

# Razvoj visokotlačnega delilnika toka (FD-H2) za mobilne aplikacije

## - 1. del

Anže ČELIK, Luka PETERNEL

**Izveček:** Delilnik toka se skupaj s hidromotorjem v mobilnih aplikacijah najpogosteje uporablja za pogon koles. Pri tem delilnik toka zagotavlja vzporedno (sinhrono) delovanje koles v eni osi kakor tudi med več osmi. V normalnem režimu delovanja delilnik toka ni v funkciji (tj. olje teče preko obtočnega ventila, mimo delilnika toka). V primeru zdrs pogonskih koles pa se delilnik toka aktivira in posledično sinhronizira hitrost vrtenja pogonskih koles, kar omogoča nadaljnjo vožnjo vozila.

V prispevku je prikazan postopek razvoja visokotlačnega delilnika toka (FD-H2) za mobilne aplikacije. Slednje praviloma pogojujeta visok delovni tlak (do 500 barov) in visok pretok (do 200 l/min). Predvsem pa sta pri tovrstnih aplikacijah želeni stabilnost delovanja in točnost delitve/združevanja na čim širšem tokovnem območju.

Uvodoma je predstavljen osnovni princip delovanja batnega delilnika toka. Nadalje so prikazane razvojne aktivnosti na ključnih detajlih in koraki do njihove optimizacije. Razvoj delilnika toka je plod uspešnega (mednarodnega) sodelovanja razvojne skupine podjetja Poclain Hydraulics. Podporo pa nam je nudil tudi Laboratorij za fluidno tehniko (LFT) Fakultete za strojništvo v Ljubljani.

Eksperimentalno izmerjene karakteristike delilnika toka so v nadaljevanju primerjane s hidravličnimi meritvami konkurenčnih izdelkov drugih proizvajalcev. Delilnik toka FD-H2 izstopa glede kompaktnosti, točnosti in stabilnega delovanja tako v načinu deljenja kot tudi združevanja.

Na osnovi uspešnega razvoja osnovne funkcije visokotlačnega delilnika toka je bila slednja nadalje nadgrajena oz. vgrajena v končni večfunkcijski ventil za mobilne aplikacije.

Rezultat večletnega razvoja je nova družina kataloških izdelkov podjetja Poclain Hydraulics, več patentnih prijav, kopica pridobljenega znanja na področju konstruiranja hidravličnih komponent, njihovih medsebojnih interakcij ter procesa potrjevanja (tj. validacije) končnega izdelka.

**Ključne besede:** delilnik toka, deljenje, združevanje, primerjalna analiza, tlačni padec, točnost, simulacije

### ■ 1 Uvod

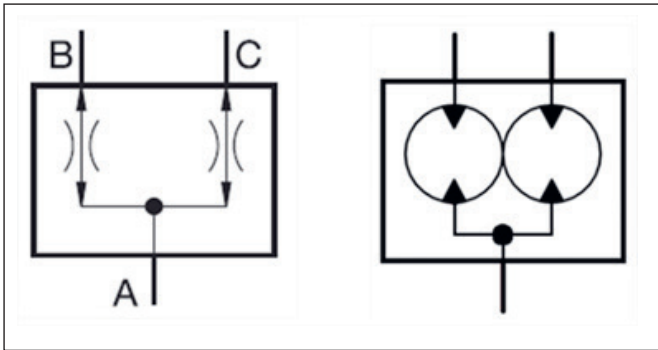
Delitev toka tekočine<sup>1</sup> na dve ali več hidravličnih vej oz. linij je mogoča z uporabo enega ali več delilnikov (pri tem se predpostavlja enakomerna oz. proporcionalna delitev

toka). Najpreprostejši primer takšne rešitve je t. i. T-kos. Takšna rešitev deluje le v primeru, ko so hidravlične razmere v vseh linijah enake (npr. enake tlačne izgube). V nasprotnem primeru je delitev toka neenakomerna. Pomanjkljivost enostavne rešitve s T-kosom je mogoče odpraviti z integracijo tokovnega ven-

tila v hidravlični sistem, ki zagotavlja konstantnost delitve toka ne glede na (tlačne) razmere v posamezni liniji. Takšen tip tokovnega ventila se imenuje delilnik toka. Omenjeni ventil deli tok v predpisanem razmerju na dve liniji. Za deljenje toka na več linij je potrebno uporabiti več delilnikov [6].

Mag. Anže Čelik, univ. dipl. inž.,  
Luka Peternel, univ. dipl. inž., oba  
Poclain Hydraulics, d. o. o., Žiri

<sup>1</sup> Zaradi preglednosti bo besedna zveza »tok tekočine« v nadaljevanju nadomeščena z besedo »tok« oz. »pretok«.



**Slika 1.** Hidravlični simbol delilnika toka: batni tip (levo) in zobniški tip (desno) [5]

V splošnem obstajata dva tipa delilnikov toka: batni in zobniški. Slika 1 prikazuje hidravlična simbola obeh tipov delilnika toka.

Če ima omenjeni tokovni ventil tudi funkcijo združevanja toka, se navadno imenuje delilnik/združevalnik toka. V nadaljevanju bo obravnavan le batni tip delilnika, pri čemer bo zaradi preglednosti in enostavnosti delilnik/združevalnik toka imenovan le delilnik toka.

Tipičen delilnik toka ima, kot je bilo že omenjeno, funkcijo deljenja in združevanja toka. Ventil deli tok fluida v smeri priključka A proti priključku B in C in združuje tok v smeri priključkov B in C proti priključku A (slika 1). Razmerje deljenja/združevanja je navadno 50 % : 50 % (možna je poljubna delitev), in sicer ne glede na razmere v posamezni liniji (B ali C). Tipičen primer delilnika toka sestavljajo: ohišje (4), zunanji bat (3), dva notranja bata (2) ter tri šibke vzmeti (1). Omenjeno konfiguracijo prikazuje slika 7.

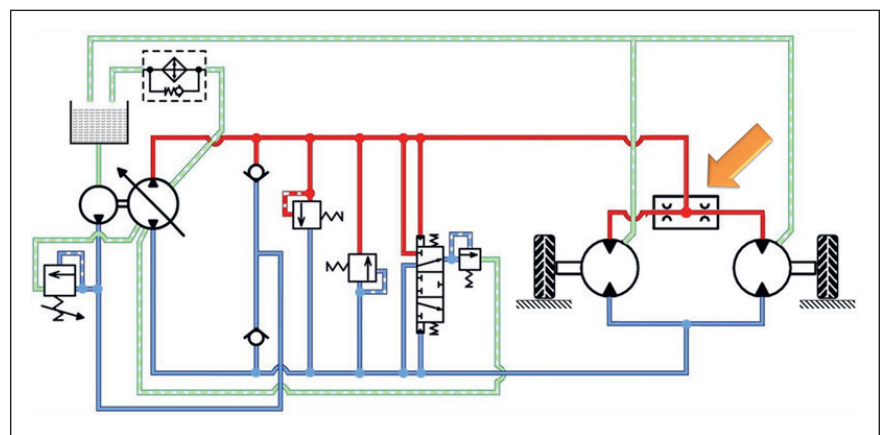
**Deljenje toka:** deljenje toka poteka v smeri priključka A proti priključkom B in C. Tok na priključku A se razdeli in teče čez dušilko konstantnega preseka (t. i. fiksna dušilka) kakor tudi čez dušilko spremenljivega preseka (t. i. spremenljiva oz. variabilna dušilka) na priključek B oz. C.

**Združevanje toka:** olje teče iz smeri B in C proti A. Princip združevanja je podoben principu deljenja.

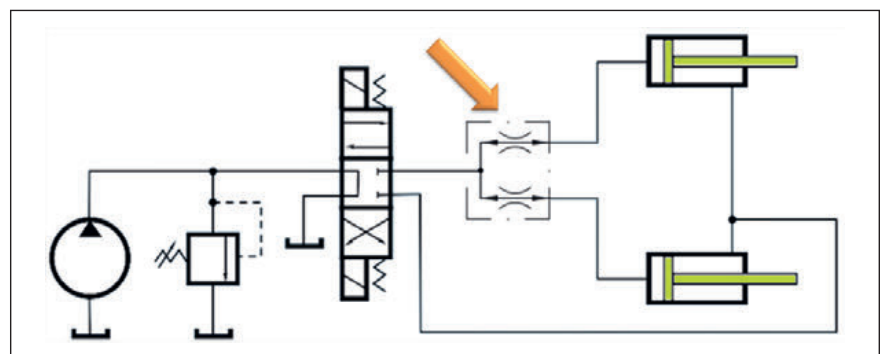
Delovanje delilnika toka je pogojeno s tlačnimi razmerami v ventilu,

na slednje pa vpliva nivo pretoka. Z oziroma na omenjeno velja upoštevati, da delilnik toka deluje optimalno le v določenem tokovnem območju. Omejitev maksimalnega pretoka vpliva na velikost tlačnega padca skozi ventil, omejitev minimalnega pretoka pa neposredno vpliva na točnost delitve oz. združevanja [1].

Tipičen primer vgradnje delilnika toka v zaprtem hidravličnem tokokrogu prikazuje slika 2. Vhodni tok iz črpalke je enakomerno razdeljen med oba (tj. leva in desna) hidromotorja in zagotavlja vzporedno (sinhrono) delovanje koles v eni osi kakor tudi med več osmi. Če v hidravličnem sistemu ni vgrajenega delilnika toka in eno izmed koles izgubi stik s podlago (oz. se spremenijo kotalne razmere), potem se



**Slika 2.** Primer vgradnje delilnika toka v zaprtem hidravličnem tokokrogu [5]



**Slika 3.** Primer vgradnje delilnika toka v odprtem hidravličnem tokokrogu [5]

takšno vozilo ne more več pomagati naprej. Razlog je v tem, da bi ves tok tekel skozi hidromotor, katerega kolo je izgubilo stik s podlago (olje namreč teče tam, kje ima »lažjo« pot).

Slika 3 prikazuje vgradnjo delilnika toka v odprtem hidravličnem tokokrogu (poenostavljen prikaz). Tudi v danem primeru se vhodni tok iz črpalke enakomerno razdeli na oba hidravlična cilindra in posledično zagotavlja vzporedno gibanje obeh cilindrov. Če v hidravličnem sistemu ni vgrajenega delilnika toka in breneni obeh cilindrov nista identični, bo končno lego prej dosegel cylinder z manjšim bremenom.

## 1.1 Osnovni princip deljenja/združevanja

Ker je princip deljenja podoben principu združevanja, bo v nadaljevanju obravnavan le princip deljenja. Za lažje razumevanje bo predpostavljeno, da je razmerje delitve (ali pa združevanja) 50 % : 50 %.

1.1.1 Hidravlična dušilka

Osnovni princip delovanja delilnika toka je pretok fluida po vzporedno vezanih dušilkah. Delitveno razmerje je odvisno od konfiguracije para fiksnih dušilk. Hidravlični simbol fiksne dušilke prikazuje *slika 4*.



Slika 4. Hidravlični simbol fiksne dušilke (konstanten premer)

Tok tekočine skozi (fiksno ali variabilno) dušilko popisuje Bernoullijeva enačba, ki povezuje tok fluida in tlačni padec:

$$Q = A \cdot v = C_q \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

pri tem se koeficienti  $v$ ,  $A$ ,  $C_q$ ,  $\Delta p$  in  $\rho$  nanašajo na hitrost fluida, presek dušilke, koeficient pretoka, tlačni padec in gostoto fluida.

- **Presek dušilke**,  $A$ , je lahko fiksni (torej nenastavljiv  $\rightarrow A = konst.$ ) oz. spremenljiv (nastavljiv  $\rightarrow A \neq konst.$ ). V prvem primeru je dušilka fiksna, v drugem primeru pa je spremenljiva. *Slika 5* prikazuje primera obeh dušilk na obstoječem delilniku DTP podjetja Poclairn Hydraulics.

- **Koeficient pretoka**,  $C_q$  je brezdimenzijsko število in predstavlja hidravlični izkoristek komponente;  $C_q$  je odvisen od lokalne geometrije. Koeficient pretoka ima v turbulentnem področju (večinoma) konstantno vrednost (tj. pri visokih tokovnih številih  $\lambda$ ); v področju laminarnega toka pa se linearno povečuje s povečevanjem tokovnega števila. *Slika 6* prikazuje odvisnost koeficienta pretoka v odvisnosti od tokovnega števila, in sicer za tri različne tipe dušilk (tj. a, b in c).

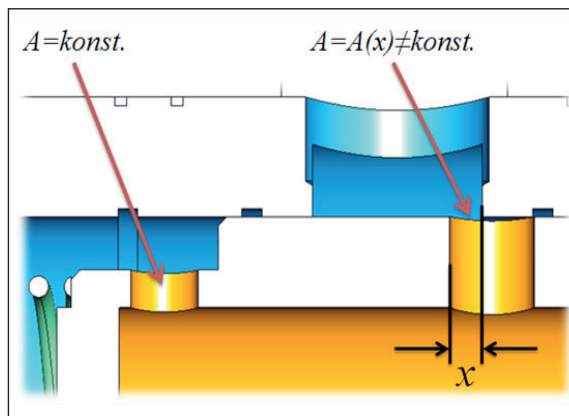
- **Tlačni padec**,  $\Delta p$ , se nanaša na razliko tlakov med dvema po-

ljubnima točkama. Če je torej smer pretoka  $A \rightarrow B$  (*Slika 4*), potem je tlačni padec enak . Potrebno je omeniti, da se za maksimalni tlačni padec po enačbi (1) vedno upošteva minimalna pretočna površina  $A$  (oz. presek).

Z ozirom na enačbo (1) imata dve dušilki z enakim pretokom ( $Q$ ) enak tlačni padec ( $\Delta p$ ), če so njuna preseka ( $A$ ) in oblika geometrije ( $C_q$ ) enaki.

1.1.2 Princip deljenja – osnovni (središnji) položaj bata

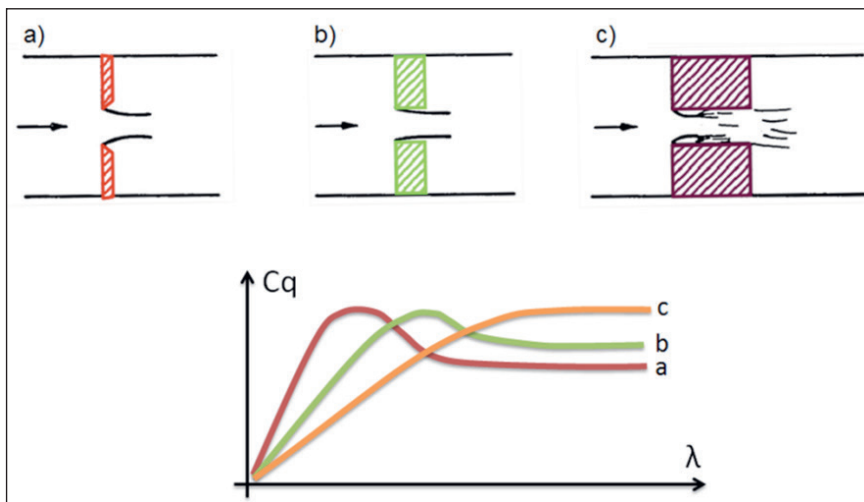
Za funkcijsko delovanje delilnika pretoka (DTP) podjetja Poclairn Hydraulics sta uporabljeni fiksna in



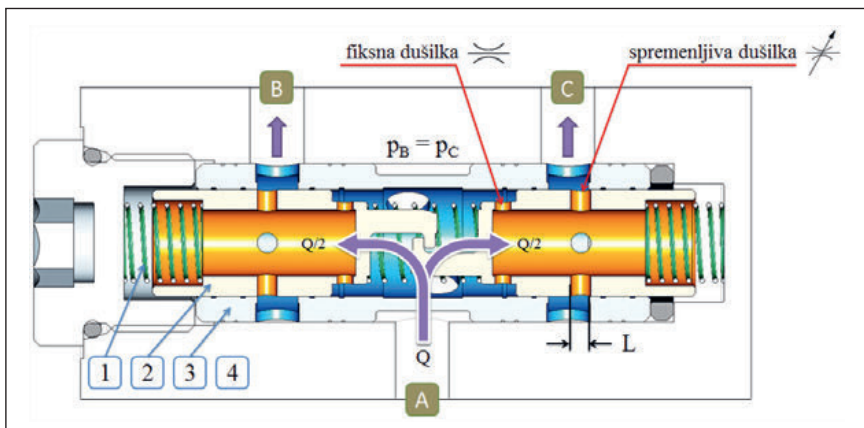
Slika 5. Primer fiksne (levo) in spremenljive dušilke (desno)

spremenljiva dušilka. Slednja je posledica posebne konstrukcije »bata v batu«, pri kateri se presek dušilke spreminja glede na relativno pozicijo obeh batov.

V danem primeru je predpostavljeno, da se vhodni tok ( $Q$ ) enakomerno razdeli na liniji B in C (torej



Slika 6. Karakteristika  $C_q - \lambda$  [3]



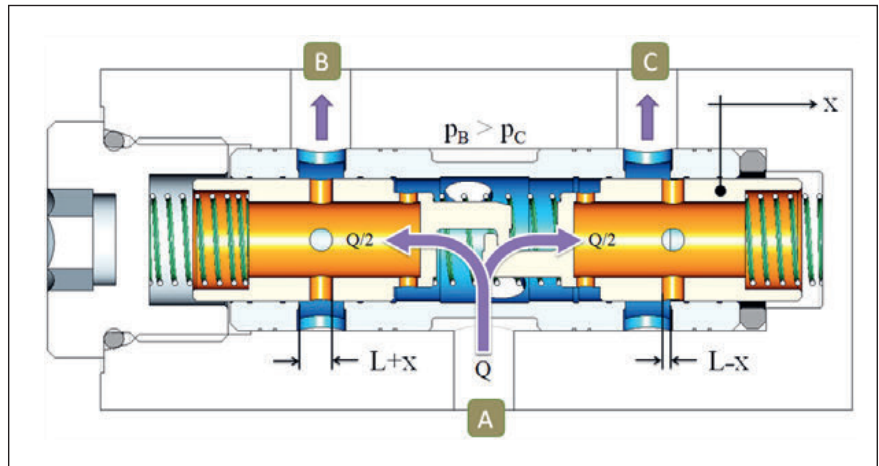
Slika 7. Presek delilnika toka (DTP) z notranjima batoma v osnovni (središnji) legi

$p_B = p_C \rightarrow Q_B = Q_C$  in da imata fiksni dušilki enak presek. Posledično se lega obeh notranjih batov pri pretoku olja skozi fiksno dušilko in posamezni bat ne spreminja (slika 7). Navadno je konstrukcija notranjega bata takšna, da je spremenljiva dušilka v popolnoma odprti legi, kar pa ni pravilo.

V tej osnovni legi, pa tudi sicer v katerikoli drugi, imata fiksni dušilki v notranjem batu bistveno vlogo pri zagotavljanju enakega tlačnega padca, kar posledično vpliva tudi na enakost pretokov.

### ■ 1.1.3 Princip deljenja – izsredna pozicija bata

Neenakost tlakov  $p_B$  in  $p_C$  povzroči neenakost aksialnih sil (oz. porušitev ravnotežnega stanja v srednji legi), kar ima za posledico premik notranjih batov v smeri delovanja rezultante sil. Presek spremenljive dušilke (oz. pozitivno prekritje) se pri notranjem batu z višjim tlakom povečuje, na strani nižjega tlaka pa zmanjšuje (slika 8). Posledično se pri notranjem batu z nižjim tlakom ustvarja dodatni tlačni padec, ki zmanjšuje pretok skozi spremenljivo dušilko. Ravnotežno stanje je zagotovljeno, ko sta tlaka na obeh straneh notranjih batov enaka oz. ko sta tlačna padca skozi fiksni dušilki enaka. Slednje pa zagotavlja tudi enakost pretokov na obeh linijah [8].



Slika 8. Presek delilnika toka (DTP) z notranjima batoma v izsredni legi

Pri zgoraj opisani situaciji so vse dušilke (fiksne in variabilne) izrednega pomena, saj zagotavljajo enakost pretokov na obeh linijah ventila (tj. B in C). Spremenljivi dušilki torej vseskozi prilagajata svoj položaj zaradi izenačitve tlakov v notranjih batih, kar pa v sodelovanju s fiksna dušilkama posledično pomeni enakost pretokov na obeh linijah.

### ■ 2 Področje obravnave

V zadnjih letih se na področju ventilov za zaprte tokokroge (t. i. Power transmission valves oz. ventili VPT) pojavljajo vse višje potrebe in zahteve tržišča. Ventili VPT se večinoma uporabljajo na mobilnih aplikacijah. Zaradi omejenega vgradnega prostora in omejitve dopustne teže se od tovrstnih ventilov zahteva oz. pri-

čakuje visoka gostota moči. Zaradi strogega režima delovanja ventilov (tj. visoki pretoki, visoki tlaki) se posledično pojavlja tudi neželena posledica povišanih energijskih izgub.

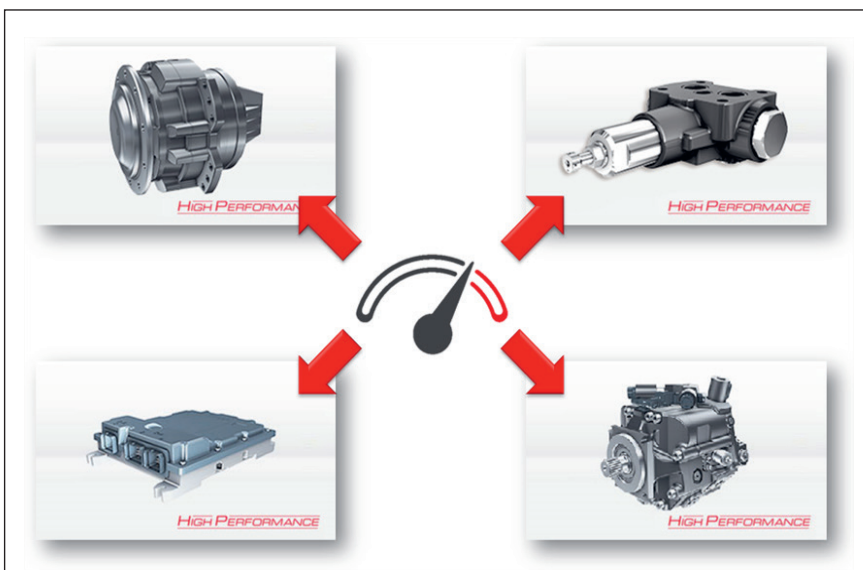
Poclain Hydraulics si prizadeva, da bi ponudil celovito rešitev hidrostatičnega pogona za visokotlačne aplikacije. Zaradi zadovoljivne potreb tržišča je bila odprta povsem nova linija motorjev, črpalk, ventilov in elektronike, imenovana »High Performance«, ki se nanaša na obratovalne tlake do 500 barov (slika 9).

Nova generacija delilnika toka (FD-H2) je bila razvita prav z namenom zadovoljiti potrebe po visoko zmogljivih ventilih zaprtega tokokroga.

### ■ 2.1 Obstoječe rešitve

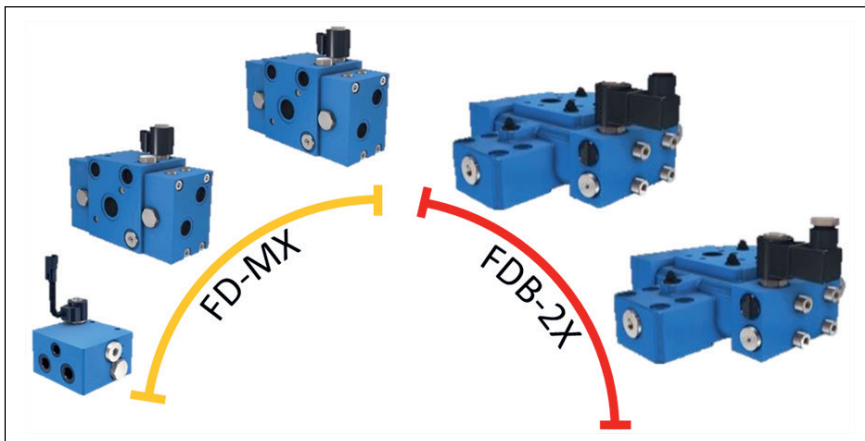
Podjetje Poclain Hydraulics je pred razvojem nove generacije delilnika toka (FD-H2) že ponujalo rešitve za vzporedno (sinhrono) delovanje koles v eni osi kakor tudi med več osmi (slika 10). Obstoječe rešitve so sledeče:

- delilnik toka tipa FD-MX (FD-M2, FD-M3, FD-M4) za srednje zahtevni razred mobilnih aplikacij (tj. za tlake do 420 barov). Omenjeni tip delilnika toka omogoča deljenje/združevanje toka v do štiri hidravličnih linijah;
- delilnik toka tipa FDB-2X (FDB-20, FDB-25) za visoko zahtevni razred mobilnih aplikacij (tj. za tlake do 450 barov). Za ta ventil ima podjetje Poclain Hydraulics zunanjega dobavitelja.



Slika 9. Portfelj podjetja Poclain Hydraulics za visoke tlake





Slika 10. Obstoječe rešitve delilnikov toka

## 2.2 Potrebe po novem izdelku

Obstoječe rešitve za visoko zahtevni razred mobilnih aplikacij ne izpolnjujejo več potreb tržišča v celoti. Na osnovi preteklih izkušenj in raziskave tržišča so bile postavljene sledeče zahteve oz. potrebe glede novega delilnika toka:

- visoke zmogljivosti (tj. tlaki do 500 barov, pretoki do 200l/min v načinu deljenja/združevanja),
- dobra točnost v načinu delitve/združevanja v celotnem tokovnem območju,
- stabilnost delovanja (brez oscilacij),
- kompaktna oblika,
- modularnost,
- višja dobičkonosnost,
- hitrejša dobava kupcu.

Poleg omenjenih zahtev so bile postavljene tudi številne druge, kot na primer: lasten razvoj, proizvodnja in montaža komponent s ciljem zadovoljiti potrebe kupca, boljša kontrola nad kakovostjo, doseči boljšo donosnost proizvoda ter ne nazadnje tudi hitrejša dostava končnega produkta (sistema) kupcu.

## 3 Primerjalna analiza

Primerjalna analiza zajema šest različnih delilnikov toka drugih (konkurenčnih) proizvajalcev. Vsi analizirani ventili se uporabljajo na mobilnih aplikacijah in pri vseh so bile zasledovane sledeče spremenljivke:

- tlačni padec ( $\Delta p$ ),
- točnost v načinu delitve in združevanja.

ventila. Spodnje slike prikazujejo povprečne vrednosti točnosti, in sicer izračunane po enačbi (2):

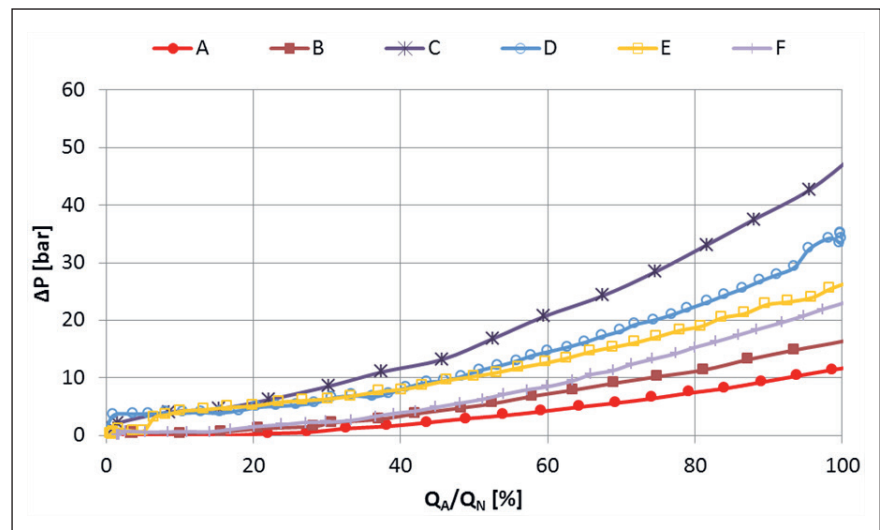
$$T [\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{Q_{Ai} - Q_{Bi}}{Q_{Ai} + Q_{Bi}}}{6} \cdot 100 \% \quad (2)$$

pri čemer se oznaki A in B nanašata na izhodni veji ventila (tj. B in C v primeru ventila DTP, slika 7).

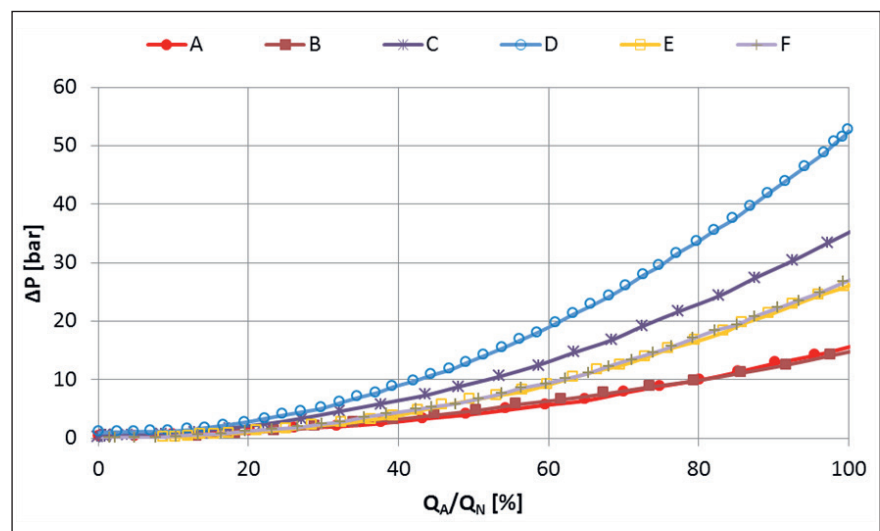
## 3.1 Hidravlične meritve konkurenčnih ventilov

### 3.1.1 Tlačni padci

Analiza tlačnih padcev je pokazala številne razlike pri nazivnih vrednostih pretokov. Slika 11 prikazuje tlačne padce v načinu deljenja glede na razmerje med dejanskim



Slika 11. Tlačni padci v načinu deljenja



Slika 12. Tlačni padci v načinu združevanja

pretokom ( $Q_A$ ) in nominalnim pretokom ( $Q_N$ ). Tlačni padci imajo pri nominalnem pretoku v načinu deljenja vrednosti med 12 barov in 48 barov. Na omenjeni sliki je razvidno znatno odstopanje med konkurentom A in konkurentom C.

Razlike so vidne tudi pri tlačnih padcih istega proizvajalca, in sicer primerjajoč način deljenja in združevanja. Na primer: ventil konkurenta D ima 19 barov razlike med načinom deljenja in načinom združevanja. Slika 12 prikazuje tlačne padce v načinu združevanja.

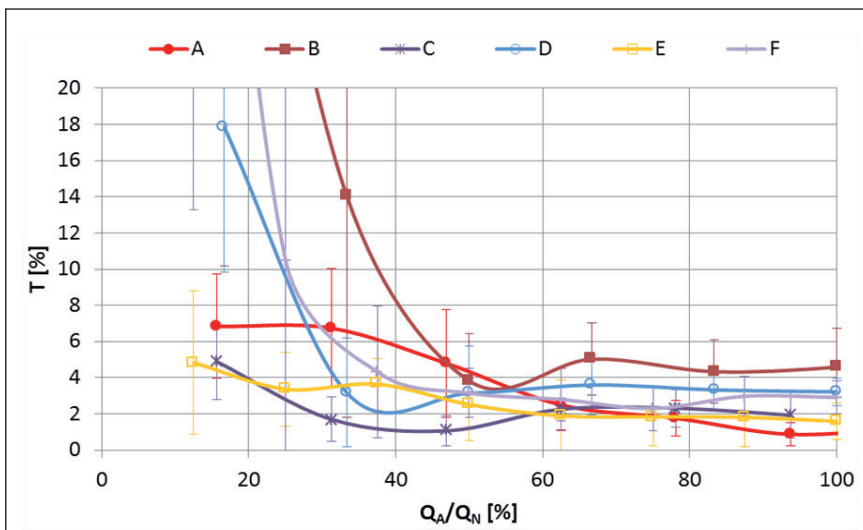
### 3.1.2 Točnost

V načinu deljenja so vsi analizirani ventili delovali stabilno (tj. brez opaznih oscilacij). Razlike v točno-

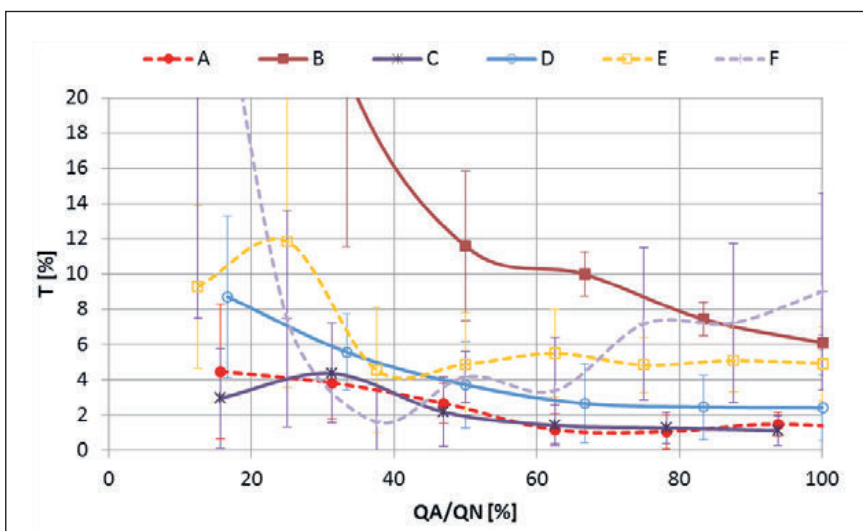
sti so opazne predvsem pri nižjih pretokih (slika 13). Kot je bilo že omenjeno, je pri mobilnih aplikacijah zelena konstantna točnost v čim širšem tokovnem območju.

Slika 13 in 14 prikazujeta točnost v odvisnosti od tokovnega razmerja; vrednosti se nanašajo na povprečne vrednosti, pri čemer vertikalne linije predstavljajo standardni odklon.

Razlike med analiziranimi ventili pa postanejo očitne v načinu združevanja. V omenjenem načinu so bile izmerjene najslabše točnosti, pri treh od šestih ventilih pa so bile opazne tudi precejšnje oscilacije (slika 14). Ventili, pri katerih so bile zaznane oscilacije, so te označene črtkano.



Slika 13. Točnost v načinu deljenja



Slika 14. Točnost v načinu združevanja

## 3.2 Zaključki

Primerjalna analiza konkurenčnih ventilov je pokazala, da je način združevanja najbolj kritičen z ozirom na točnost delovanja in stabilnost delovanja. Na začetku izvajanja primerjalne analize se je pojavil dvom v korektnost merilnega protokola podjetja Poclain Hydraulics. Razlog je bil v tem, da so se oscilacije pojavljale tudi pri priznanih proizvajalcih. Korektnost merilnega protokola se je, med drugim, pokazala tudi na osnovi odziva tržišča – nekateri ventili priznanih in uveljavljenih znamk dejansko oscilirajo tudi na terenu.

## Literatura

- [1] Poclain Hydraulics: Flow control valves; Hydraulic components: 2017.
- [2] Merrit, H. E.: Hydraulic control system, John Wiley and Sons, New York, 1967.
- [3] AMEHelp, rev. 15 SL1.
- [4] Peternel, L.: Optimizacija delilnika/združevalnika toka, diplomsko delo, Ljubljana, 2012.
- [5] Izobraževalni center Poclain Hydraulics (različna literatura).
- [6] <http://www.hydraulicspneumatics.com/other-technologies/book-2-chapter-11-flow-divider-circuits>; nazadnje obiskano 27. 7. 2017.
- [7] [http://www.sunhydraulics.com/sites/default/files/media\\_library/tech\\_resources/TT\\_US\\_FlowDivider-New.pdf](http://www.sunhydraulics.com/sites/default/files/media_library/tech_resources/TT_US_FlowDivider-New.pdf); nazadnje obiskano 26. 7. 2017.
- [8] [http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@hyd/documents/content/pct\\_273379.pdf](http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@hyd/documents/content/pct_273379.pdf); nazadnje obiskano 27. 7. 2017.
- [9] <http://www.poclain-hydraulics.com/en/products/valves/flow-divider>; nazadnje obiskano 1. 8. 2017.
- [10] <http://www.poclain-hydraulics.com/en/high-performance>; nazadnje obiskano 27. 7. 2017.
- [11] <https://www.google.com/patents/US3554213>; nazadnje obiskano 17. 7. 2017.
- [12] <https://www.google.com/patents/US20160223091>; nazadnje obiskano 17. 7. 2017.