

# Simulacijski model nizekotlačnega omejevalnika tlaka

Anže ČELIK, Jernej BRADEŠKO, Matej ERZNOŽNIK

**Izvleček:** Simulacijska orodja so v podjetju Poclain Hydraulics, d. o. o., danes nepogrešljiv pripomoček. Služijo za potrebe boljšega razumevanja, analize in napovedovanja obnašanja izdelkov v različnih pogojih obratovanja ali v različnih konstrukcijskih izvedbah.

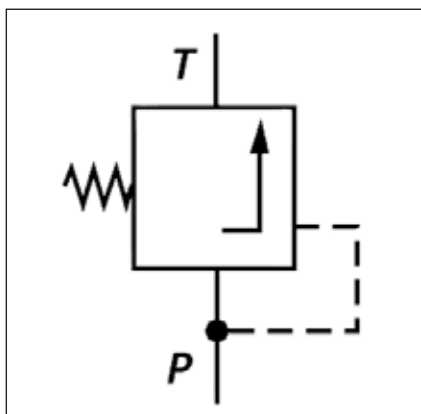
Pripravek prikazuje postopek izgradnje (numeričnega) simulacijskega modela nizekotlačnega omejevalnika tlaka v okolju AMESim. Analiza eksperimentalno merjenih izhodnih veličin služi za vrednotenje in kalibracijo simulacijskega modela. Dodatni pristopi (MKE, CFD) pripomorejo k boljšemu razumevanju ključnih parametrov obratovanja ventila.

Umerjeno simulacijsko orodje se uporablja v zgodnji fazi razvojnega cikla, in sicer najprej za razumevanje delovanja komponente same kakor tudi kot pripomoček za pravilno dizajniranje celotne družine omejevalnikov tlaka.

**Ključne besede:** hidravlični ventil, omejevalnik tlaka, numerična simulacija

## 1 Uvod

Nizekotlačni omejevalnik tlaka (LPRV<sup>1</sup>) spada v družino omejevalnikov tlaka. Ventil povezuje dve tlačni veji (Slika 1), pri čemer je vhodna veja (P) praviloma obremenjena z višjim tlakom kot izhodna (T).



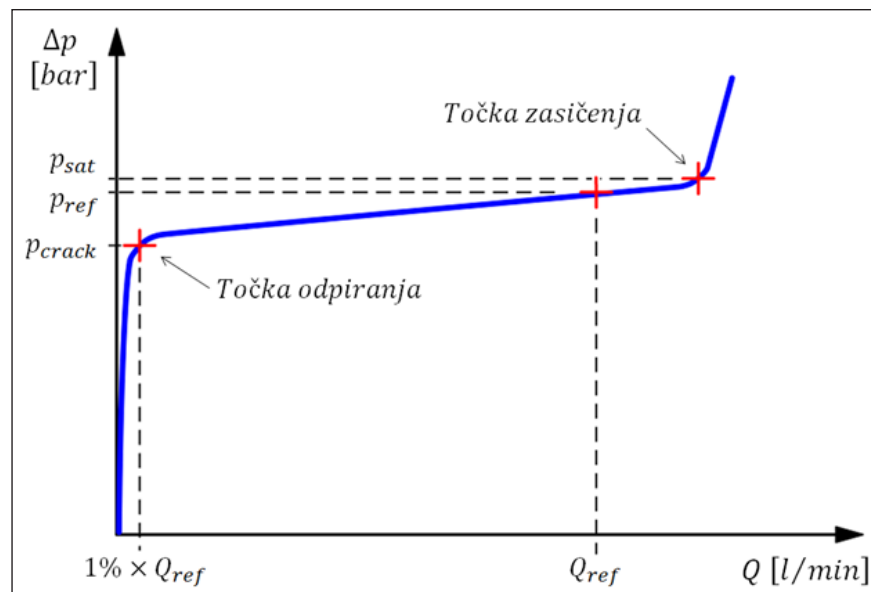
Slika 1. Hidravlični simbol za LPRV

Mag. Anže Čelik, univ. dipl. inž.,  
Jernej Bradeško, univ. dipl. inž.,  
Matej Erznožnik, univ. dipl. inž.;  
vsi Poclain Hydraulics, d. o. o.,  
Žiri

Osnovna funkcija ventila je omejevanje maksimalnega delovnega tlaka na vhodni veji. Naziv »nizekotlačni« se nanaša na delovno vrednost tlaka 50 barov.

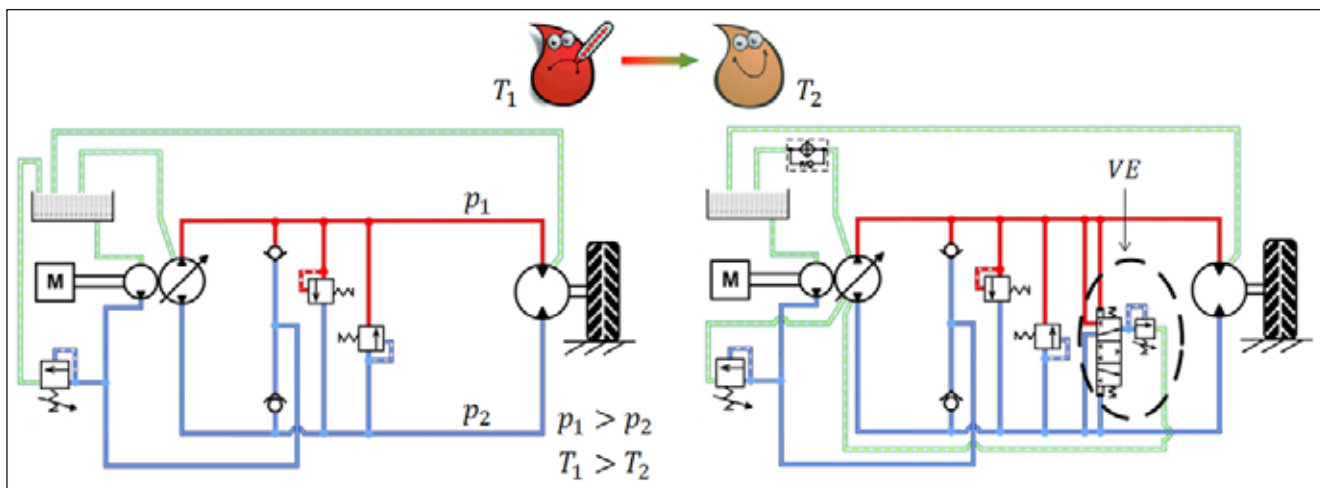
Ventil sestavljata bat in vzmet, ki pri neobremenjenem stanju ventila

( $p = 0$  bar) zagotavlja začetno pozicijo bata v ohišju. V primeru 1-odstotnega referenčnega toka  $Q_{ref}$  skozi ventil se vrednost tlaka nanaša na t. i. tlak odpiranja  $p_{crack}$ . Nadaljnje naraščanje tlaka na vhodni veji (P) pogojuje povečevanje vhodnega toka  $Q$  (Slika 2).



Slika 2. Karakteristika omejevalnika tlaka

<sup>1</sup> LPRV je angleška kratica za Low Pressure Relief Valve.



**Slika 3.** Umestitev ventila VE v zaprtem tokokrogu

Družina omejevalnikov tlaka je dizajnirana za različne vrednosti referenčnega toka  $Q_{ref}$  (od  $Q_{ref} = 10\text{l/min}$  do  $Q_{ref} = 60\text{l/min}$ ).

Tipična aplikacija omejevalnika tlaka je zaprt hidravlični tokokrog (npr. mobilni delovni stroji, Slika 3 – levo). Osnovna lastnost takšnega tokokroga je neposredna povezava med hidravličnim motorjem in črpalko (brez vmesne povezave na tank).

Zaprti tokokrog posledično povzroča tudi zviševanje temperature v sistemu. Da bi temperatura ostala znotraj dopustnih meja, je potrebno hidravlično olje ohlajevati v izmenjevalniku toplote. Funkcijo odvoda vročega olja opravlja izmenjevalni ventil (VE). Sestavni del le-tega je tudi prej opisani nizkotlačni omejevalnik tlaka LPRV (Slika 3 – desno).

## 2 Glavne komponente ventila LPRV

Na karakteristiko ventila vplivajo vgrajene komponente, njihove medsebojne interakcije, okolica (npr. temperatura olja) in okoliške komponente v sistemu. LPRV je sestavljen iz naslednjih komponent: bat, vzmet in ohišje (Slika 4).

**BAT:** Uporabljen je drsni tip bata, skozi katerega steče olje iz vhodne (P) na izhodno vejo (T). Bat ima glavno osno izvrtino in določeno število stranskih izvrtin (v nadaljevanju bodo te imenovane kot dušilke). Ključni parametri so: število dušilk »n«, njihov premer »d« in pozicija

dušilk »ε« v batu (ta pogojuje začetno prekritje oz. t. i. mirovno cono).

**VZMET:** Glavni karakteristiki torzijske tlačne vzmeti sta vzmetna konstanta »k« in sila vzmeti »F1« (nanju vsekakor neposredno vplivajo tudi premer vzmeti, vgradni prostor, material idr.).

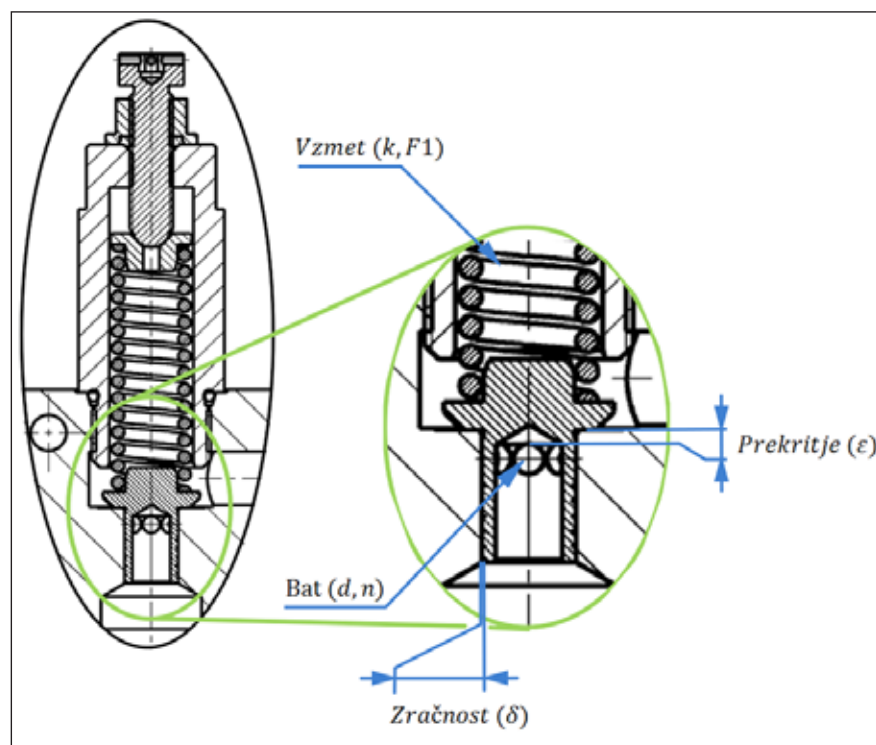
**OHIŠJE:** To je posredni element, ki zagotavlja osnovno funkcijo ventila (bat in vzmet je namreč še ne zagotavljata). Ključni parameter: zračnost »δ« med izvrtino v ohišju in batom pogojuje drsne razmere v ventilu kakor tudi notranje puščanje (lekažo).

**OKOLIŠKE KOMPONENTE:** Na karakteristiko ventila vpliva tudi uporabljeno hidravlično olje, ki se pretaka iz vhodne (P) na izhodno vejo (T). Pri tem so karakteristike uporabljenega hidravličnega olja (viskoznost, gostota) pogojene s temperaturo v sistemu.

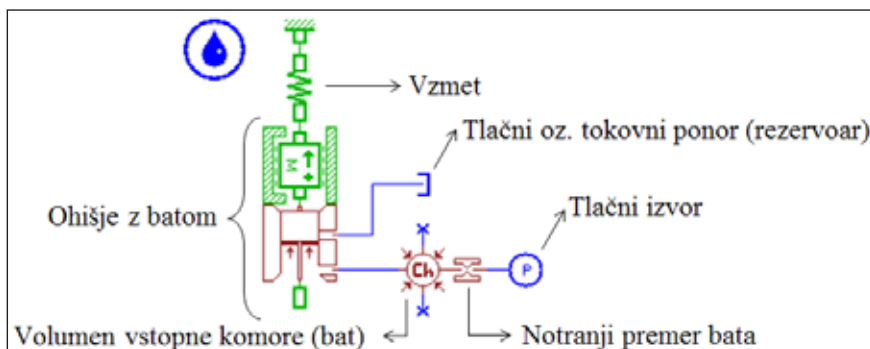
## 3. Razvoj simulacijskega modela ventila LPRV

### 3.1 Numerično modeliranje

Analiza ventila LPRV zajema enodimenzionalni (1D) in tridimenzionalni (3D) pristop. Skladnost med rezultati obeh pristopov nakazuje na pravi potek modeliranja.



**Slika 4.** Glavne komponente s karakteristikami ventila LPRV



Slika 5. Model AMESim za študijo statičnih karakteristik

### 3.1.1 1D-numerični model – statični odziv sistema

Statični odziv sistema se nanaša na postopno zviševanje tlaka v sistemu, pri čemer vztrajnostne sile gibajočih se komponent (bat mase »m«, Slika 5) ne vplivajo na karakteristike.

- osnovna značilnica:  $\Delta p(Q)$  karakteristika

Osnovno karakteristiko omejevalnika tlaka prikazuje Slika 6. Za potrebe razumevanja je na omenjeni sliki prikazana tudi osnovna karakteristika ekvivalentne dušilke. Slednjo popisuje enačba (1):

$$Q(p,x) = Cq \cdot A(x) \cdot \frac{\rho}{\rho(0)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta p|}{\rho}} \cdot \text{sign}(\Delta p) \quad (1)$$

kjer je  $Cq$  koeficient toka,  $\rho$  je gostota fluida,  $A(x)$  predstavlja pretočno površino – odvisno od giba bata,  $\Delta p$  pa razliko tlakov med vhodno in izhodno vejo ([1], [2], [7]).

Če ventil LPRV ne bi imel vzmeti, bi se njegova karakteristika ujemala s karakteristiko dušilke. To do točke zasičenja pogojujeta prednapetje in konstanta vzmeti ( $F_1$ ,  $k$ ). Od točke zasičenja naprej se model LPRV obnaša povsem enako kot ekvivalentna dušilka.

- $\Delta p(Q)$  karakteristika pri različnih tlakih odpiranja

Karakteristika omejevalnika tlaka je vrednotena na osnovi preizkusa na prototipni izvedbi ventila. Značilnice  $\Delta p(Q)$  za različne vrednosti tlakov odpiranja prikazuje Slika 7.

### 3.1.2 3D-numerični model – overovitev 1D-pristopa

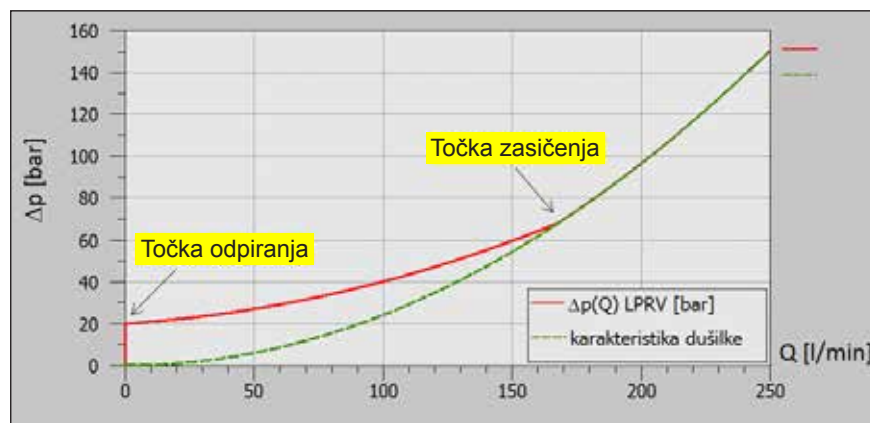
Overovitev in kalibracija 1D-numeričnega modela sta izvedeni tudi na osnovi 3D-numerične analize dinamike tekočin (v nadaljevanju CFD). Cilj numeričnega pristopa je določiti vrednosti nepoznanih koeficientov<sup>2</sup>: koeficient toka  $Cq$ , tokovno število  $\lambda$  in tokovno silo  $F_{jet}$ .

Koeficient toka  $Cq$  je izračunan na osnovi enačbe (1). Pri poznanem pomiku bata (torej poznanem prečnem preseku  $A$ ), poznani gostoti fluida  $\rho$ , poznanim vhodnim toku  $Q$  in poznani (oz. izračunani) diferenci tlaka  $\Delta p$  skozi ventil se lahko izračuna neznana vrednost koeficienta toka  $Cq$ .

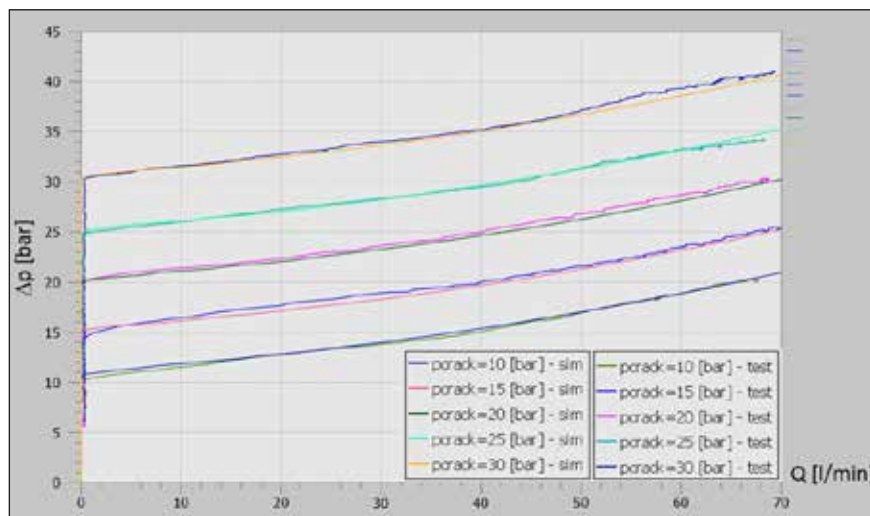
Tokovno število  $\lambda$  predstavlja mejo med laminarnim in turbulentnim območjem. Tokovno število je odvisno od hidrauličnega premera pretočne površine, skozi katero teče fluid; odvisno pa je tudi od kinematične viskoznosti in tlačne razlike. Odvisnost podaja enačba (2):

$$\lambda = \frac{h_d}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta p|}{\rho}} \quad (2)$$

kjer je  $h_d$  hidraulični premer odprtine,  $\nu$  pa kinematična viskoznost fluida

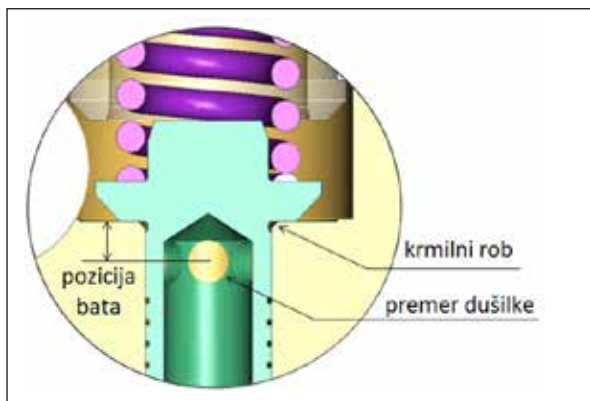


Slika 6. Karakteristika omejevalnika tlaka LPRV



Slika 7. Karakteristike za različne vrednosti tlakov odpiranja

<sup>2</sup> Omenjene koeficiente je v splošnem potrebno določiti na podlagi preizkusa ali pa numeričnega pristopa (CFD).



Slika 8. Vplivni parametri v ventilu LPRV

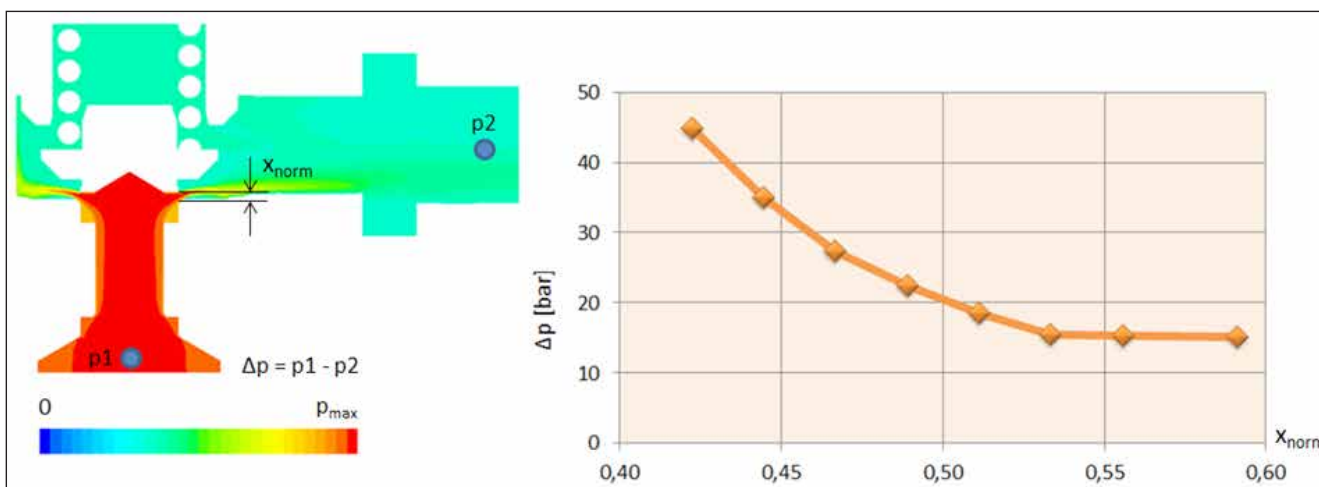
pogojuje velikost dušilke v batu.

### 3.1.3 1D-numerični model – dinamični odziv sistema

Dinamični odziv sistema se v danem primeru nanaša na vrednotenje spreminljivk po času. Zaradi sunkovitega porasta

(komponente v vezavi) in ne le zgolj obravnavana komponenta sama [5].

Pri primerjavi numeričnih modelov za statični in dinamični odziv sistema (Slika 5 in Slika 10) je pri slednjem opazna dodatna komponenta na ventilu LPRV. Komponenta popisuje efektivno površino bata, ki je izpostavljena tlaku na izstopni liniji (tlak tanka). Tlak in prostornina za batom lahko znatno vplivata na dinamični odziv [5].



Slika 9. Vpliv pomika bata na tlačni padeč v ventilu

Tokovna sila  $F_{jet}$  nastopi zaradi spremembe gibalne količine fluida. Smer tokovne sile je vedno nasprotnega predznaka sili, potrebni za pomik bata ( $F_{jet}$  torej vedno zapira bat v ventilu). Na primeru ventila LPRV je bila izračunana za primer dinamičnega ravnotežja.

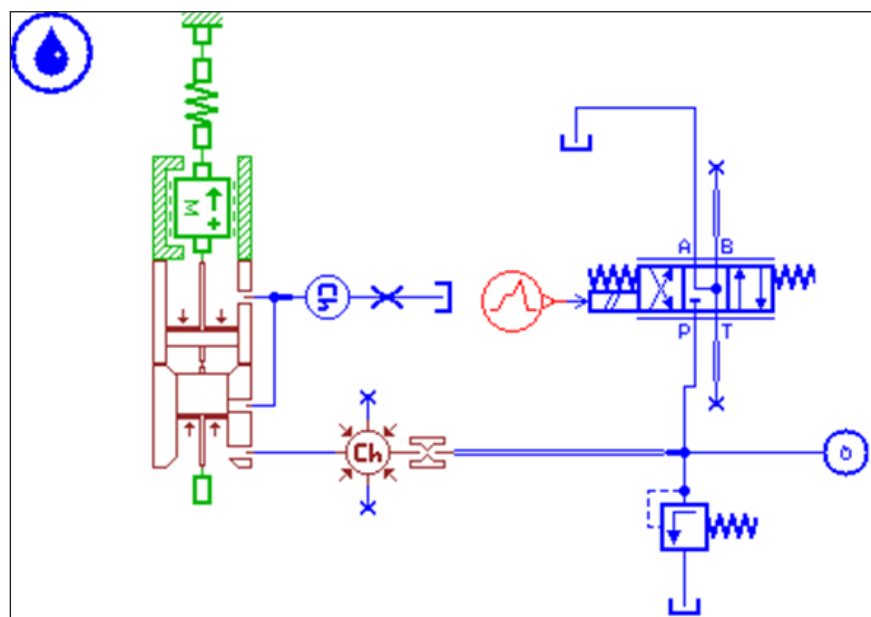
$$F_{jet} = 2 \cdot Cq \cdot A \cdot \Delta p \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

kjer je  $\alpha$  odklon toka fluida od aksialne smeri bata in je odvisen od pomika bata (v večini primerov se upošteva kot  $\alpha = 69^\circ$  [6]).

CFD-analiza pokaže izrazito odvisnost tlačne razlike  $\Delta p$  od pomika bata  $x$  (Slika 9, normirane vrednosti se nanašajo na maksimalni pomik bata). Na omenjeno odvisnost bistveno vpliva dejanska geometrija ventila – konkretnije oblika sedeža v ventilu, kakor tudi premer dušilke v batu (Slika 8). Krivulja (Slika 9) konvergira, in sicer k vrednosti, ki jo

vstopnega signala (npr. tlaka) imajo dominanten vpliv inercijske (vztrajnostne) sile gibajočih se komponent. Posledično lahko prihaja do dinamičnega prenihanja sistema. Na odziv sistema vpliva celoten sistem

Vpliven parameter pri dinamični analizi sistema je tudi trenje (viskozno, drsno). Ker je popis triboloških fenomenov precej kompleksna naloga, se je v danem primeru uporabila občutljivostna analiza za iden-



Slika 10. Model AMESim za študijo dinamičnih karakteristik

tifikacijo vpliva posameznega tipa trenja na odziv sistema. Viskozno trenje neposredno vpliva na lokalna prenihanja (amplitude), medtem ko se drsko (t. i. Coulombovo) trenje odraža predvsem na času stabilizacije modela.

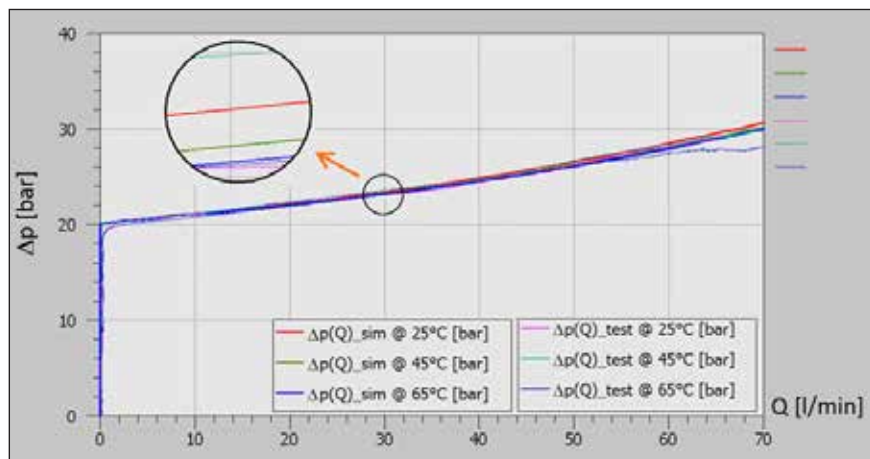
### 3.2 Občutljivostne analize

#### 3.2.1 Statični odziv

Verodostojen numerični model je mogoče nadalje s pridom izkoristiti za t. i. občutljivostne analize. Z variacijami geometrijskih karakteristik

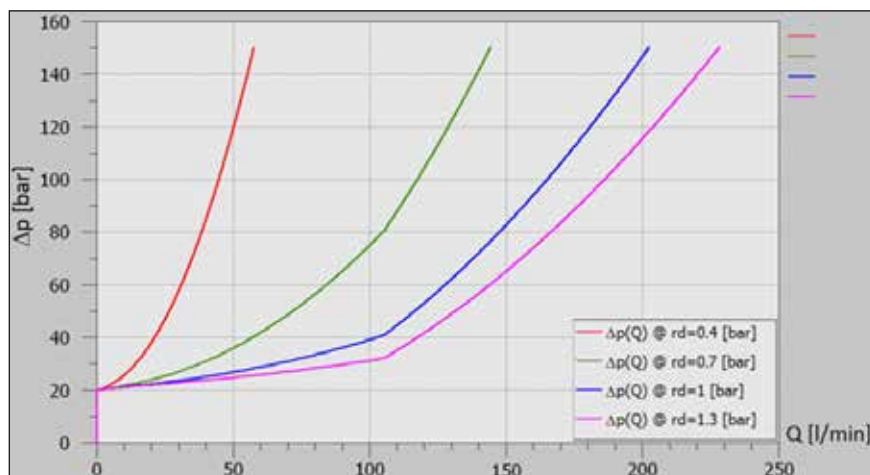
komponent in vhodnih hidravličnih veličin je mogoče virtualno vrednotiti odziv sistema pri različnih obratovalnih pogojih.

- Vpliv temperature hidravličnega olja na značilnice  $\Delta p(Q)$ , Slika 11
- Vpliv notranjega premera bata na značilnice  $\Delta p(Q)$ , Slika 12



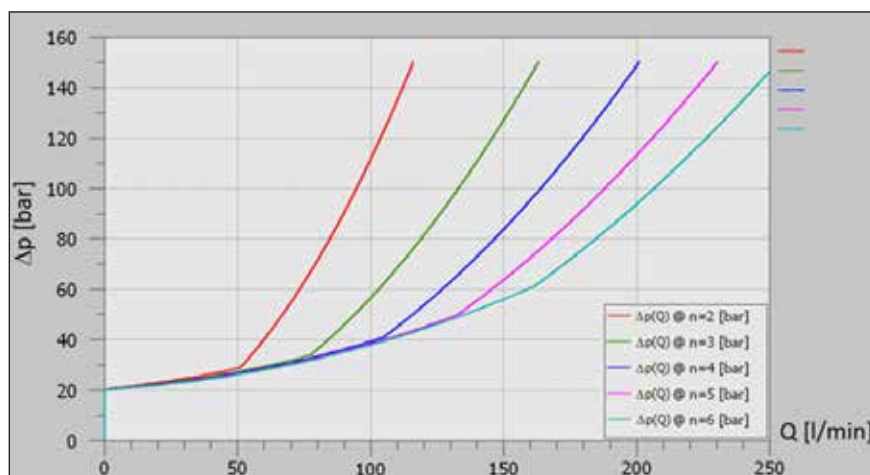
V obravnavanem temperaturnem območju je prikazana karakteristika (v okviru inženirske sprejemljivosti), neodvisna od temperature.

Slika 11. Vpliv temperature hidravličnega olja



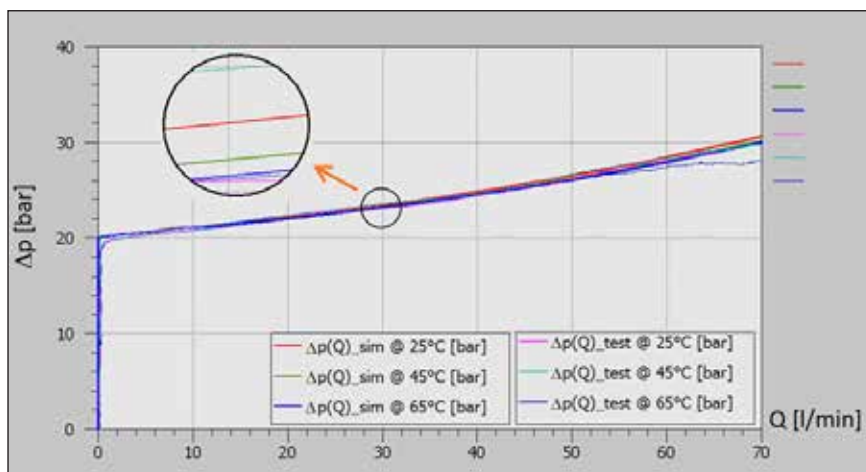
Vrednosti so normirane glede na nominalno vrednost premera dušilke. Med 70 % in 130 % nominalnega premera bata ostaja točka zasičenja nespremenjena. Razlog za to je notranji premer bata, katerega pretočna površina je večja od površin dušilk v batu – deluje kot dušilka.

Slika 12. Vpliv notranjega premera bata



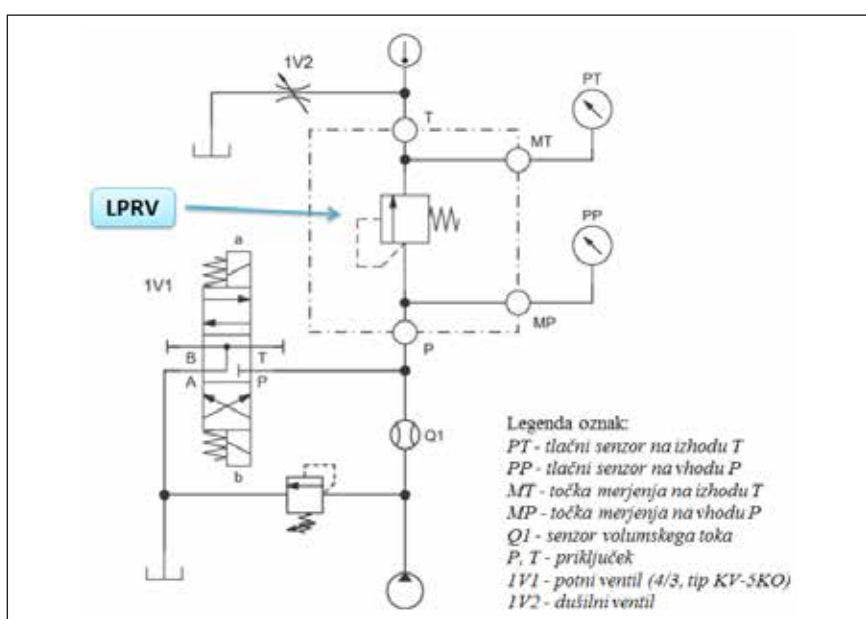
Opaziti je mogoče, da pri  $Q_{nom} < 30$  l/min povečevanje števila dušilk bistveno ne vpliva na karakteristiko  $\Delta p(Q)$ . Izjema je skrajna vrednost  $n = 2$ , kjer je tlačna razlika opaznejša, primerjajoč ostale vrednosti števila dušilk.

Slika 13. Vpliv števila dušilk



Slika 14. Karakteristike  $x(Q)$  za različno število dušilk

Normirane vrednosti se nanašajo na maksimalni pomik bata. Krivulja za  $n=2$  prikazuje tudi točko zasičenja in končni gib bata (ki je mehansko omejen v ohišju). Ujemanje krivulj je izrazitejše za  $n=4$  in  $n=6$ .



Slika 15. Hidravlična shema preizkuševališča

- Vpliv števila dušilk na značilnice  $\Delta p(Q)$ , Slika 13
- Vpliv števila dušilk na karakteristiko  $x(Q)$ , Slika 14

sko izdelan preizkušane, ki omogoča zasledovanje zelenih karakteristik na povsem elementarnem modelu

### 3.2.2. Dinamični odziv

Numerični model predvideva krajše čase iznihanja, primerjajoč eksperimentalno dobljene (tribološko ozadje). Cilj numeričnega modela je kvalitativno vrednotenje dinamičnega odziva oz. v zanesljivem napovedovanju trendov obnašanja v različnih pogojih obratovanja.

## 4. Eksperimentalni pristop

Za overovitev numeričnega modela je bil za potrebe preizkusa namen-

omejevalnika tlaka. Eksperimentalno merjenje giba bata je potekalo preko merilnika LVDT.

### 4.1 Zasnova testne sheme

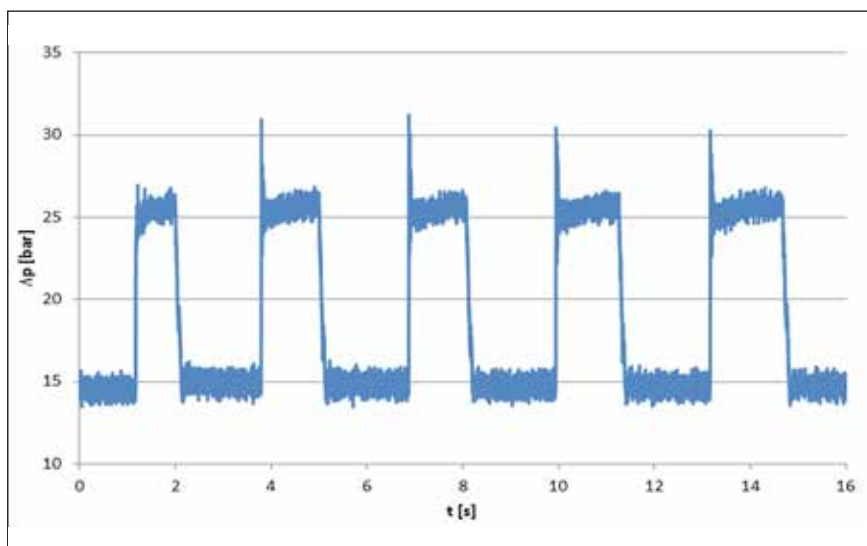
Hidravlična shema (Slika 15) za izvedbo meritev je zasnovana glede na izbrane spremenljivke z vidika obratovanja ventila. S komponentami sheme mora biti mogoče te spremenljivke po želji spreminjati.

#### - Potni ventil 1V1

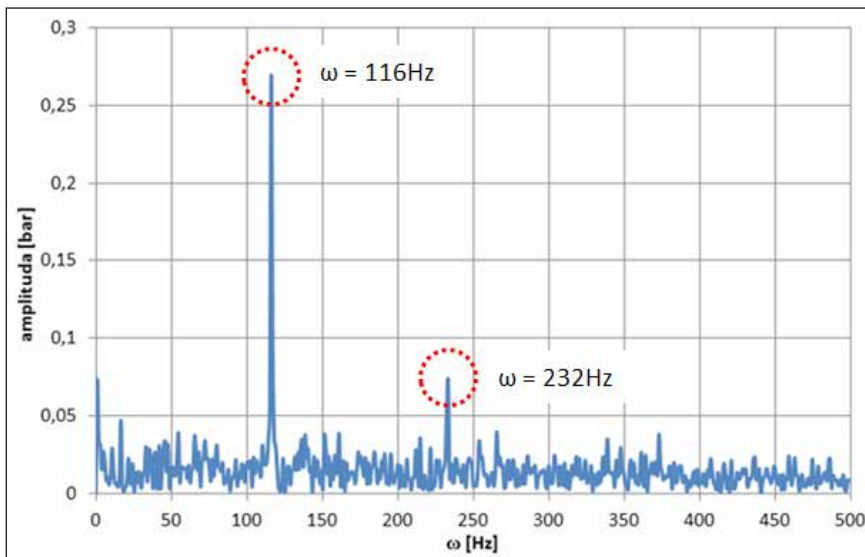
Uporabljen je potni ventil nazivne velikosti NG10, in sicer z namenom znižati tlak pred vstopom v LPRV (po ISO 6403).

#### - Dušilni ventil 1V2

Funkcija ventila v shemi je regulacija tlaka za omejevalnikom tlaka. Slaba stran takega pristopa je v tem, da se tlak vzpostavi šele s pretokom fluida.



Slika 16. Serija meritev tlaka



Slika 17. Amplitudni spekter

## 4.2 Rezultati meritev

### - Obdelava

Dinamični odziv ventila na koračno spremembo na vходу ni povsem enolično ponovljiv pojav. Zaradi tega so bile meritve izvedene nekajkrat zapored. Iz tako dobljene serije podatkov je bil izbran odziv, ki je bil prepoznan kot najbolj značilen (Slika 16). Na zajetem signalu tlaka je opaziti ponavljajoče se nihanje tlaka okrog značilne vrednosti.

Slika 16 prikazuje merjeni signal, ki je v nadaljevanju analiziran s pomočjo analize v frekvenčnem prostoru, in sicer preko diskretne hitre Fourierjeve transformacije (FFT, Slika 17). Po tem postopku je mogoče prikazati spekter do frekvence, ki je enaka polovici frekvence vzorčenja. V tem primeru je frekvenca vzorčenja 1000 Hz.

Na amplitudnem spektru sta razvidna dva amplitudna vrhova (Slika 17). Drugi je pri frekvenci, ki je dvakrat višja od tiste, pri kateri je prvi. Posledično lahko prvo frekvenco ( $\omega = 116$  Hz) obravnavamo kot osnovno, drugo pa kot njen harmonik. Enostavno je mogoče pokazati, da takšno nihanje nastane s ponavljajočim se vzbujanjem pogonskega agregata.

## 5. Zaključek

Uporaba simulacijskih orodij se je na primeru nizekotlačnega omejevalnika tlaka (LPRV) izkazala za izredno koristno, če ne celo nujno potreb-

no. Precejšnje število dodatnih ur na preizkuševališču ter precej dodatnih eksperimentalnih pristopov (posledično tudi prototipov) bi bilo potrebnih za pridobitev verodostojnih eksperimentalnih podatkov o vplivu vseh analiziranih parametrov ventila. Pri tem je seveda veliko vprašanje tudi sama ponovljivost preizkusa.

Omenjene težave pa ob pravilni uporabi odpravlja uporaba simulacijskih orodij. V danem primeru je največji delež simulacij potekal v programskem paketu AMESim. Overovitev dobljenih rezultatov je potekala vzporedno preko eksperimenta (na enem prototipu ventila s tremi variacijami dizajna bata) ter tudi preko numerične analize toka fluida (CFD). Osnovne fizikalne zakonitosti so bile prav tako tudi analitično preverjene. Uporaba numerične analize toka fluida je znatno pripomogla k pravilni konfiguraciji 1D-numeričnega modela (AMESim). Izkazalo pa se je tudi, da je kljub vsem sodobnim (numeričnim) pristopom uporaba eksperimenta še vedno zelo priporočljiva za overovitev matematičnega modela.

Omeniti velja, da je potekalo vrednotenje oblike bata (tj. števila in premer dušilk) tudi vzporedno preko metode končnih elementov (MKE). Omejen vgradni prostor in obratovalni pogoji namreč pogojujejo konstrukcijo bata (povečevanje števila dušilk načeloma oslabi prerez). Potrebno je bilo najti ustrezen kompromis med dopustnimi napetostmi v materialu in želeno konstrukcijo bata.

Umerjeno simulacijsko orodje je dovolj robustno za napovedovanje in analizo statičnih karakteristik omejevalnika tlaka, in sicer v različnih obratovalnih pogojih in z različnimi konstrukcijskimi izvedbami. Omenjeno orodje se uporablja v zgodnji fazi razvojnega cikla, in sicer za razumevanje delovanja komponente same kakor tudi kot pripomoček za pravilno dizajniranje celotne družine omejevalnikov tlaka. S pridom pa se orodje uporablja tudi za napovedovanje obnašanja glede na kupčeve zahteve.

## 6. Literatura

- [1] Ortega, J., Azevedo, B. N., Pires, L. F. G., Nieckele, A. O., Azevedo, L. F. A.: A numerical model about the dynamic behavior of a pressure relief valve; 12<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences; 10.–14. November.
- [2] Carniero, L. M., Azevedo, L. F. A., Pires, L. F. G.: Experimental and numerical analysis of spring-loaded pressure relief valve; Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute; Rio de Janeiro; 2011.
- [3] Csaba, H., Kullmann, L.: Dynamic behaviour of hydraulic drives; PhD thesis; Budapest University of Technology and Economics; 2005.
- [4] Klarecki, K.: Preliminary analysis of an innovative type of low pressure valves; Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 41/1–2 (2010) 131–139.
- [5] Chabane, S., Plumejault, S., Pierrat, D., Couzinet, A.: Vibration and chattering of conventional safety relief valve under built up back pressure; 3<sup>rd</sup> IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems; 14.–16. October 2009; Brno; Czech Republic.
- [6] Merrit, H. E.: Hydraulic control system, John Wiley and Sons, New York, 1967.
- [7] AMEHelp, rev. 11 SL1.
- [8] Skaistis, S.: Noise Control of Hydraulic Machinery Marcel Dekker Inc., 1988.

## Simulation model of a low pressure relief valve

**Abstract:** Today, simulation tools are indispensable in the company Poclairn Hydraulics Ltd.. They are primarily used for better understanding, analysis and prediction of product behaviour in different operating conditions or in different design configurations.

This article presents the process of building a (numerical) simulation model of a low pressure relief valve in the AMESim environment. The analysis of the experimental measured output variables is used for the evaluation, as well as the calibration of the simulation model. Other approaches (such as FEA, CFD) contribute to a better understanding of the key operational parameters of the valve.

The calibrated simulation tool is used in the early design stage, primarily in order to understand the component functionality, and secondly as a tool for the proper designing of a whole family of pressure relief valves.

**Key words:** hydraulic valve, pressure relief valve, numerical simulation



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

SERVO VENTILI, PROPORCIONALNI VENTILI IN RADIALNO-BATNE ČRPALKE

# MOOG

### Zakaj radialno-batne visokotlačne črpalke MOOG?

- preverjena kvaliteta še nedavno pod "BOSCH-evo" prodajno znamko,
- robustna izvedba in visoka obrabna odpornost omogočata dolgo življenjsko dobo črpalk,
- primerna za črpanje tudi specialnih medijev olje-voda, voda-glikol, sintetični ester, obdelovalne emulzije, izocianat, polioli, ter seveda za mineralna, transmisijnska ali biorazgradljiva olja,
- nizka stopnja glasnosti,
- visoka odzivna sposobnost in volumski izkoristek,
- velika izbira regulacije črpalk.

Moogovi servo ventili, proporcionalni ventili in radialno-batne črpalke so sestavni deli najboljših hidravličnih sistemov.

Brez njih si ne moremo zamisliti delovanje strojev za brizganje plastike in aluminija, strojev za oblikovanje v železarnah in lesni industriji, v letalih in napravah za simulacijo vožnje.

ZASTOPA IN PRODAJA  
**PPT commerce** d.o.o.  
Pavšičeva 4  
1000 Ljubljana  
Slovenija  
tel.: +386 1 514-23-54  
faks: +386 1 514-23-55  
e-pošta: ppt\_commerce@siol.net



Orbitalni hidromotorji, z zavoro ali z dodatnimi blok ventili



Servo krmilni sistemi za vozila- vilicarje, traktorje, gradbene stroje ...



**M-S HYDRAULIC**