanjem tokovne sile posledično potrebujemo večje moči na aktuatorjih, kar pomeni tudi večjo porabo energije. Tokovna sila, ki deluje na krmilni bat, pogosto povzroči tudi vibracije na ventilu.

3 Razvoj preizkuševališča

Za izvedbo eksperimentalne raziskave tokovnih sil smo razvili 2 tipa preizkuševališč. Pri prvem tipu smo za merjenje tokovne sile uporabljali merilnik sile, pri drugem tipu pa elektrodinamični aktuator (ang. voicecoil actuator), ki je hkrati aktuator in merilnik. Izhodišče za razvoj preizkuševališča je predstavljala testni ventil KV-4/3-5KL-6-1L. Za izvedbo meritev so bili razviti in izdelani adapterji oz. nosilci omenjenih merilnikov.

Testni ventil

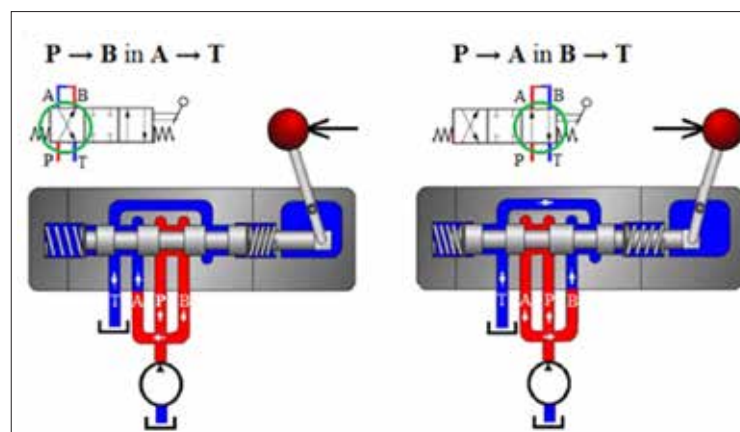
Za testni ventil smo uporabili preklopni hidravlični 4/3-potni ventil KV-4/3-5KL-6-1L nazivne velikosti NG 6. Ventil je namenjen za tlake do 350 bar in pretoke do 80 L/min ter ima v ničelnem položaju vse priključke zaprte (slika 2). Za izvedbo meritev smo z ventila odstranili elektromagneta. Obravnavani testni ventil ima tri možne položaje, in sicer ničelni položaj, križni položaj in vzporedni položaj. Tok kapljevine skozi ventil je lahko simetričen, kar pomeni, da teče tok kapljevine iz $P \rightarrow B$ ter dalje iz $A \rightarrow T$ (križni položaj) ali pa iz $P \rightarrow A$ in dalje $B \rightarrow T$ (vzporedni položaj).

položaj), kot je prikazano na sliki 2. Pri tem sta A in B povezana. To je razvidno iz simbolov in z barvne slike; vod $B \rightarrow A$ (tik nad črpalko) se križa z vodom P. (Ni cevne spoja, je križanje vodov.)

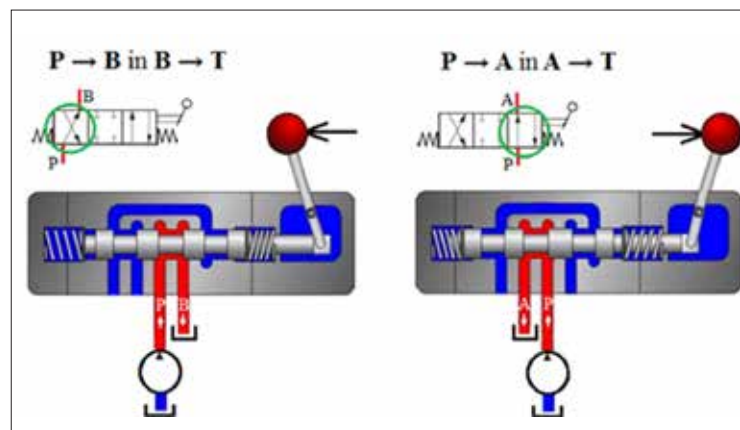
Lahko pa imamo tudi nesimetrični tok kapljevine, kar pomeni, da teče kapljevina lahko iz $P \rightarrow B$ in dalje $B \rightarrow T$ (križni položaj) ali pa iz $P \rightarrow A$ in dalje $A \rightarrow T$ (vzporedni položaj), kot je prikazano na sliki 3. V tem primeru teče tok kapljevine samo skozi polovico ventila.

Merilni sistem z merilnikom sile

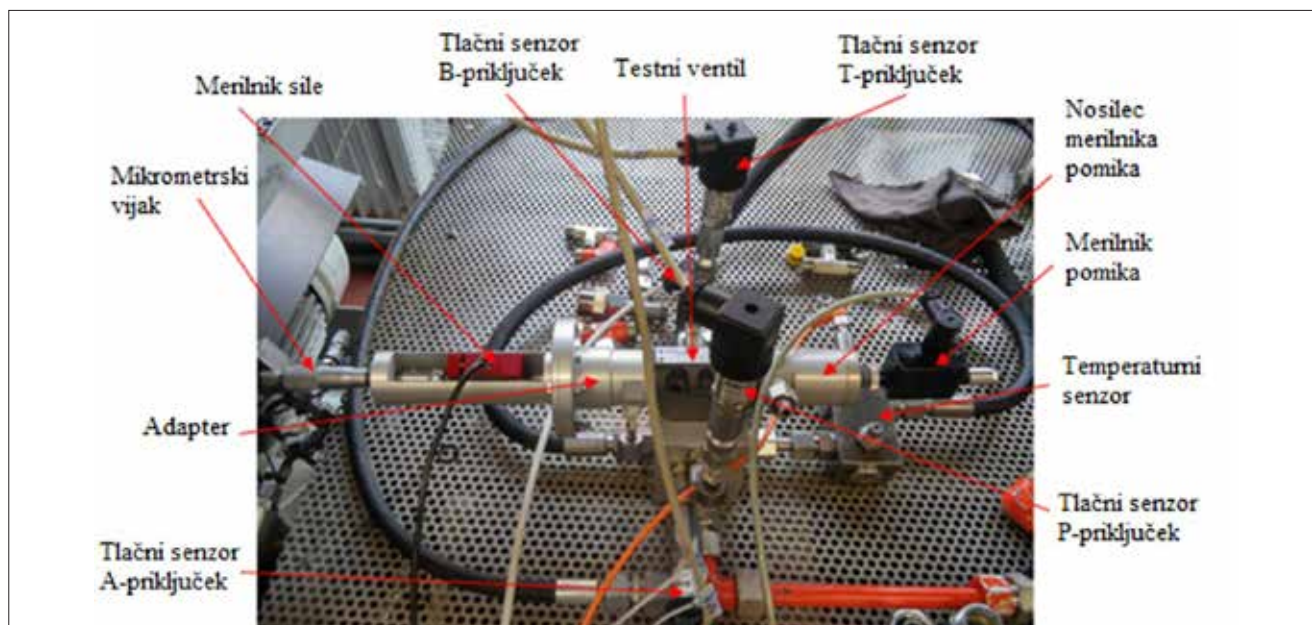
Za merjenje tokovnih sil z merilnikom sile na preizkuševališču smo razvili in izdelali vse potrebne nosilce ter povezovalne elemente. Poleg merilnika sile je sistem zajemal še merilnik pomika krmilnega bata, merilnik pretoka, tlačne senzorje na vseh priključkih testnega ventila ter merilnik temperature. Za pomik krmilnega bata smo uporabili mikrometrski vijak, saj ta omogoča natančno nastavitvev pomika krmilnega bata (do 0,01 mm). Testni ventil smo skupaj z vsemi merilniki namestili na priključni blok s hidravličnimi in merilnimi priključki za montažo tlačnih senzorjev. Tokovne sile smo merili z dve-



Slika 2 : Simetrični tok kapljevine skozi 4/3-potni ventil



Slika 3 : Nesimetrični tok kapljevine skozi 4/3-potni ventil

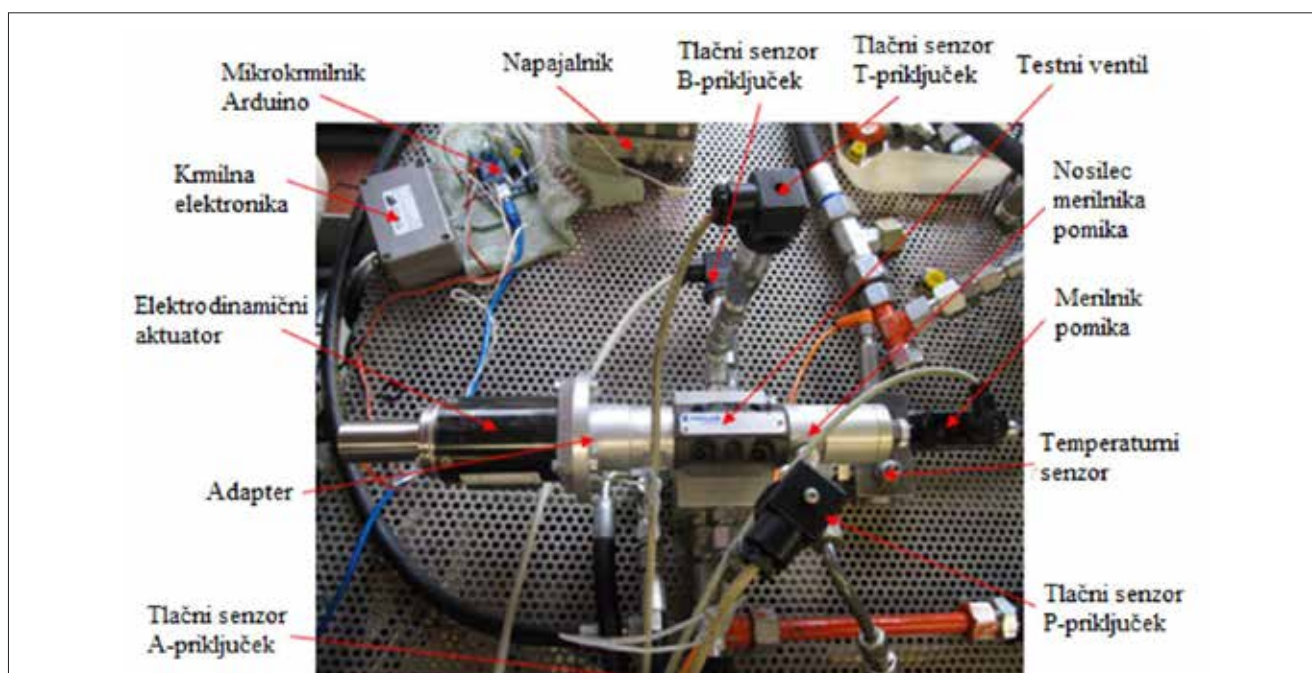


Slika 4 : Merilni sistem z merilnikom sile

ma merilnikoma sile istega proizvajalca z različnima nominalnima obremenitvama. Za to smo se odločili, ker so predhodno izvedene simulacije nakazale, da so tokovne sile pri nesimetričnih pogojih toka kapljevine precej višje kot pri simetričnih pogojih. Pri nesimetričnih pogojih smo uporabili merilnik sile z nominalno obremenitvijo 250 N, pri simetričnih pogojih pa z nominalno obremenitvijo 50 N. Pomik krmilnega bata oz. odprtje ventila pa smo merili z LVDT-merilnikom pomika z merilnim območjem ± 20 mm. Merilni sistem z merilnikom sile je prikazan na *sliki 4*.

Merilni sistem z elektrodinamičnim aktuatorjem

Za merjenje tokovnih sil smo za primerjavo uporabili tudi elektrodinamični aktuator (ang. voicecoil actuator), ki deluje na principu zvoka in meri tako silo kot tudi pomik. Merjenje sile z elektrodinamičnim aktuatorjem je torej posredno, saj dobimo izmerjeno silo preko električnega toka, ki je potreben, da aktuator drži breme v določenem položaju. To pomeni, da elektrodinamični aktuator ves čas



Slika 5 : Merilni sistem z elektrodinamičnim aktuatorjem

nekoliko popravlja položaj glede na dinamiko obremenitve. Za meritve smo uporabili elektrodinamični aktuator Pack aero AE 60. Aktuator ima vgrajeno tudi Hallovo sondo, ki deluje kot merilnik pomika, preko katerega lahko s pomočjo povratne zanke ves čas popravljamo pozicijo oz. držimo breme na določenem položaju. Merilnik ima največji pomik 11,55 mm, pri nominalnih pogojih pa lahko merimo sile do približno 40 N. Krmiljenje elektrodinamičnega aktuatorja poteka preko mikrokrmilnika Arduino in krmilne elektronike. Merilni sistem za merjenje z elektrodinamičnim aktuatorjem, prikazan na *sliki 5*, je zelo podoben tistemu z merilnikom sile, saj smo ga le nekoliko prilagodili. Desna stran z merilnikom pomika je ostala povsem enaka kot pri merilnem sistemu z merilnikom sile, saj smo merilnik pomika uporabili za kontrolo pomika Hallove sonde. Na levi strani pa smo namesto nosilca merilnika sile namestili elektrodinamični aktuator, saj adapter omogoča montažo obeh merilnikov.

4 Eksperimentalna raziskava

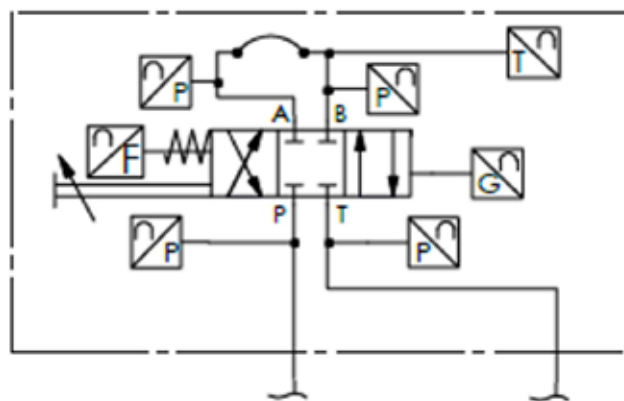
Za izvedbo meritev smo uporabili že obstoječe veliko hidravlično preizkuševališče v Laboratoriju za fluidno tehniko (LFT). Preizkuševališče smo za potrebe meritev tokovne sile le nekoliko prilagodili. Uporabili smo hidravlično črpalko Hydroeduc z iztisnino 130 cm³/vrt. ter največjim pretokom 170 L/min pri 65 bar. Nazivna moč elektromotorja je 20 kW. Za vzpostavitev pretoka na zahtevano vrednost smo uporabili tokovni ventil (dušilko). Hidravlični agregat ima vgrajen tudi hladilni sistem, s pomočjo katerega smo lahko nadzirali delovne temperature hidravlične kapljavine. Meritve tokovne sile smo izvedli pri različnem pomiku krmilnega bata oz. pri različnem odprtju ventila in pri različnih pretokih, kot je prikazano v *preglednici 1*.

Konfiguracije preizkuševališča z merilnikom sile

Meritve tokovne sile so bile izvedene pri različnih konfiguracijah preizkuševališča. Ker so bile vse meritve narejene na istem hidravličnem agregatu, so v nadaljevanju predstavljene le hidravlične sheme za posamezno konfiguracijo preizkuševališča. Pri kon-

Preglednica 1 : Odprtje ventila in pretoki za izvedbo meritev

Odprtje ventila	Pretoki
[%]	[L/min]
11,43	10
28,57	30
57,14	50
85,71	80
100	

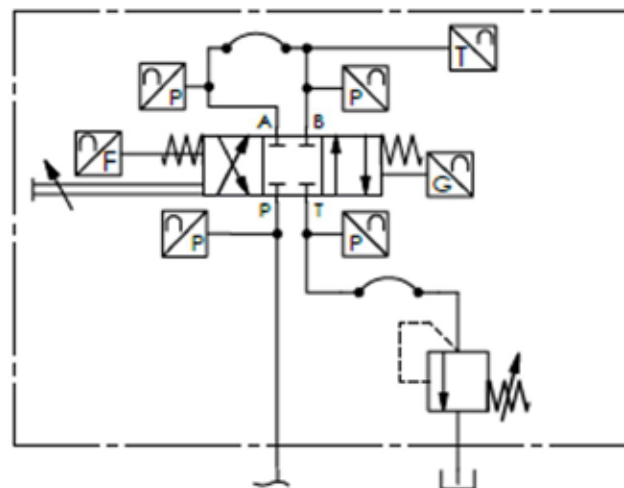


Slika 6 : Hidravlična shema preizkuševališča za simetrični tok kapljavine in atmosferski tlak na T-priključku

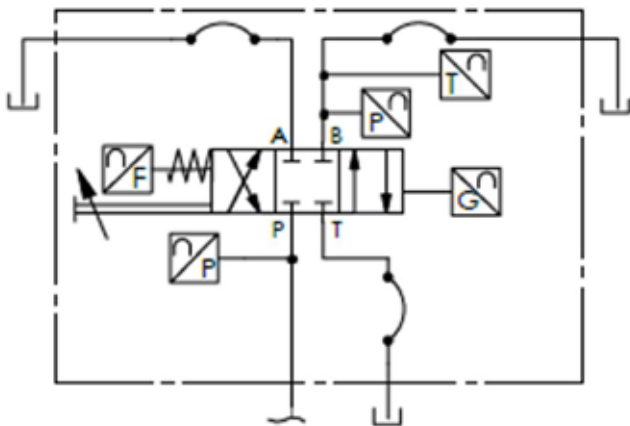
figuraciji preizkuševališča za merjenje tokovnih sil pri simetričnih pogojih toka kapljavine in atmosferskem tlaku na T-priključku imamo priključka A in B povezana. Na *sliki 6* je prikazana hidravlična shema za omenjeno konfiguracijo preizkuševališča.

Pri konfiguraciji preizkuševališča za merjenje tokovnih sil pri simetričnih pogojih toka kapljavine in povišanem tlaku na T-priključku smo za povišanje tlaka uporabili nastavljivi varnostni ventil na T-priključku. Namen te konfiguracije je ugotoviti vpliv povišanega tlaka na T-priključku na tokovno silo, ki deluje na krmilni bat. Hidravlična shema omenjene konfiguracije je prikazana na *sliki 7*.

Pri konfiguraciji preizkuševališča za merjenje tokovnih sil pri nesimetričnih pogojih toka kapljavine in atmosferskem tlaku na B-priključku imamo samo povezavo P→B in B→T. To pomeni, da imamo tok kapljavine samo skozi polovico ventila. Zaradi možnosti notranjega puščanja so vsi prosti priključki speljani v rezervoar. Hidravlična shema konfiguracije preizkuševališča je prikazana na *sliki 8*.

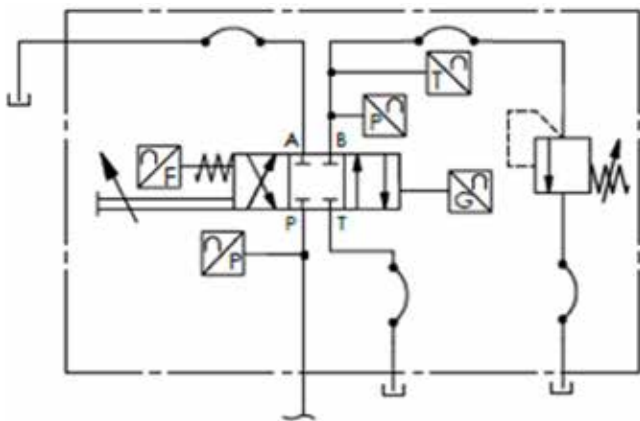


Slika 7 : Hidravlična shema preizkuševališča za simetrični tok kapljavine in povišan tlak na T-priključku



Slika 8 : Hidravlična shema preizkuševališča za nesimetrični tok kapljavine in atmosferski tlak na B-priključku

Tudi pri nesimetričnem toku kapljavine smo izvedli meritve pri povišanem tlaku, in sicer na B-priključku. Za povišanje tlaka smo tako kot pri simetričnih pogojih uporabili nastavljivi varnostni ventil. Hidravlična shema omenjene konfiguracije preizkuševališča je prikazana na sliki 9.

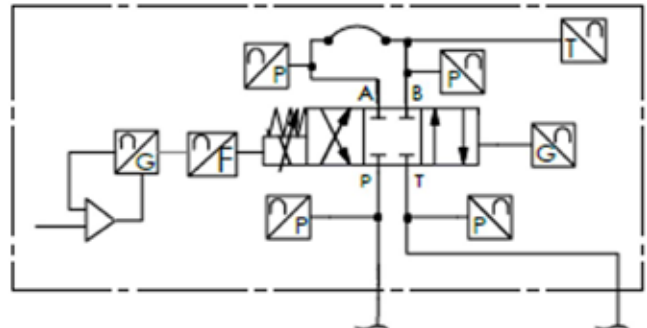


Slika 9 : Hidravlična shema preizkuševališča za nesimetrični tok kapljavine in povišan tlak na B-priključku

Konfiguracije preizkuševališča z elektrodinamičnim aktuatorjem

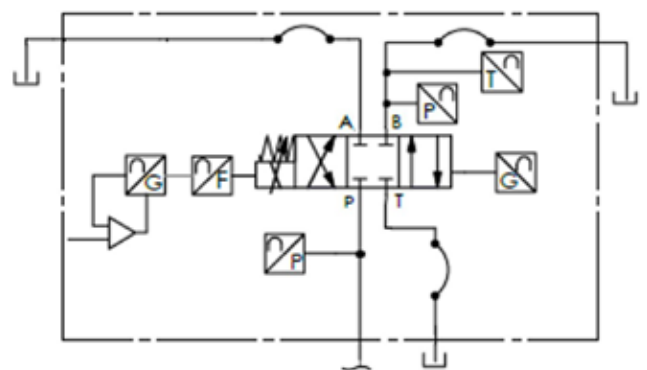
Podobno kot pri merjenju tokovne sile z merilnikom sile smo tudi z elektrodinamičnim aktuatorjem izvedli meritve pri različnih konfiguracijah glede na različno pot kapljavine skozi testni ventil. Pri risanju hidravličnih shem smo za simbol elektrodinamičnega aktuatorja uporabili kombinacijo simbolov proporcionalnega magneta, merilnika sile ter merilnika pomika s povratno zanko. Kombinacijo teh simbolov smo izbrali zato, ker lahko aktuator zvezno krmili ventil posredno preko električnega toka ter meri silo in hkrati tudi položaj, ki ga ves čas popravlja glede na dano obremenitev. Zato je v simbolu prikazana tudi povratna zanka. Na sliki 10 je prika-

zana hidravlična shema za merjenje tokovne sile pri simetričnem toku kapljavine in atmosferskem tlaku na T-priključku. V tem primeru se nastavlja položaj krmilnega bata in meri tokovna sila z elektrodinamičnim aktuatorjem.



Slika 10 : Hidravlična shema preizkuševališča za simetrični tok kapljavine z elektrodinamičnim aktuatorjem in atmosferskim tlakom na T-priključku

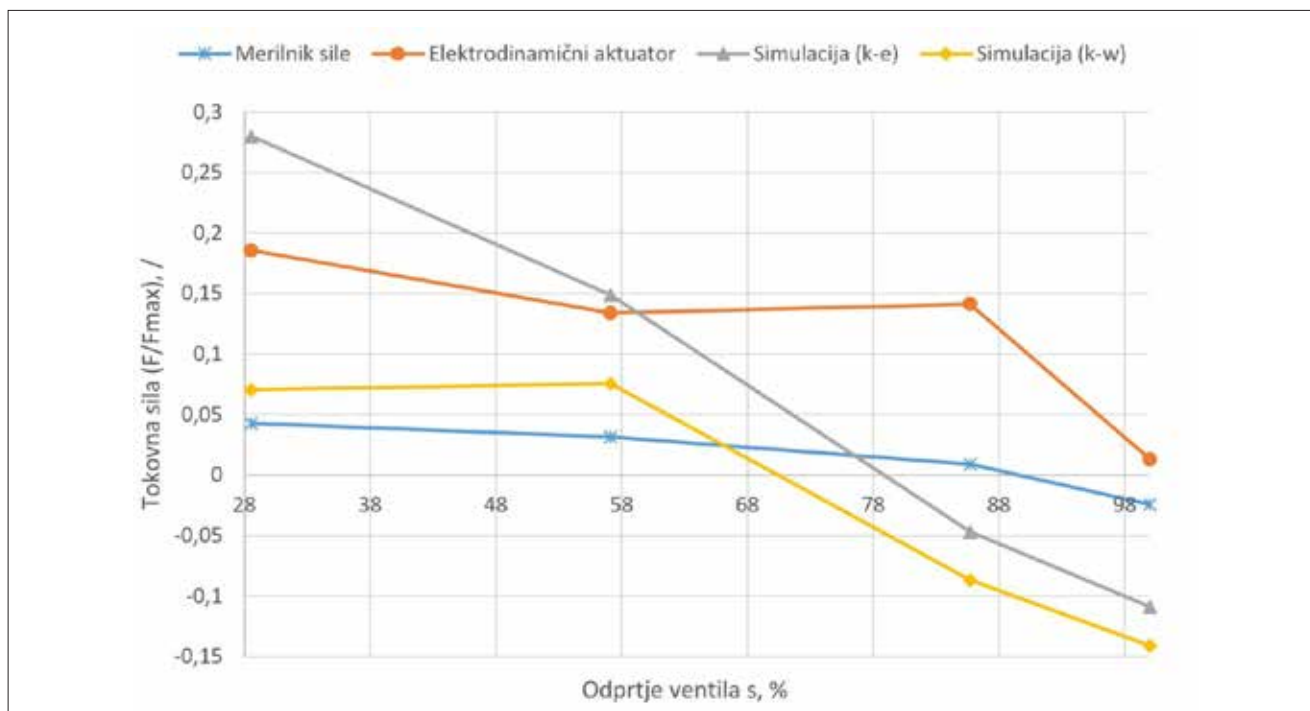
Meritve tokovne sile smo izvedli tudi pri nesimetričnem toku kapljavine pri atmosferskem tlaku na B-priključku. Hidravlična shema za omenjeno konfiguracijo preizkuševališča je prikazana na sliki 11.



Slika 11 : Hidravlična shema preizkuševališča za nesimetrični tok kapljavine z elektrodinamičnim aktuatorjem in atmosferskim tlakom na B-priključku

5 Rezultati

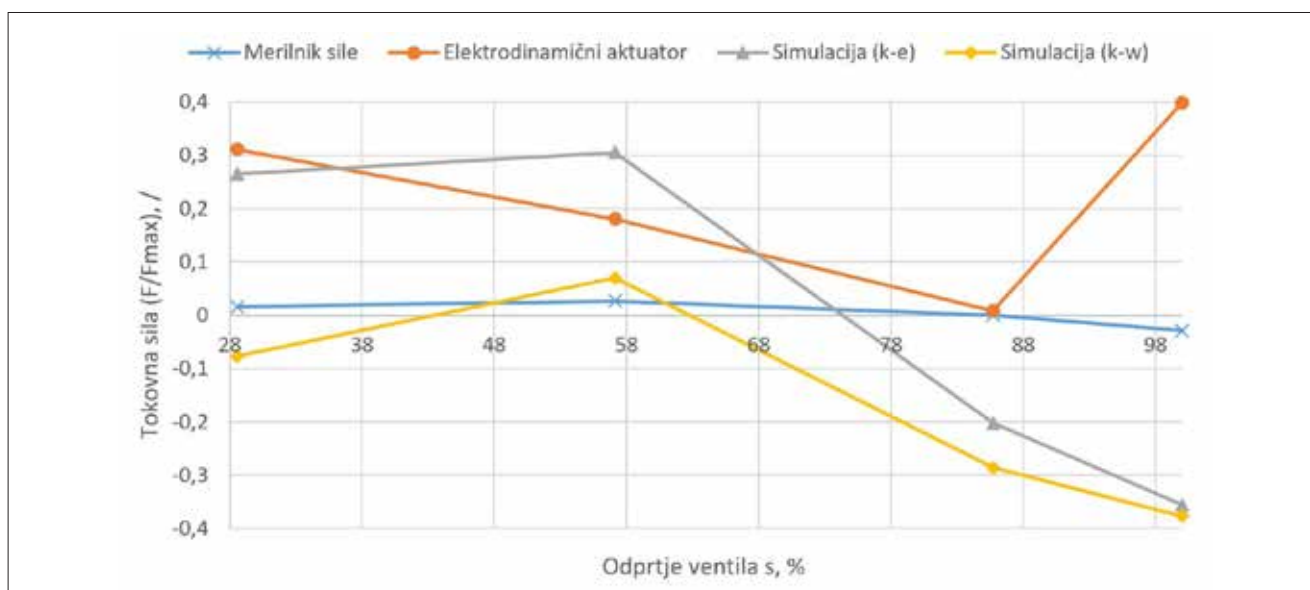
V poglavju so predstavljeni rezultati meritev tokovne sile s standardnim krmilnim batom za simetrični in nesimetrični tok kapljavine za oba principa merjenja. Rezultati so prikazani kot primerjava med izmerjenimi vrednostmi z merilnikom sile, elektrodinamičnim aktuatorjem ter rezultati numerične simulacije pri dveh različnih turbulentnih modelih za pretok 30 L/min in 50 L/min. Pri rezultatih meritev tokovne sile za simetrični tok kapljavine pri pretoku 30 L/min, prikazanih na sliki 12, je opaziti večje odstopanje med izmerjenimi vrednostmi in simulacijo. Razlog



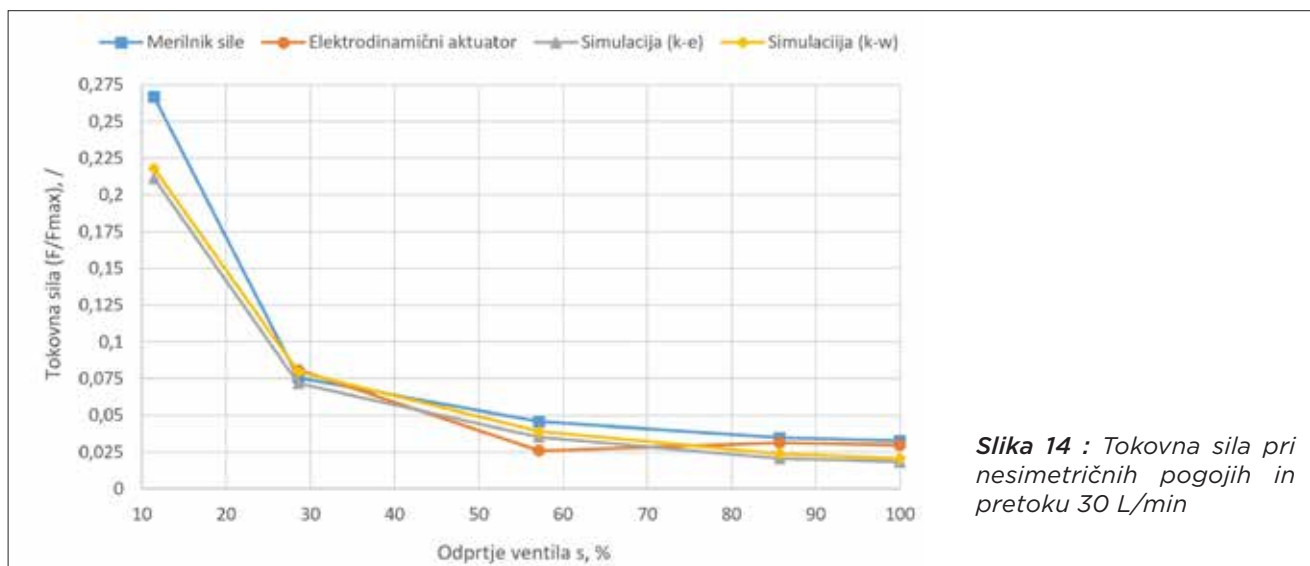
Slika 12 : Tokovna sila pri simetričnih pogojih in pretoku 30 L/min

za to odstopanje je poleg merilnega šuma tudi pojav bočne oz. radialne sile med krmilnim batom in ohišjem ventila, kar pomeni, da z merilnikom sile ne moremo zajeti čiste tokovne sile, ki deluje v aksialni smeri. Pri numerični simulaciji je bila zajeta le čista tokovna sila, saj simulacija ne upošteva vpliva bočnih oz. radialnih sil na aksialno tokovno silo. Glede na to, da imajo krivulje relativno podoben trend, lahko rečemo, da meritve sovpadajo s simulacijo kljub nekoliko večjemu odstopanju. Ker pa so izmerjene vrednosti tokovne sile relativno majhne, imajo motilni faktorji v tem primeru še nekoliko večji vpliv.

Pri rezultatih meritev pri pretoku 50 L/min, prikazanih na *sliki 13*, pa lahko opazimo še precej večje odstopanje izmerjenih in simuliranih vrednosti tokovne sile. V tem primeru ima bočna sila še precej večji vpliv kot pri pretoku 30 L/min. Iz tega lahko sklepamo, da se vpliv bočne sile povečuje z višanjem pretoka, poleg tega pa je bočna sila odvisna tudi od velikosti reže med krmilnim batom in ohišjem ventila. V primeru uporabe standardnega krmilnega bata je razmerje med premerom krmilnega bata in premerom izvrtine v ohišju 0,999, kar pomeni, da je radialna reža zelo majhna. Lahko tudi opazimo, da



Slika 13 : Tokovna sila pri simetričnih pogojih in pretoku 50 L/min



Slika 14 : Tokovna sila pri nesimetričnih pogojih in pretoku 30 L/min

so vrednosti, izmerjene z elektrodinamičnim aktuatorjem, nekoliko višje kot pri merilniku sile. Razlog za to bi lahko bil ta, da elektrodinamični aktuator ves čas nekoliko popravlja položaj krmilnega bata glede na obremenitev. Posledično ima bočna sila oz. trenje nekoliko manjši vpliv, ker se krmilni bat ves čas giblje.

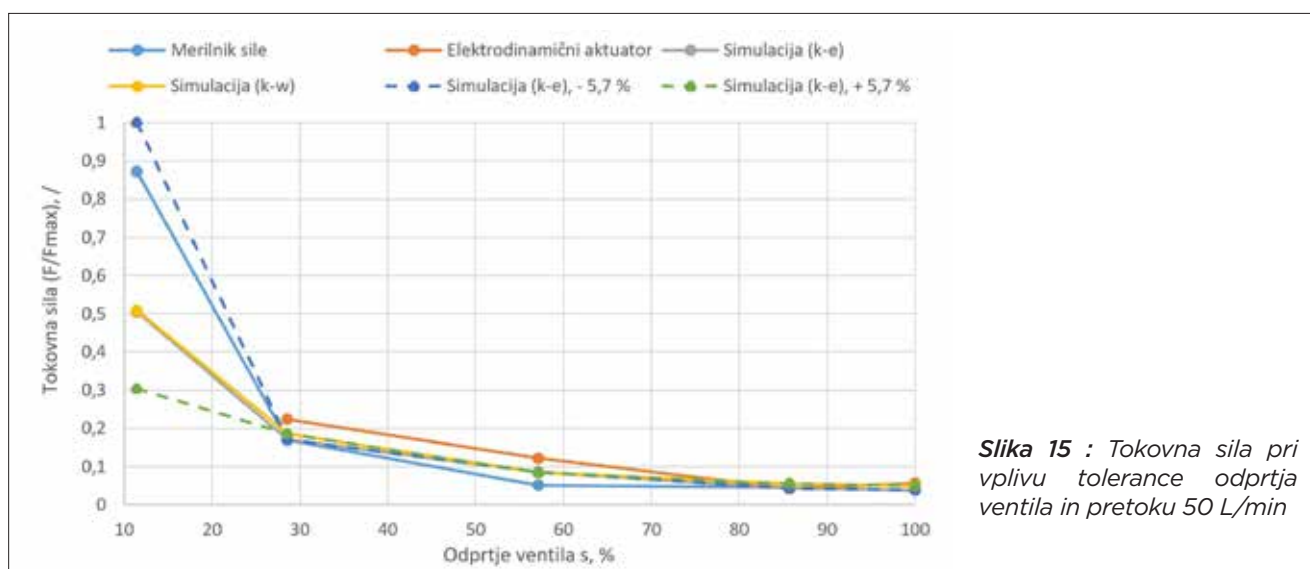
Glede na to, da pri nesimetričnih pogojih tok kapljevine teče le skozi polovico ventila, je bilo v tem primeru pričakovati nekoliko boljše rezultate kot pri simetričnih pogojih. Kot lahko opazimo pri rezultatih tokovne sile pri pretoku 30 L/min, prikazanih na *sliki 14*, imamo pri nesimetričnem toku kapljevine precej boljše ujemanje izmerjenih in simuliranih vrednosti tokovne sile kot pri simetričnem toku. Ker je pot kapljevine krajša in ima manj ovir na poti skozi ventil, imajo pričakovano tudi bočne sile precej manjši vpliv. Nekoliko manjše odstopanje se kaže le pri meritvi z merilnikom sile pri 11,43-odstotnem odprtju ventila, kjer je izmerjena vrednost tokovne sile nekoliko višja kot pri simulaciji. Razlog za odstopanje bi lahko bil v nekoliko nenatančnem položaju krmilnega bata. Težavo z natančnim pozicioniranjem krmilnega bata oz. odprtjem ventila smo sicer imeli skozi celotne meritve, saj z uporabljenim merilno opremo ni bilo mogoče zagotoviti bolj natančne pozicije krmilnega bata. Zaradi prevelikega raztrosa meritev v rezultatih nismo upoštevali meritev z elektrodinamičnim aktuatorjem pri 11,43-odstotnem odprtju ventila.

Tudi rezultati izmerjenih vrednosti tokovne sile pri pretoku 50 L/min, kot prikazuje *slika 15*, kažejo na ujemanje z numerično simulacijo, saj so odstopanja relativno majhna. Se pa tudi v tem primeru, podobno kot pri pretoku 30 L/min, pojavi večje odstopanje pri odprtju za 11,43 %. Razlog za odstopanje pa je ponovno nenatančnost pozicioniranja krmilnega bata, saj je pri zelo majhnih odprtjih ventila natančnost pozicioniranja zelo pomembna. V tem primeru

nam že stotinka milimetra odstopanja povzroči veliko razliko v tokovni sili, o čemer smo se prepričali pri meritvah. Vendar pa, kot smo že omenili, z uporabljenim opremo ni bilo mogoče zagotoviti bolj natančne pozicije krmilnega bata oz. odprtja ventila. Pri odprtju ventila za 11,43 % meritev z elektrodinamičnim aktuatorjem nismo izvedli, saj so že rezultati numerične simulacije nakazali, da se tokovna sila giblje na meji zmogljivosti elektrodinamičnega aktuatorja. Da bi dokazali, kako pomembna je natančnost pozicioniranja krmilnega bata in s tem odprtja ventila, rezultati simulacije prikazujejo tudi vpliv tolerance pomika krmilnega bata oz. odprtja ventila. Toleranca predstavlja povečanje oz. zmanjšanje odprtja ventila za približno 5,7 %. Kot lahko opazimo, se vpliv tolerance pri nominalnem pomiku za 11,43 % močno pozna na velikosti tokovne sile. Ugotovimo lahko, da je bilo dejansko odprtje ventila med meritvijo bližje odprtju za 5,73 % kot pa za 17,13 %, kar pomeni, da je bilo dejansko odprtje ventila nekoliko manjše od nominalne vrednosti. Kot pa lahko vidimo pri večjih odprtjih ventila (od 28,57 % dalje), natančnost pozicioniranja nima več tako velikega vpliva, saj sta krivulji s toleranco $\pm 5,7$ % praktično poravnani s tisto pri nominalni vrednosti.

6 Zaključek

V raziskavi sta bila za namen validacije oz. potrditve numeričnega modela razvita in izdelana dva merilna sistema z različnim principom merjenja tokovnih sil v 4/3 hidravličnem potnem ventilu. Tokovno silo smo merili z merilnikom sile neposredno, z elektrodinamičnim aktuatorjem pa posredno preko električnega toka. Meritve so bile na obeh merilnih sistemih izvedene tako za simetrične kot tudi za nesimetrične pogoje toka kapljevine. Pri meritvah smo naleteli tudi na nekaj težav, ki so močno vplivale na rezultate meritev. Med glavnimi težavami bi izpostavili vpliv bočnih sil ter nenatančnost pozici-



Slika 15 : Tokovna sila pri vplivu tolerance odprtja ventila in pretoku 50 L/min

oniranja krmilnega bata v ničelnem položaju. Nenatančnost pozicioniranja krmilnega bata je najbolj vplivala na meritve tokovne sile pri najmanjšem odprtju ventila (11,43 %). Ugotovljeno je bilo, da je uje-manje izmerjenih vrednosti z rezultati numerične simulacije boljše pri nesimetričnem toku kapljevine. Pokazali smo, da so bile pri nesimetričnem toku kapljevine izmerjene precej višje tokovne sile kot pri simetričnem toku pri enakih pogojih. Pri meritvah z merilnikom sile je bilo razmerje med največjo izmerjeno silo pri nesimetričnih pogojih in največjo izmerjeno silo pri simetričnih pogojih 20,9, pri meritvah z elektrodinamičnim aktuatorjem pa 5,8. Meritve tokovne sile pri povišanem tlaku na T-priključku pri simetričnih pogojih in na B-priključku pri nesimetričnih pogojih so pokazale, da povišan tlak ne vpliva na velikost tokovne sile. Vpliv bočnih sil je bil precej bolj opazen pri simetričnem toku kapljevine, še zlasti pri višjih pretokih.

Z eksperimentalnim preverjanjem tokovnih sil smo v splošnem potrdili ustreznost predhodno izvedene nu-

merične simulacije. S tem smo dokazali, da se lahko ob ustrezno izbranem numeričnem modelu zelo približamo eksperimentalnim rezultatom, kar je ključnega pomena še zlasti pri razvoju novih ventilov. Na podlagi ustreznega numeričnega modela je namreč mogoče močno zmanjšati stroške razvoja novega ventila, saj so eksperimentalni testi dragi in dolgotrajni.

Viri

- [1] J. Pezdinik, F. Majdič: Pogonsko-krmilna hidravlika; Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, Ljubljana, 2012.
- [2] H. Basavaraj, S. Vilas: Theoretical analysis of state operating forces in control valves; MAT-TEC WEB ofconferences 144, RiMES 2017.
- [3] K. Tanaka, K. Kamata, K. Tomioka, T. Yamaguchi: Steady and Unsteady Flow Force acting on a Spool Valve. Conference Proceedings of Power Transmission and Motion control. Bath. UnitedKingdom. 2012.

Experimental validation of flow forces in hydraulic valves

Abstract:

Flow force is one of the force acting on the spool and has a significant influence on the operation of the valve. For the purpose of experimental verification of flow forces two types of measuring systems were developed. At the first measuring system, the flow force was measured with a force sensor, and the other with an electrodynamic actuator acting on the sound principle and which measures the flow force indirectly via the electric current. Flow forces were measured at various fluid flow conditions, different valve openings and different flow rates. After analyzing the measured values, the experimental results were compared with the results of a previously performed numerical simulation. Numerical simulations were performed in the company Poclain Hydraulics. It has been found that experimental results mostly match to numerical simulation with the exception of certain deviations, which are the result of the problems that we had during the measurements.

Keywords:

Flow forces, hydraulic valves, numerical simulations, measurements, symmetrical conditions, non symmetrical conditions