

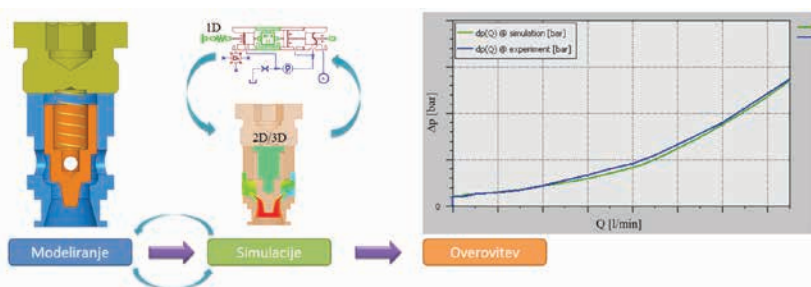
## » Računalniške simulacije hidravličnih ventilov

**Dr. Franc Majdič**  
**Alen Ljoki**  
**Jakob Pintar**  
**Jan Rak**  
**Anže Čelik**

Prispevek prikazuje postopek gradnje simulacijskih modelov potnega ventila (tip KV), prelivnega ventila (tip VE) in delilnika toka (tip DTP); vsi omenjeni modeli so plod uspešnega sodelovanja med podjetjem Poclain Hydraulics, d. o. o., ter Laboratorijem za fluidno tehniko LFT (UL FS). Numerično modeliranje kakor tudi simulacije so potekale v enodimenzionalnem virtualnem okolju programskega paketa AMESim. Ključni parametri, potrebni za celovitejši popis realnih razmer v ventilih, so bili dobljeni na osnovi tridimenzionalne tokovne simulacije.

Eksperimentalno merjenje hidravličnih veličin je posledično služilo zgolj za vrednotenje oz. potrditev numeričnega pristopa. Na osnovi umerjenih simulacijskih orodij so bile izdelane virtualne knjižnice za obravnavane družine ventilov. Slednje bodo omenjenemu podjetju služile kot pripomoček za boljše razumevanje delovanja posameznega izdelka kakor tudi pri njej integraciji v globalni hidravlični tokokrog.

Vnaprejšnje poznavanje karakteristik takšnih ventilov je bistvene pomena za pravilno izbiro omenjenih sestavin pri vgradnji v hidravlični tokokrog. Dandanašnji pristop k vrednotenju karakteristik navadno poteka s pomočjo analitično-numeričnih računalniških orodij, in sicer v virtualnem okolju. Pri tem se izognemo predvsem časovno zamudnemu iterativnemu postopku testiranja prototipov oz. se končni realni preizkus izvede večinoma le za overitev računskega pristopa (Slika 1).



» Slika 1. Overitev virtualnega pristopa z realnim preizkusom

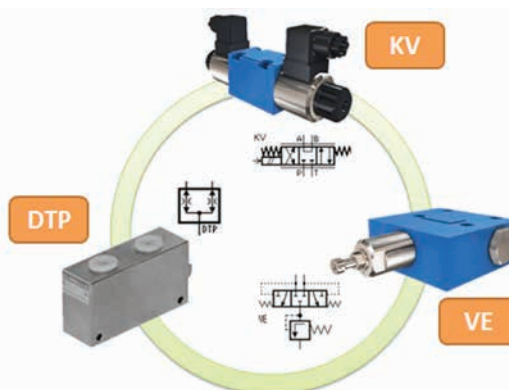
Glavna prednost uporabe simulacijskih orodij je vnaprejšnje poznavanje fizikalnih lastnosti obravnavane sestavine, ki bi jih bilo s preizkusom težko ali pa praktično nemogoče ovrednotiti. Pri tem je mogoče relativno v kratkem času v virtualnem okolju raziskati različne konstrukcijske rešitve in izbrati optimalno rešitev pri danih pogojih.

### Numerično modeliranje

V nadaljevanju je prikazan postopek gradnje simulacijskih modelov potnega ventila, prelivnega ventila ter delilnika toka (slika 2). Numerično modeliranje in simulacije so potekali v enodimenzionalnem (1D) virtualnem okolju programskega paketa AMESim. Manjkajoči koeficienti, odvisni od hidravličnih razmer ter geometrije sestavin, pa so bili dobljeni na osnovi tridimenzionalne (3D) tokovne analize v tridimenzionalnem programskem paketu.

### Opis in umestitev posamezne sestavine

Prelivni ventil in delilnik toka sta tipični sestavini zaprtega hidravličnega tokokroga, potni ventil pa je značilen predstavnik odprtega hidravličnega tokokroga.



» Slika 2. Obravnavane družine ventilov; potnih ventilov (KV), izmenjevalnih ventilov (VE) in delilnikov toka (DTP)

Osnovna funkcija **izmenjevalnega ventila** (VE) je sestav funkcije hidravlično krmiljenega potnega ventila ter nizkotlačnega omejevalnika tlaka. Uporaba potnega ventila je nujno potrebna v zaprtim tokokrogu, in sicer zaradi odvoda vročega olja iz nizkotlačne veje sistema. Hidravlično krmiljeni potni ventil določa povezavo med nizkotlačno vejo sistema in rezervoarjem. Osnovna



**Dr. Franc Majdič, Alen Ljoki, Jakob Pintar, Jan Rak,**  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo  
▪ **Anže Čelik**, Poclain Hydraulics, d. o. o., Žiri

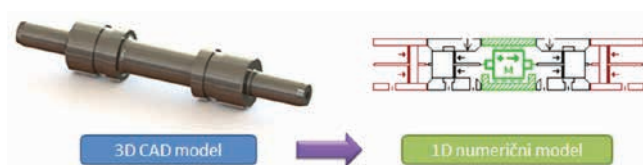
funkcija nizekpotlačnega omejevalnika tlaka je omejevanje najvišjega delovnega tlaka na (nizekpotlačni) vhodni veji. Naziv »nizekpotlačni« se nanaša na delovno vrednost tlaka do 50 bar. Družino prelivnih ventilov sestavljajo ventili VE10, VE30 ter VE60. Med seboj se, med drugim, razlikujejo po količini nominalnega pretoka. Tako se npr. oznaka VE30 nanaša na nominalni pretok (Q) 30 l/min.

**Potni ventil tipa KV** (z neposrednim elektromagnetnim prekrmljenjem) omogoča krmiljenje smeri toka hidravlične kapljevine. Potni ventil v osnovi sestavljajo ohišje, krmiljeni bat, eden oz. dva elektromagneta ter pripadajoči vzmeti. Elektromagnet omogoča krmiljenje bata iz osnovne pozicije (0) v eno izmed skrajnih leg (a ali b). Pri tem je vzpostavljena povezava med priključki A, B, P in T z ozirom na tip bata.

**Delilnik toka tipa DTP** omogoča funkcijo delitve in združevanja toka hidravlične kapljevine, in sicer neodvisno od tlaka na posameznem priključku. Vgrajeni mehanizem deli tok v smeri A proti priključkom B in C ter združuje v smeri B in C proti priključku A. Razmerje delitve in združevanja je 50 % : 50 %. Pri pretoku kapljevine preko nenastavljive dušilke je tlak na vstopu v dušilko višji od tlaka na izhodu. Tlačni padec je odvisen od kapljevine, geometrije dušilke in pretoka. Pri določeni kapljevini in dušilki je tlačni padec torej sorazmeren pretoku. Omenjena povezava se s pridom izkorišča pri delilniku toka. Osnova delovanja temelji na vzdrževanju enakega tlačnega padca na nenastavljivih dušilkah obeh batov.

## 1D-pristop

Za potrebe numeričnih modelov ventilov so bili tridimenzionalni ventili (t. i. zvezni sistem) razčlenjeni na posamezne enodimenzionalne elemente (t. i. diskretni sistem), ki vplivajo na njihove hidravlično-mehanske značilnosti. Osnovni gradniki fizikalnega modela (s pripadajočimi matematičnimi modeli) so podani v knjižnicah programskega paketa AMESim oz. jih lahko uporabnik izdelata tudi sam. Slika 3 prikazuje primer numerično popisane modela krmilnega bata. Vsaka sestavina v numeričnem modelu celotnega ventila s svojimi lastnostmi predstavlja dejanski posamični element ali del elementa v dejanskem ventilu. Vhodne parametre teh sestavin je možno uporabniško prilagajati (npr.: masa bata, koeficient vzmeti, koeficient pretoka skozi značilen prehod, itd.).



» Slika 3. Diskretni 1D-model krmilnega bata (desno) z ozirom na 3D-model (levo)

## Predstavitev ključnih parametrov

Poleg pravilnega popisa geometrijskih dimenzij hidravlične sestavine je potrebno ovrednotiti tudi t. i. tokovne parametre, ki vplivajo na delovanje obravnavane sestavine. S pomočjo variacije vhodnih parametrov znotraj sestavine se lahko izločijo tisti, ki imajo največji vpliv na hidravlično-mehanske lastnosti.

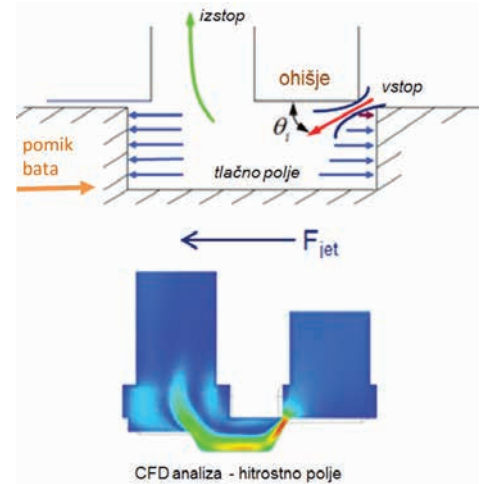
Za popis hidravličnih razmer v ventilu imajo navadno največji vpliv sledeči tokovni parametri:

- koeficient pretoka ( $C_q$ ) popisuje razmerje med razliko tlakov ( $\Delta p$ ) in pretokom (Q) skozi režo; je brezdimenzijsko število, navadno velikosti med 0 in 1.
- koeficient tokovne sile ( $k_{jet}$ ) je brezdimenzijsko število, ki opredeljuje velikost tokovne sile ( $F_{jet}$ ); omenjeni koeficient je navadno velikosti med 0 in 1.
- tokovno število ( $\lambda$ ) opredeljuje oz. razmejuje laminarne in turbulentne razmere; je brezdimenzijsko število, večje od 0. Navadno je izraženo v odvisnosti od koeficienta pretoka – za visoke vrednosti  $\lambda$  je namreč  $C_q$  približno konstanten ( $\rightarrow C_{q,max}$ )

Zahvaljujoč občutljivosti 1D-numerični analizi se izkaže, da ima v primeru hidravličnega delilnika toka, prelivnega ventila in potnega ventila velik vpliv samo koeficient pretoka  $C_{q,max}$ , zato je bil slednji v nadaljevanju projekta podrobno obravnavan.

AMESim pri izračunavanju koeficienta pretoka  $C_q$  potrebuje le njegovo največjo vrednost, tj. vrednost v turbulentnem področju -  $C_{q,max}$ . Vmesne vrednosti so izračunane na osnovi interpolacije s funkcijo hiperbolični tangens.

Tokovna sila ( $F_{jet}$ ), točneje aksialna komponenta, namreč vedno deluje v nasprotni smeri sile, ki je potrebna za premik bata v skrajno lego (Slika 4). Tokovna sila posledično vedno zapira režo oz. zmanjšuje efektivno pretočno površino.



» Slika 4. Prikaz vpliva tokovne sile



**KISTLER**

measure. analyze. innovate.

maXYmos BL, maXYmos TL, maXYmos NC

Zaslonski XY za nadzor procesov s 100 % kakovostjo v proizvodnji, montaži in preizkušanju izdelkov

Nenad Ilić, prodajni inženir, Balkanska regija, Predstavništvo za Kistler

Bulevar Despota Stefana 12/VIII Beograd, Srbija  
telefon: +381 69 390 66 77 • nenad.ilic@kistler.com

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

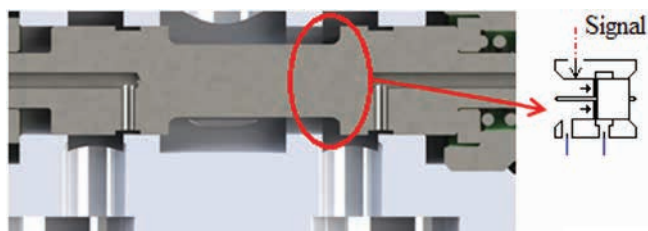
Razlog za omenjeno delovanje tokovne sile je v porazdelitvi tlačnega polja v komori med ohišjem in batom. Nehomogena porazdelitev tlaka ima ozadje v pretvorbi potencialne energije v kinetično energijo kapljavine – slednje se praviloma odraža v visoki vstopni hitrosti kapljavine. To je prikazano tudi s pomočjo CFD-analize na sliki 4 – desno.

## 3D-pristop

Zaradi znatne odvisnosti koeficienta pretoka  $C_{q,max}$  na karakteristiko  $\Delta p - Q$  je bil v nadaljevanju ta koeficient ovrednoten s pomočjo 3D-tokovne analize. Tokovna analiza je alternativa eksperimentalnemu pristopu, ki pa je časovno precej bolj potraten, vprašljiva pa je tudi ponovljivost rezultatov. Razlog za 3D-numerični pristop je v neposredni povezavi geometrije sestava in tokovnega koeficienta. Pričakujemo, da se bo koeficient  $C_{q,max}$  spreminjal s spreminjanjem geometrije pretočnega preseka (npr. s pozicijo bata).

Ker sestavine, ki jih ponuja AMESim v svojih standardnih knjižnicah, ne omogočajo spremenljivega koeficienta pretoka, so bile v ta namen izdelane sestavine v modulu AMESet (Slika 5). Uporabniško izdelane sestavine pa omogočajo popis parametra  $C_q$  kot odvisno spremenljivko – npr. v odvisnosti od giba bata  $\rightarrow C_q(x)$ . Posledično tako ni potrebno več operirati s koeficientom  $C_{q,max}$  pač pa s spremenljivko  $C_q$ .

Preostala parametra (tj.  $kjet$  in  $\lambda$ ) sta v primeru popisa potnega ventila KV ostala nespremenjena oz. sta se upoštevali njuni programsko prednastavljeni vrednosti.



» Slika 5. PrIMER standardnega elementa iz knjižnice z dodatnim vstopnim signalom

Tipičen potek 3D-numerične analize poteka takole:

- Najprej izdelamo numerični model (t. i. pre-processing), nato uvozimo 3D-geometrijo, jo mrežimo, postavimo robne pogoje, definiramo kapljavino idr.
- Sledi preračun (t. i. processing) oz. reševanje povprečenih Navier-Stokesovih enačb (RANS).
- Na koncu vrednotimo še rezultate (t. i. post-processing).

Kratek opis posameznih korakov med gradnjo numeričnega modela je podan v nadaljevanju.

## Mreženje

Prvi mreženju so bili uporabljeni volumski elementi, in sicer tristrane piramide (oz. t. i. tetraedri). Potrebno je bilo zagotoviti dovolj gosto mrežo za pridobitev natančnih rezultatov v realnem času. Na vseh zoženih predelih (tj. režah in odprtinah) smo zagotovili vsaj 10 volumskih elementov po preseku. Poleg tega smo uporabili »inflacijo«, s čimer smo še dodatno povečali število elementov na ozkih predelih. Po mreženju smo preverili še kvaliteto mreže in jo po potrebi izboljšali. Kvaliteta se je med drugim preverjala po t. i. »kriteriju Skewness«.

## Robni pogoji

Robni pogoji so bili trije, in sicer:

- v prvem smo definirali stene (t. i. wall),

- v drugem vstop kapljavine (t. i. inlet),
- v tretjem pa še izstop kapljavine (t. i. outlet).

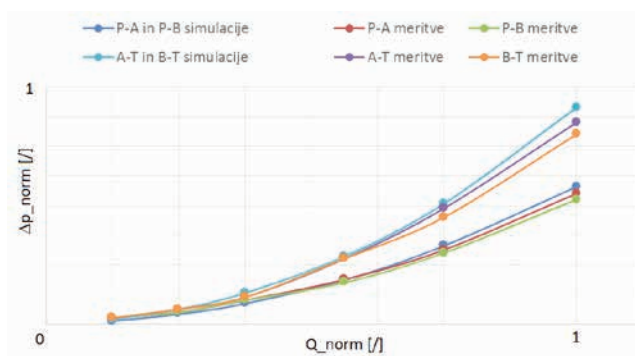
## Definicija kapljavine

Pri vseh simulacijah je bila uporabljena standardna kapljavina ISO VG 46 z naslednjimi fizikalnimi lastnostmi:

- referenčna temperatura: 40 °C,
- referenčni tlak: 1 bar,
- gostota: 880 kg/m<sup>3</sup>,
- dinamična viskoznost: 0,048048 Pa\*s,
- toplotna kapaciteta: 1966 J/(kg\*K),
- molska masa: 300 kg/(kmol).

## Rezultati simulacij - overovitev 3D-numeričnega pristopa

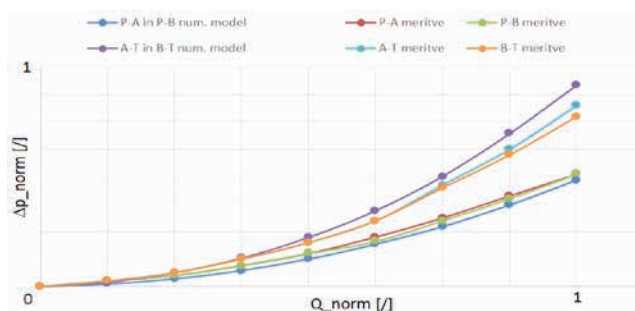
Vrednotenje 3D-tokovnih simulacij je potekalo na osnovi primerjave z rezultati meritev. Slika 6 prikazuje primerjavo normiranih rezultatov za karakteristike  $\Delta p - Q$  med CFD-simulacijami in meritvami, in sicer za ventil KV-4/3-5KO-6-2. V splošnem velja, da so bile v primeru simetrije ventila simulacije izvedene le za polovico (tj. eno stran) ventila.



» Slika 6. Primerjava karakteristik  $\Delta p - Q$  med 3D-numeričnim in dejanskim ventilom

S slike je razvidno, da so si vrednosti in karakteristike CFD-simulacij in meritev zelo podobne. Na enak način so se overili vsi rezultati CFD-simulacij za celotno serijo ventilov KV in VE. Ena izmed ključnih prednosti 3D-pristopa je tudi v tem, da nam slednji omogoča detajlni vpogled v notranje lokalno »dogajanje« v ventilu. Na osnovi detajlnega poznavanja je nadalje mogoča izboljšava oz. optimizacija ključnih območij v ventilu.

Poleg omenjenega nam 3D-pristop omogoča tudi popis spremenljivk, ki jih s klasičnim preizkusom praktično ni mogoče popisati (npr. že omenjeni tokovni koeficient, hitrostno polje, vrtinčenja, strižne napetosti idr.).

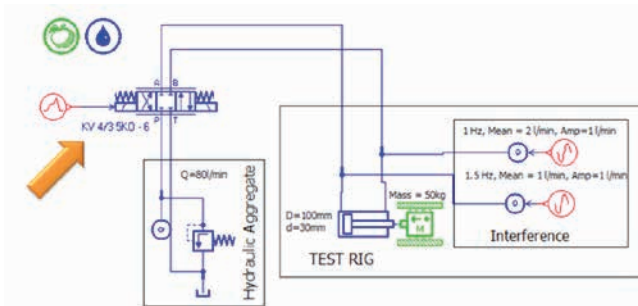


» Slika 7. Primerjava karakteristik  $\Delta p - Q$  med 1D-numeričnim in dejanskim ventilom

## Rezultati simulacij - 1D-numeričnih modelov

Na osnovi overjenih rezultatov 3D-numeričnega pristopa so bili ti uporabljeni (oz. integrirani) v 1D-numeričnem modelu. Pri tem je bilo potrebno standardne sestavine nekoliko prilagoditi (Slika 5). Verodostojen 1D-numerični model je mogoče v nadaljevanju s pridom izkoristiti tako za statične kot tudi za dinamične simulacije. Pri vrednotenju rezultatov lahko uporabnik izbira med katerimi koli razpoložljivimi spremenljivkami. Slika 7 prikazuje primerjavo karakteristik  $\Delta p - Q$  za ventil KV-4/3-5KO-6-2.

Pri vgradnji ventila v hidravlični tokokrog je bistvenega pomena tudi stabilnost modela. Vsi izdelani modeli ventilov (KV, VE in DTP) so bili preizkušeni tudi v virtualnem hidravličnem tokokrogu. Za ventila DTP in VE je bil uporabljen zaprt hidravlični tokokrog (Slika 9), za ventil KV pa odprt hidravlični tokokrog (Slika 8).



» Slika 8. Vrednotenje stabilnosti numeričnega potnega ventila KV

## Gradnja družine ventilov

Umerjene ventile iz posamezne družine je na to smiselno povezati v celoto oz. v t. i. »superkomponento«, ki je za uporabnika prijaznejša, predvsem pa preglednejša. Komponenta, ki predstavlja oz. povzema celotno družino, se nadalje vgradi v knjižnico – tako je komponenta (npr. na nivoju podjetja) dostopna komurkoli in kadarkoli (Slika 10).

Za obravnavane družine ventilov DTP, KV in VE so bili izdelani sledeči modeli:

- delilnik toka DTP (nazivni pretok [l/min]): 10, 20, 35, 50, 70;
- potni ventil KV-4/3-5KO-6 (model krmilnega bata): 1, 2, 3, 6, 51 A;
- prelivni ventil VE (nazivni pretok [l/min]): 10, 30, 60.

## Zaključek

Iz prispevka je jasno razvidno, da so današnji izdelki kompleksni ne le v smislu geometrije, pač pa tudi vgradnje (robni pogoji, obremenitve), dinamičnega odziva, soodvisnosti od drugih vgrajenih sestavin idr. Nekdanji pristop z iterativnimi postopki izdelave/dodelave prototipov je tako z inženirskega vidika postal nesprejemljiv – predvsem zaradi številnih parametrov, ki vplivajo na konstrukcijo, delovanje ter odziv sestavine. Časovne zamudnosti in stroškovne plati na tem mestu niti ne bi omenjali.

Razvoj izdelkov v virtualnem okolju pa je sodoben pristop, ki je praviloma usmerjen k razvoju tehnično izpopolnjenih in cenovno najugodnejših rešitev. Simulacijska orodja omogočajo detajlno



LEADING IN PRODUCTION EFFICIENCY

## EcoCCore

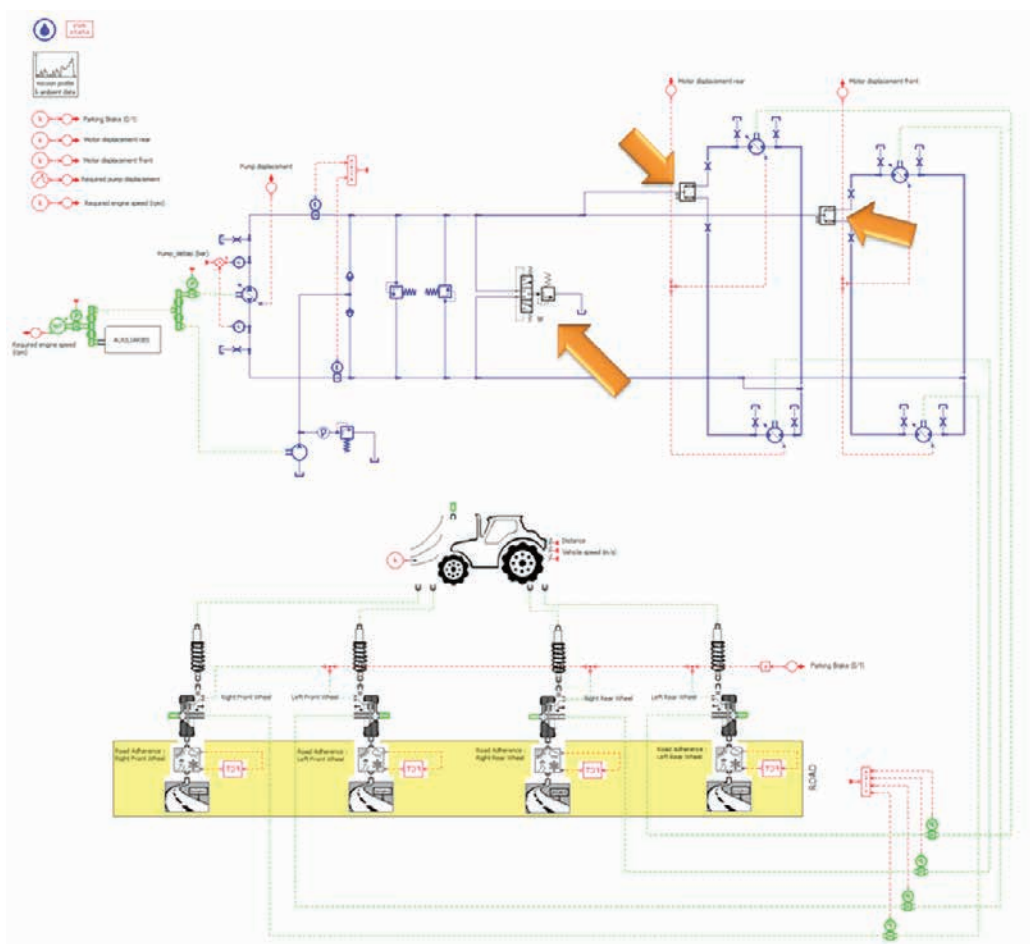
Nova generacija čiščenja delov na osnovi topil.

Optimizirana kakovost čiščenja, manjši stroški, visoka fleksibilnost. Dürr Ecoclean zadovoljuje vedno višje zahteve na področju čiščenja industrijskih delov in površinskega čiščenja s popolnoma novim sistemom za čiščenje topil.



Uradni prodajni zastopnik za Dürr Ecoclean v Sloveniji:  
MASTROJ d.o.o, E-mail: bojan.mauhar@mastroj.si





» Slika 9. Vrednotenje stabilnosti numeričnih ventilov DTP in VE

vrednotenje fizikalnih zakonitosti, z variacijo vhodnih parametrov je možno predvideti različne trende odziva, korekcije virtualnih modelov načeloma ne pogojujejo časovno zamudnega procesa (današnja komplementarnost orodij omogoča tudi asociativnost med različnimi tipi modelov – CAD, MKE, CFD idr.). Tak pristop je vzdržen tudi z ekonomskega vidika.

Pri uporabi simulacijskih orodij v zgodnji fazi razvoja izdelka je prihranek (na času in stroških) pravzaprav težko oceniti, saj ni povsem jasno razvidno, kolikšnim (neuspešnim) iteracijam smo se s takšnim pristopom izognili. Glede na pretekle izkušnje pa ni preseñljiv podatek, da gre tudi za nekajkrat hitrejši razvoj izdelka. Posledično pa tudi hitrejši čas prihoda na tržišče.

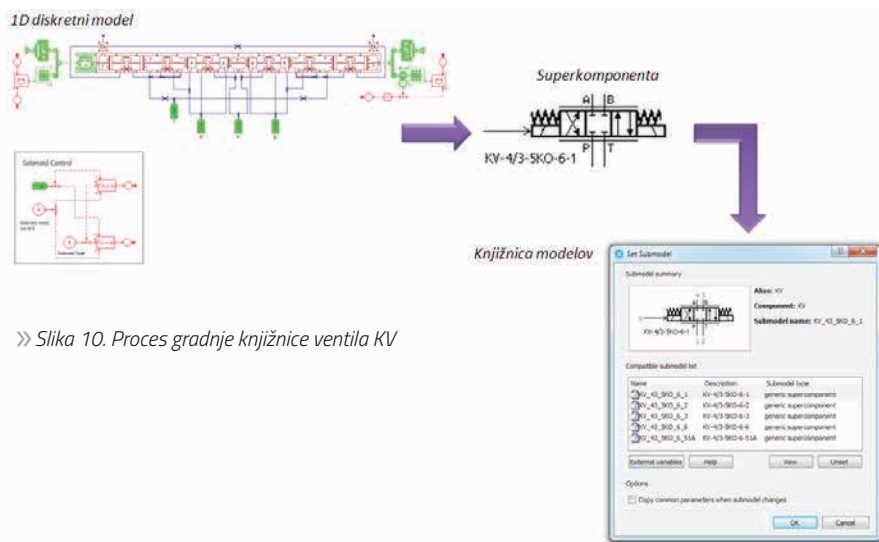
Ne glede na zgoraj povedano pa velja, da le verodostojno simulacijsko orodje lahko pripomore k pravilnemu razumevanju delovanja komponente/sistema ter posledično tudi k ustrezni konstrukciji.

Čas od koncepta do prototipa se je v zadnjem času bistveno skrajšal ravno zaradi razvoja simulacijskih programov. Z naprednimi algoritmi so se rezultati numeričnih modelov zelo približali realnim meritvam. S pomočjo numeričnih modelov lahko izločimo morebitne napake, ki bi nastopile pri prototipu. Tako prihranimo pri izdelavi nepotrebnih prototipov.

S tem, ko se približamo laboratorijskim meritvam pri posameznem modelu

ventila, lahko opazujemo tudi delovanje celotnega sistema. Namen projekta je bil izdelati numerične modele, ki bi bili dobro popisani in uporabni za nadaljnjo analizo. Tako bodo v podjetju lahko s pomočjo simulacije končnim kupcem določili sestavine za optimalno delovanje sistema.

Povečevanje števila uspešno zaključenih projektov v sodelovanju med Univerzo in industrijo kaže na to, da je to tudi v prihodnje neizogibno. Teoretično in praktično znanje obeh strani prinaša krajši čas od ideje do množične proizvodnje izdelka. Na koncu se seveda tudi to odraža v prihranjenih sredstvih.



» Slika 10. Proces gradnje knjižnice ventila KV