

Problematika kratke vezi vročevoda

Jernej BÖHM, Suvad BAJRIĆ, Tjaša OŠTIR, Marjeta PETRIŠIČ

Izvleček: V prispevku predstavljamo rezultate krmiljenja kratke vezi v vročevodnem omrežju. Izvedli smo simulacijo odpiranja/zapiranja kratke vezi na vročevodu daljinskega ogrevanja ter izmerili potek tlakov na mestu kratke vezi pri motnji, povzročeni s hidravličnim postopnim krmiljenjem. V obeh primerih nismo zasledili pomembnih sprememb tlaka.

Ključne besede: daljinsko ogrevanje, kratka vez, vodni udar, simulacija, meritev

■ 1 Uvod

Premišljena strategija uporabe avtonomne kratke vezi (KV) lahko prispeva k zmanjšanju stroškov obratovanja sistema daljinskega ogrevanja (DO) ob hkratni zadostni kvaliteti oskrbe s toploto [1].

V sistemih DO vgrajujemo KV na vseh kritičnih mestih, predvsem zaradi preprečitve poškodb vročevoda ob globokih zmrzalih.

Povsem drugačno nalogo opravlja daljinsko krmiljena KV. Te so odprte v času pregrevanja mreže (npr. pred nastopom jutranje konice), kasneje pa jih zapremo in tako izrabimo razpoložljiv pretok vira za cirkulacijo skozi toplotne postaje. Kvaliteta oskrbe s toploto narekuje iskanje kompromisa med temperaturo dovodne vode in pretokom [2].

Tudi v sistemu DO Ljubljane je implementirano pregrevanje omrežja prav s pomočjo več KV [3]. Z odprtjem KV se pri isti moči vira poveča temperatura povratka, v določenem časovnem obdobju zmanjša temperaturna razlika med dovodom in povratkom, kar posledično poveča masni pretok in hitrost vode

Mag. Jernej Böhm, univ. dipl. inž., mag. Suvad Bajrić, univ. dipl. inž., Tjaša Oštir, univ. dipl. inž., Marjeta Petrišič, univ. dipl. inž., vsi Energetika Ljubljana, d. o. o., Ljubljana

v cevovodu. Pregrevanje omrežja uporabljamo v nočnem času, ko so potrebe po toploti nižje, kot je maksimalna moč. Na takšen način se v omrežje akumulira toplota, ki se porabi v času jutranje konice, ko nastopijo večje potrebe po toploti. Ljubljansko vročevodno omrežje ima prostornino preko 2.10^4 m^3 [4], kar pomeni velik potencial za akumulacijo energije brez dodatnih investicijskih stroškov.

Cilj postavitve KV v distribucijsko omrežje je skrajšanje transportnih časov toplote. V sistemih DO preteče tudi nekaj ur (npr. za sistem DO Ljubljana 4 do 6 ur), preden pride proizvedena toplota iz proizvodne enote do posameznega odjemalca v distribucijski mreži. S skrajšanjem transportnih časov omogočimo bolj optimalno vodenje sistema, saj lažje ocenimo prihajajoče zunanje temperature in potrebe po toploti.

Ko v proizvodnem viru povišamo temperaturo dovodne vode, ustvarimo kontinuitetni val temperature spremembe, ki se giblje s hitrostjo približno enako hitrosti vode. Tlačna in pretočna sprememba se v distribucijskem omrežju DO širita znatno hitreje kot temperaturna sprememba. Hitrost tlačnega vala je odvisna od premera cevovoda, debeline stene cevi, od načina vgraditve in vrste cevne materiala ter od fizikalnih lastnosti tekočine, ki se pretaka po cevi ($1,497 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ [5]). Kar pomeni, da je dinamika pretoka in tlaka v omrežju manjšega pomena kot pa dinamika temperature spremem-

be, predvsem z vidika optimalnega vodenja distribucijske mreže [6].

S krmiljenjem KV v vročevodnem omrežju povzročamo tlačne motnje, ki v najelementarnejši obliki lahko izzovejo vodni (hidravlični) udar. In prav to problematiko smo želeli raziskati. Krmiljenje KV smo najprej simulirali na računalniku, rezultate pa nato preverili še z meritvijo.

■ 2 Širjenje tlačne motnje v ceveh

V prostorsko neomejeni tekočini se tlačna sprememba širi frekvenčno neodvisno, torej v celotnem spektru. V cevi pa je valovanje frekvenčno močno omejeno, le na nekaj »osnovnih« nihanj. Dušenje zaradi viskoznosti tekočin je pri nizkofrekvenčnih dogodkih zanemarljivo ($\alpha_{50cm} \approx 2.10^{-5} \text{ m}$ [7]).

V tem poglavju bomo opisali primer širjenja tlačne motnje po neskončno dolgi ravni okrogli cevi s togimi stenami, napolnjeni z vodo. Predpostavko togega telesa omogoča dejstvo, da je impedanca ($Z = \rho \cdot c$), na katero naleti valovanje v kovini, mnogo večja od tiste v vodi.

Kadar obravnavamo vodo kot idealno tekočino brez trenja, lahko pojav valovanja opišemo kot polje tlaka, ki zadošča splošni valovni enačbi:

$$\partial^2 p / \partial t^2 = c^2 \cdot \Delta p \quad (1)$$

(∂ ... operator parcialni odvod, p ... tlak, t ...čas, c ...hitrost zvoka v vodi $\approx 1,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, Δ ...Laplacov operator)

Ker je enačba v našem primeru linearna, lahko tlačni dogodek opišemo tudi kot linearno superpozicijo harmoničnih valovanj z valovno dolžino λ oziroma kot produkt štirih funkcij v cilindričnem prostoru, od katerih je vsaka odvisna samo od ene spremenljivke:

$$p(x, r, \theta, t) = X(x) \cdot R(r) \cdot \Theta(\theta) \cdot e^{i(2\pi c/\lambda)t} \quad (2)$$

(x, r, θ ...cilindrične koordinate)

Parcialne odvode v nadaljevanju nadomestimo z materialnimi odvodi, hkrati vpeljemo cilindrične spremenljivke, cilindrični nastavek Laplaciana [8] ter omenjeno vstavimo v valovno enačbo. Pri tem dobimo izraz:

$$(1/X) \cdot (d^2X/dx^2) + (1/R) \cdot (d^2R/dr^2 + (1/r) \cdot dR/dr) + (1/(r^2 \cdot \Theta)) \cdot (d^2\Theta/d\theta^2) + (\omega/c)^2 = 0 \quad (3)$$

Ker je vsak člen odvisen od ene spremenljivke, sklepamo, da je prvi člen konstanta!

Pri določitvi kotne porazdelitve funkcije $\Theta(\theta)$ upoštevajmo, da je tlak enolično določen in periodično odvisen od kota θ , torej:

$$\Theta(\theta) = e^{\pm jm\theta} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

kjer vrednost m opisuje število radialno usmerjenih vozlov tlaka na mestu x . Po substituciji pridemo do enačbe za radialno porazdelitveno funkcijo tlaka:

$$k_r^2 + (1/R) \cdot (d^2R/dr^2 + (1/r) \cdot dR/dr) - m^2/r^2 = 0 \quad (5)$$

(k_r^2 ... valovno število)

Rešitev gornje enačbe za okroglo cev opisujejo standardne Besselove funkcije (prve vrste, reda m):

$$R(k_r r) = J_m(k_r r), \quad k_r \neq 0 \quad (6)$$

Rešujemo jih z numerično programsko opremo.

Oglejmo si nekaj njihovih splošnih lastnosti:

$J_{m=0}(0) = 1, J_{m>0}(0) = 0$ (tedaj doseže maksimum pri $k_r r \approx m + 1$), z naraščajočim argumentom pa se v vseh

primerih iznihavajo. Ker je na togi steni cevi ($r = a$) pomik vode prečno na smer stene enak 0, velja tudi: $J_m'(k_r a) = 0$ ($\psi = k_r a$).

Z upoštevanjem zveze (2) za $X(x)$, $R(r)$ in $\Theta(\theta)$ lahko zapišemo rešitev za posamezni način nihanja v obliki:

$$p(x, r, \theta, t) = A_{mn}^{\pm} J_m(k_{r,mn} r) e^{i(2\pi c/\lambda)t \pm m\theta \pm k_{x,mn} x} \quad (7)$$

poljubno harmonično nihanje pa:

$$p(x, r, \theta, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn}^{\pm} J_m(k_{r,mn} r) e^{i(2\pi c/\lambda)t \pm m\theta \pm k_{x,mn} x} \quad (8)$$

Funkcija opisuje tlačni potek v okroglem cevovodu ob tlačni motnji, fizikalno pa so pomembni le tisti načini, pri katerih ima k_x realno vrednost ($k_{x,mn}^2 = \{2\pi/\lambda\}^2 - k_{r,mn}^2 > 0$). Kompleksne komponente se vzdolž cevi zadušijo. Znak \pm določa fazo valovanja.

Amplituda tlaka v okrogli cevi torej pada eksponentno z oddaljenostjo od izvora. Z naraščajočima m in n narašča tudi $k_{x,mn}$, zato se energija rotirajočih valov seli proti steni. V tekočini cevi se lahko razvijejo le valovanja, katerih valovna dolžina je krajša od kritične vrednosti ($\lambda_c = 2\pi/k_{r,mn}$). Osnovni val ($m = n = 0$) se

širi vedno, nihanja višjih redov pa le, če je izpolnjen gornji pogoj za k_x .

Za ilustracijo si pogledjmo primer porazdelitev tlaka v togi cevi \emptyset DN 10 cm [7]. S povečanjem njenega premera se za enak faktor poveča valovna dolžina kritičnega valovanja. V omenjeni cevi se lahko širijo le naslednja nihanja (preglednica 1):

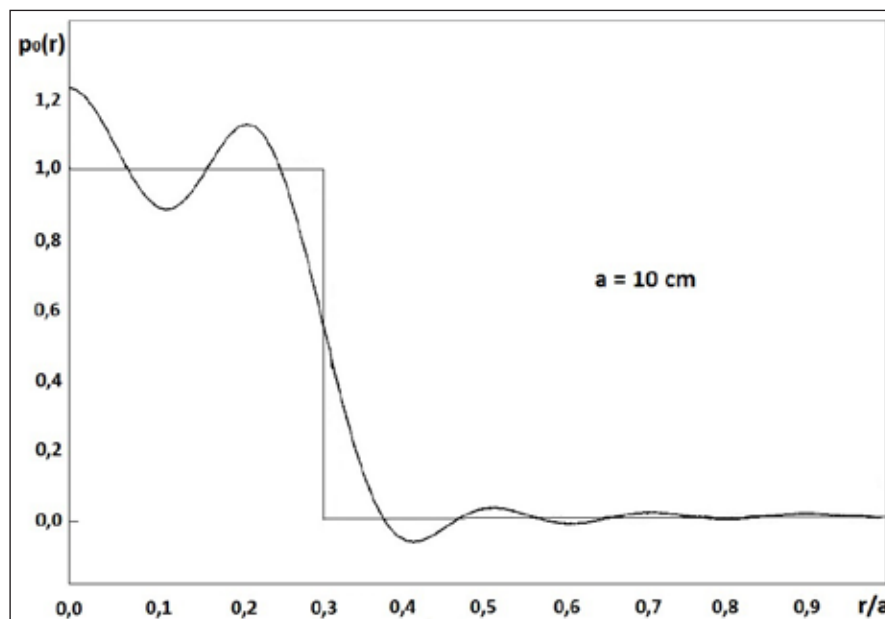
V primeru Heavisidove stopničaste tlačne motnje ($H(s) = 1/s$) je porazdelitev tlaka ob zaklopki naslednja (slika 1):

3 Problematika vodnega udara KV

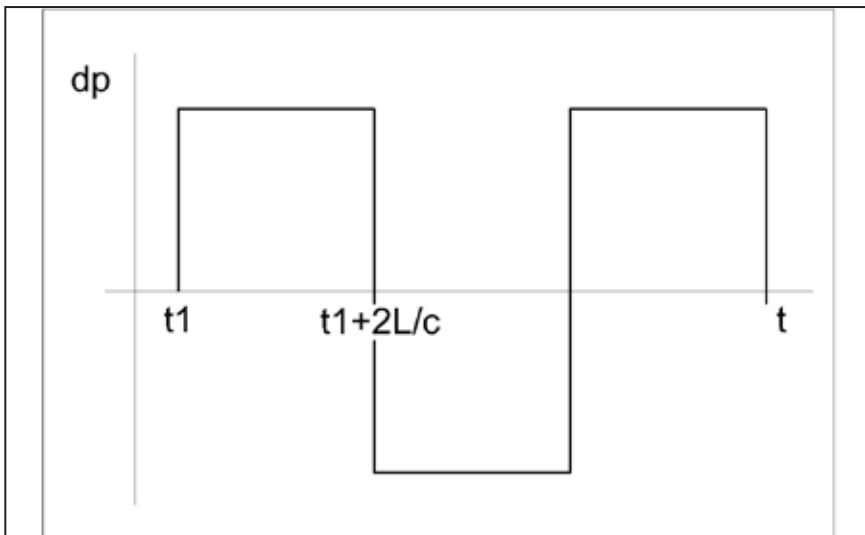
Obliko vodnega udara (popolni, nepopolni vodni udar) določajo pogoji potovanja tlačnega vala oziroma njegove hitrosti širjenja (c) od mesta nastanka motnje do povratka vala do mesta izvora motnje. Za hidravlične sisteme si prizadevamo, da obratujejo v stacionarnem režimu ali vsaj v kvazistacionarnem, kjer nastopajo zgolj majhne spremembe. V slednjem te umerjeno prehajajo iz enega stanja v drugo brez kakršnihkoli posledic. Spremembe tlaka, do katerih na splošno prihaja v hi-

Preglednica 1. Vrednosti kritičnih valovnih dolžin za osnovni način nihanja ($m = 0$) za cev \emptyset DN 10 cm, napolnjeno z vodo [7]

n	0	1	2	3	4
λ_c /cm	∞	6,52	3,57	2,47	1,88



Slika 1. Potek tlaka na mestu zaklopke ventila $\approx 1/3$ premera cevi [7]



Slika 2. Potek tlaka ob ventilu ob nenadnem zapiranjju. Zaradi trenja in fizikalnih lastnosti hidravličnega sistema se ostri prehodi bolj ali manj zgladijo. (t_1 ... čas zapiranja, T ... perioda nihanja)

dravličnem sistemu, so: iztok vode, vklop in izklop črpalk zaradi posegov na omrežju ipd. Hitra sprememba povzroči nestacionarni režim obratovanja. Ta je praviloma zelo nevaren zaradi možnosti nastanka poškodb.

Vrednost $t_f = 2L/c$ predstavlja fazo udara oz. čas (t) med nastankom motnje in njenega odbojnega povratka na oddaljenosti L . V primeru $t < t_f$ in pri dovolj umerjeni motnji praktično ne moremo povzročiti vodnega udara. Toliko bolj, ker priključke toplotnih postaj vzdolž vročevoda lahko prepoznamo kot blažilce vodnega udara.

Povsem drugače je v primeru motnje (odpiranja/zapiranja zapore), ko je izpolnjen pogoj $t \gg t_p$ torej pri dolgih ceveh.

Ob motnji delujejo na tekočino med drugim sile tlaka, teže, inercije, trenja, stisljivosti tekočine, elastičnost sistema. Spremembo hitrosti vode v cevi poenostavljeno opišemo:

$$dv/dt = F - (1/\rho) \cdot \nabla p \quad (\text{za diferencialno majhne spremembe}) \quad (9)$$

(v ... hitrost vode v cevi, t ... čas, F ... sila na steno cevi, ρ ... gostota vode, p ... tlak v cevi, ∇ ... operator nabra)

Sprememba tlaka dp vzdolž horizontalne cevi dx je približno enaka: $dp = \nabla p \cdot dx = -(\rho \cdot dv/dt) \cdot Dx$ (10)

ob povezavah $dx = c \cdot dt$ in $\gamma = \rho \cdot g$ (γ ... specifična teža, g ... gravitacijski pospešek) dobimo:

$$dp = -\rho \cdot c \cdot dv \rightarrow H = -c \cdot (dv/g) \quad (H \dots \text{piezometrična višina, Bernoulli}). \quad (11)$$

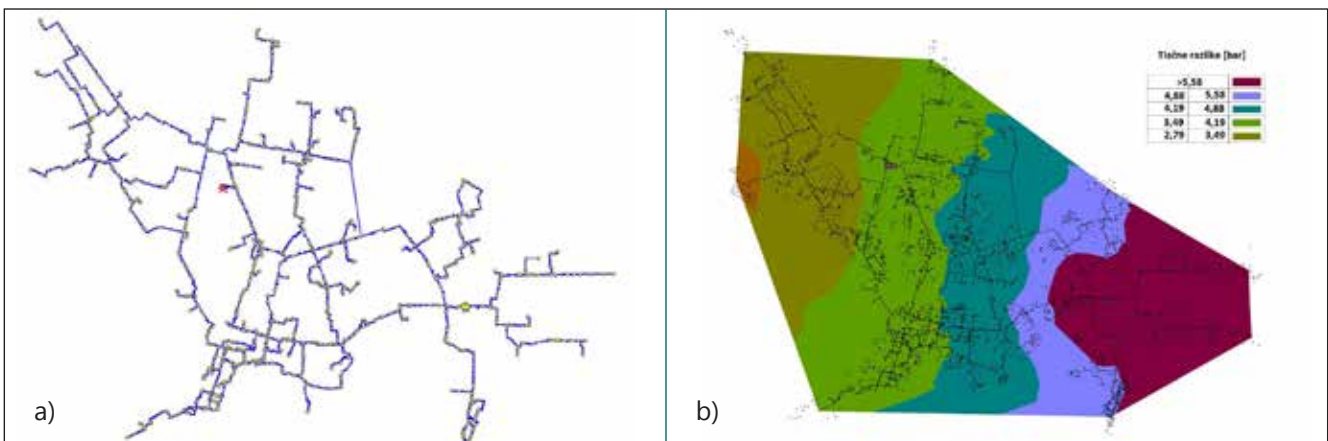
V slednjem prepoznamo enačbo Jukovskega [9]. V praksi ni povsem zadovoljiva, a je dovolj nazorna za opis problematike. V prvem približku je sprememba tlaka ob vodnem udaru proporcionalna spremembi hitrosti vode v cevi, gostoti vode in hitrosti širjenja tlačne spremembe po cevi (vročevoda).

Za oceno, kdaj je udar lahko nevaren, se v literaturi pogosto uporablja konstanta inertnosti tlačnega cevovoda, ki pa je uporabna le v enostavnih primerih. Na splošno pa velja: če se odbojna motnja vrne do zapornega ventila še pred njegovim zaprtjem, povečanje tlaka ne doseže maksimalne vrednosti. Ta pogoj je dosežen pri:

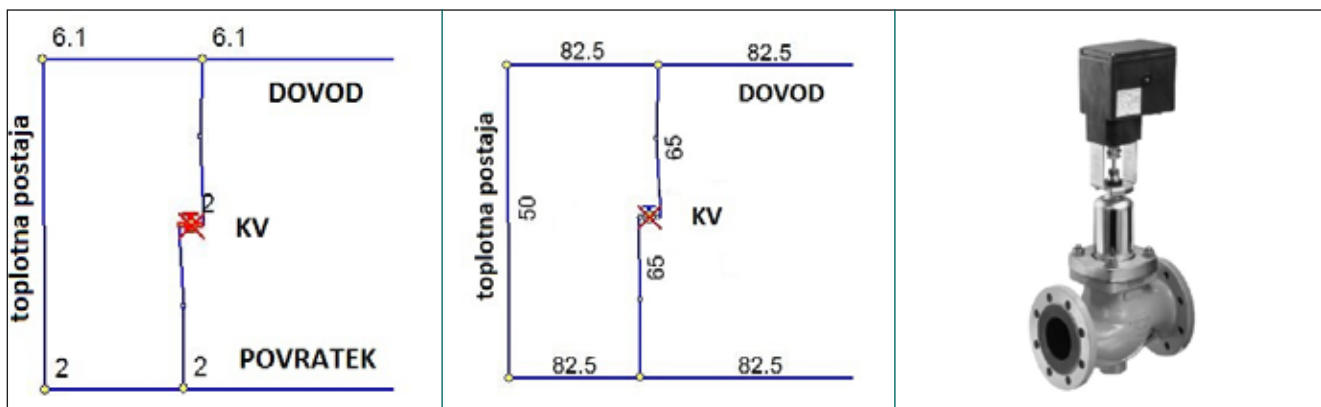
$$T_{\text{zapiranja}} > (2 \cdot L)/c.$$

4 Računalniška simulacija prehodnega pojava pri odprtju/zaprtju KV

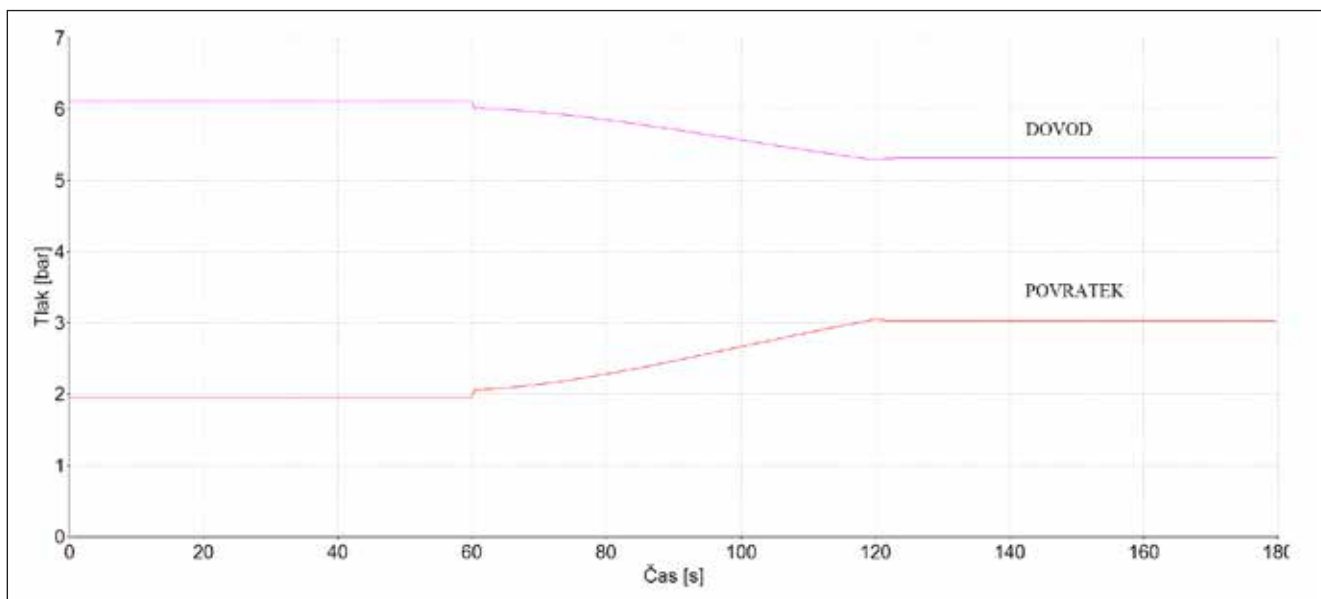
Obnašanje obsežnega hidravličnega sistema je teoretično izredno težko opisati, zato se reševanje takšnih problemov izvaja z računalniško obdelavo. Za hidravlično analizo odprtja in zaprtja KV smo uporabili programsko orodje KYPipe [10], ki je v osnovi namenjeno hidravličnim preračunom v vodovodnih omrežjih in omogoča izračun prehodnih pojavov. Za potrebe preračuna smo s programskim orodjem generirali poenostavljen hidravlični model celotnega vročevodnega omrežja sis-



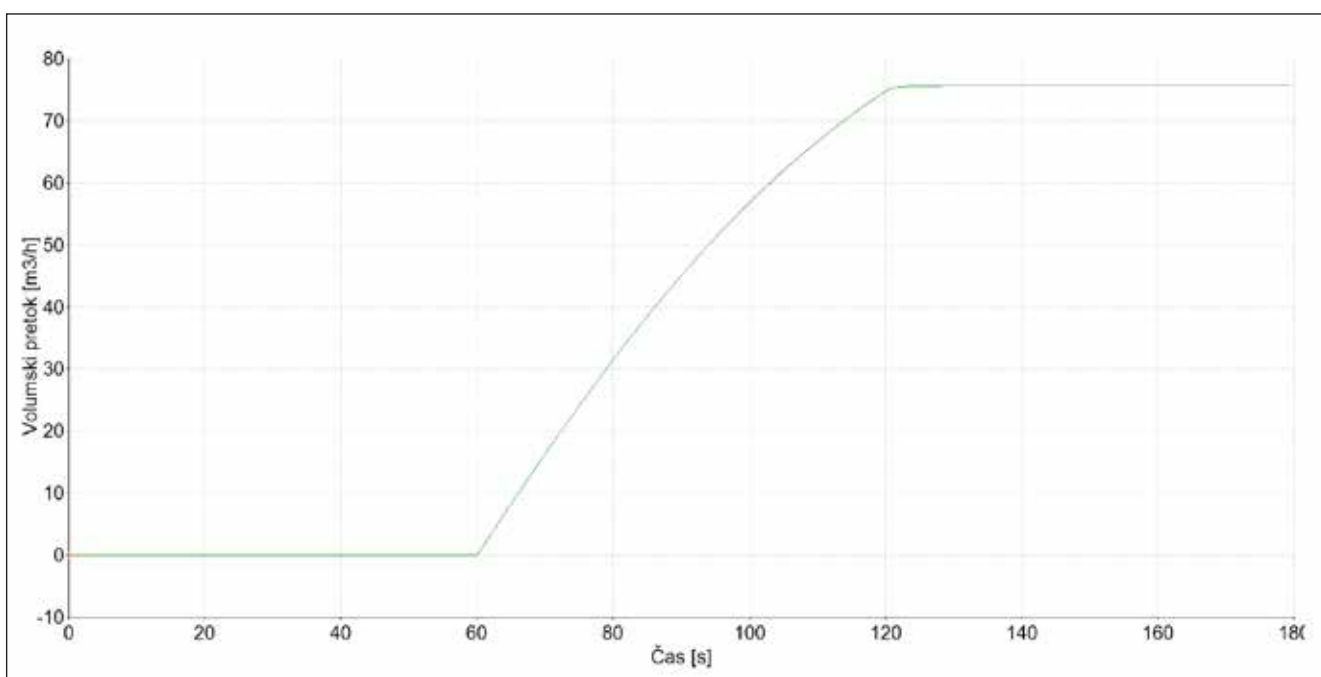
Slika 3. Poenostavljen hidravlični model DO Ljubljana: (a) KYPipe, (b) TERMIS Operation



Slika 4. (a) Model kratke vezi z označenimi premeri cevi v mm. (b) Zaporni ventil tipa 3214/3374, proizvajalec Samson. (c) Tlačne razmere v modelu kratke vezi v bar.



Slika 5. Potek tlakov pred ventilom in za njim po odprtju KV



Slika 6. Pretok v KV

tema DO Ljubljane. Upoštevali smo dejanske dimenzije cevi, lastnosti cevne materiala in fizikalne lastnosti tekočine. Za analizo smo izbrali obstoječo daljinsko krmiljeno KV, ki je vgrajena na primarni strani vročevodnega omrežja.

Vhodne parametre za simulacijo smo za izbrani obratovalni scenarij, obratovalni dan s povprečno zunanjo temperaturo 0 °C, določili s termohidravličnim preračunom v programskem orodju TERMIS Operation na poenostavljenem modelu sistema DO Ljubljana.

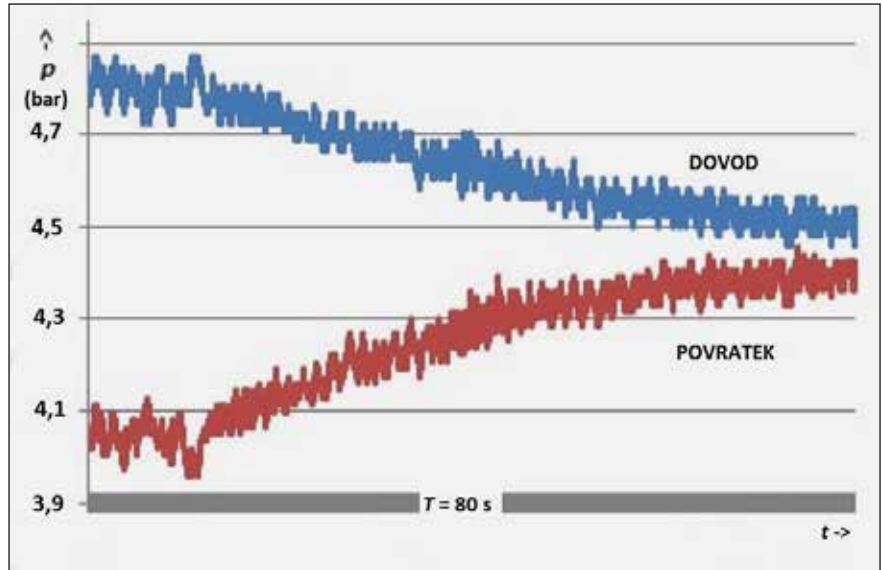
Izbrana KV je dimenzije \varnothing DN 65 mm in ima vgrajen zaporni ventil tipa 3214/3374, ki ga proizvaja Samson. Za potrebe preračuna smo uporabili karakteristike ventila in dejanske dimenzije vgrajene KV.

Na podlagi izračunanih tlakov dovida in povratka s programskim orodjem TERMIS Operation smo določili ustrezen padec tlaka skozi toplotno postajo. V modelu KV smo toplotno postajo ponazorili z daljšo povezavo dovodnega in povratnega cevovoda. Želeni padec tlaka smo dosegli z nastavitvijo dolžine in premera povezave (dolžina 4 m ter \varnothing DN 50 mm).

Iz spodnjih rezultatov simulacije je razvidno, da z odprtjem/zaprtjem ventila povzročimo tlačne valove s komaj zaznavno amplitudo v velikosti 2 kPa. Ti se pojavijo v trenutku odprtja/zaprtja zapornega ventila. Pri odpiranju KV v $t = 60$ s ne dosežemo nevarnih sprememb tlaka.

■ 5 Eksperimentalna verifikacija

Celotno operacijo odpiranja/zapiranja KV smo preverili tudi eksperimentalno. Za meritve tlaka smo uporabili analogni dajalnik tlaka nemškega podjetja First Sensor iz serije KTE/KTU6000 z odzivnim časom 5 ms (10–90 %). Za zajem podatkov smo uporabili zbiralnik podatkov lastne izdelave na osnovi Microchipovega mikrokrmilnika PI-



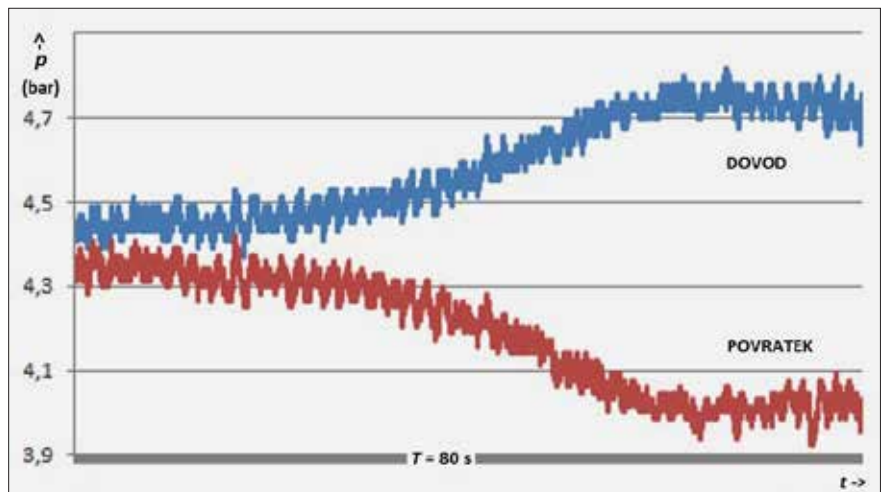
Slika 7. Tlak pri odpiranju KV

C18F4520. Meritve smo sproti shranjevali v podatkovno datoteko prenosnega računalnika. Za obdelavo podatkov (kot sledi) smo uporabili standardno programsko opremo okolja Windows.

Za izvedbeni primer smo strojno oziroma programsko opremo priredili za 2-kanalni zajem z 10-bitno ločljivostjo ter pogostostjo vzorčenja posameznega kanala 50/s.

5.1 Rezultati meritev odpiranja/zapiranja KV

Potek hidravličnih tlakov v neposredni bližini KV (tip glej zgoraj) smo opravili v eni izmed toplotnih postaj z vgrajeno KV (TP Kamniška 25). Meritve so prikazane na spodnjih grafih (slika 7 in slika 8).



Slika 8. Tlak pri zapiranju KV. Prevladuje šum.

■ 6 Zaključek

Pri krmiljenju zapornih elementov vročevoda je potrebna previdnost, saj lahko v vročevodu povzročimo nevarne tlačne oscilacije. Preverili smo tlačni odziv na mestu upravljanja KV. Izvedli smo simulacijo odpiranja/zapiranja KV ter izmerili potek tlakov ob KV pri motnji, povzročeni s hidravličnim postopnim krmiljenjem. Simulacija krmiljenja KV in izvedene meritve jasno kažejo, da v primeru zmerne hitrosti zapiranja/odpiranja KV, v izvedbenem primeru (\varnothing DN 65 mm) 60 s za polno odpiranje/zapiranje, ni nevarnosti nastanka vodnega udara v vročevodu. Nihanje tlaka zaradi tovrstnega krmiljenja KV je manjše od tlačnega šuma.

Vseeno priporočamo določeno stopnjo previdnosti tudi pri upravljanju KV.

Literatura

- [1] Dalla Rosa, A., idr.: Energy-Efficient and Cost-Effective Use of District Heating Bypass for Improving the Thermal Comfort in Bathrooms in Low-Energy Buildings, DHC13, Copenhagen, 2012, stran 128–136.
- [2] Wollerstrand, J.: District Heating Substations. Performance, Operation and Design, Doktorsko delo, Lund University, Department of heat and power engineering division of energy economics and planning lund institute of technology. Sweden, 1997.
- [3] Bajrić, S.: Optimizacija termo-hidravličnega distribucijskega sistema. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za dinamiko fluidov in termodinamiko, Ljubljana, 2011.
- [4] Oštir, T.: Zmanjšanje toplotnih izgub in skrajšanje transportnih časov v vročevodnem distribucijskem omrežju, Diplomaska naloga univerzitetnega študija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2012.
- [5] http://sl.wikipedia.org/wiki/Histrost_zvoka, 14. 03. 2014 (dostop),
- [6] Bøhm, B. idr.: Simple Models for Operational Optimisation. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering. Denmark, IEA District Heating and Cooling, Annex VI, 2002.
- [7] Grabec, I., idr.: Raziskava o možnosti uporabe UZ za prenos podatkov po vročevodu, Zaključno poročilo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2001.
- [8] Crocker, M. J.: Handbook of Acoustics, John Wiley & Sons, New York, Chapter 7- Waveguides, 1998, stran 82–87.
- [9] Petrešin, E., idr.: Aktualni vodnogospodarski projekti in objekti, Mišičev vodarski dan, 1998, stran 134–151.
- [10] KYPipe, Pipe2012 Help Manual, KYPipe Software and Manual Downloads, <http://kypipe.com>, (2013).

Bypass of District Heating

Abstract: A simulation analysis of the opening/closing of a bypass in a district heating pipeline network was carried out. Pressure measurements were taken directly at the bypass during the lapse of interference caused by progressive hydraulic (valve) steering. In both cases, no dangerous pressure changes were detected. Hydraulic pressure oscillation was for all practical purposes lost in the pressure noise of the district heating system.

Keywords: district heating, bypass, hydraulic shock, simulation, measurements



EMERSON[™]
Process Management

ZASTOPA IN PRODAJA

ppt commerce d.o.o.

Celovška 334

1210 Ljubljana-Šentvid

Slovenija

tel.: +386 1 514 23 54

faks: +386 1 514 23 55

e-pošta: ppt_commerce@siol.net

<http://www.ppt-commerce.si>



BETTIS[™] pnevmatski in elektro aktuatorji