

# Vplivi komponent toplotne podpostaje na regulacijo temperature tople sanitarne vode

Sandro Terzić<sup>1</sup>, David Nedeljković<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Danfoss Trata, d.o.o., Ulica Jožeta Jame 16, 1210 Ljubljana Šentvid, Slovenija

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: davidn@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Članek obravnava delovanje podpostaje daljinskega ogrevanja za pripravo tople sanitarne vode. Pri toplotni podpostaji smo s pomočjo simulacijskega modela analizirali obnašanje sklopa regulacijski ventil – toplotni izmenjevalnik za regulacijske ventile z različnimi tipi karakteristik. Raziskali smo, kako na regulacijo pretoka in temperature tople sanitarne vode vplivajo parametri regulacijskega ventila, kot sta npr. hitrost njegovega pogona in predimenzioniranost v izbrani delovni točki. Izkaže se, da najpogosteje uporabljena linearna karakteristika regulacijskega ventila daje dobre rezultate samo v bolj odprtih območjih delovanja regulacijskega ventila. Pri predimenzioniranih ventilih z linearno karakteristiko, ki posledično delujejo v svojih bolj zaprtih legah, prihaja do neprijetnih oscilacij temperature vode na sekundarni strani toplotnega izmenjevalnika. Kljub temu se pri manj zahtevnih regulacijah temperature tople sanitarne vode zaradi kratkih hodov ventilov z linearno karakteristiko pogosto uporabljajo počasnejši pogoni, ki so seveda cenejši. Na splošno lahko najboljše rezultate pričakujemo pri regulacijskih ventilih z logaritemsko karakteristiko, a pri njih moramo zaradi daljših hodov uporabiti hitrejša (in dražja) pogone. Ventili s t. i. deljeno karakteristiko naj bi zaradi svojega kratkega hoda in oblike karakteristike, ki je podobna logaritemski, dajali dobre rezultate ob sprejemljivi ceni, vendar je zanimiva ugotovitev, da do nihanja temperature sanitarne vode pride tudi pri takšnih ventilih, če obratujemo v bližini prevojne točke karakteristike pri večjih odprtostih ventila.

**Ključne besede:** daljinsko ogrevanje, priprava tople sanitarne vode, karakteristika regulacijskega ventila

## Effects of Heating Substation Components on Domestic Hot-Water Temperature Control

The paper deals with the operation of district heating substations for domestic hot-water supply. Using a simulation model, the behavior of a set of a control valve and a heat exchanger is analyzed in a variety of the control-valve characteristics. Results of the study are presented showing how the control of the hot-water tap flow and its temperature is affected by the parameters of the control valve, such as its speed and its excessive rating at a selected operating point. It turns out that the most commonly used linear characteristic of the control valve gives good results only at more open operation positions of the control valve. When the control valves are over-rated, which in turn operate in their more closed positions, unpleasant oscillations of the water temperature on the secondary side of the heat exchanger are detected. Nevertheless, in a less demanding domestic hot-water temperature control, the control valves with a linear characteristic are frequently applied due to their short stroke, as they use slower drives, which are of course more economical. In general, the best results can be expected for control valves with a logarithmic characteristic, but their long strokes require faster (and more expensive) drives. The so-called split characteristic control valves should give good results for an acceptable expense due to their short strokes and the characteristic that is similar to the logarithmic one.

However, it is interesting to note that this kind of valves give rise to oscillations of the hot-water temperature, when the system operates near the inflection point of the characteristic at a higher valve openness.

**Keywords:** district heating, domestic hot water preparation, control valve characteristic

## 1 UVOD

Ogrevalne tehnike so v zadnjih letih doživele velik razcvet in številne spremembe tako v sami tehnologiji kot tudi v miselnosti porabnikov. Priprava in distribucija toplote sta postali energetsko veliko učinkovitejši, pri porabnikih toplote za ogrevanje stanovanjskih prostorov ali za pripravo tople sanitarne vode pa je zaznati čedalje globljo ekološko ozaveščenost. Za zmanjševanje izpustov CO<sub>2</sub> ne zadostujejo samo spremembe in izboljšave izkoristka pri generiranju toplote, temveč so potrebne tudi izboljšave regulacijskih sistemov temperature na porabniški strani. Problem nadzora temperature tople sanitarne vode, ki jo uporabljamo za tuširanje, pomivanje posode in umivanje rok, je tako čedalje bolj izražen, saj lahko na tem področju z

različnimi optimizacijami učinkovito pripomoremo k zmanjšanju porabe energije in posledično izpustov.

Najnovejši sistemi za pripravo toplote za ogrevanje prostorov in tople sanitarne vode temeljijo na tako imenovanem daljinskem ogrevanju, ki je prvo širšo uporabo doživelo v začetku dvajsetega stoletja na Danskem. Danes generiranje toplote v daljinskoogrevalnem omrežju poteka še vedno na podoben način, napredek pa lahko ponazarimo skozi štiri generacije daljinskega ogrevanja [1].

Prva generacija (1903–1930) je temeljila na pari kot mediju za prenos toplote. Para s temperaturo 200 °C se je po betonskih podzemnih jaških pošiljala do naselja, kot energent za uparjanje vode v toplarni pa so večinoma uporabljali olje oz. nafto. Energetska učinkovitost takega sistema je bila na dokaj nizki ravni, saj so bile izgube toplote skozi betonske jaške velike, prav tako pa tehnologija generiranja pare ni omogočala visokih izkoristkov toplarne same. Regulacija temperature v ogrevanih prostorih je bila povsem preprosta: kadar je bilo prevroče, so stanovalci odprli okno. Za pripravo tople sanitarne vode pa so se še vedno pretežno uporabljali posamični grelci ali bojlerji.

Druga generacija daljinskega ogrevanja (1930–1980) je za distribucijo toplote že uporabljala vodo pod tlakom in temperaturo med 100 °C in 180 °C, ki je bila po ceveh speljana do porabnikov. Cevi so bile izolirane na mestu vgradnje, prav tako se je prvič uporabil koncept distribucijskih in porabniških podpostaj, katerih naloga je hidravlična ločitev dveh vodnih tokokrogov in nadzorovan prenos energije s primarne generatorske strani na sekundarno porabniško stran prek prenosnikov toplote. Prav tako so se začele uporabljati prve podpostaje za pripravo tople sanitarne vode, vendar so v večini držav za te namene še vedno prevladovali bojlerji. Kot energenti v toplarnah so se večinoma uporabljali premog, plin in olje.

Tretja generacija daljinskega ogrevanja (1980–2010) je toploto porabnikom dobavljala z vodo pod tlakom s temperaturo pod 100 °C. Vgrajevale so se industrijsko proizvedene podpostaje ter namensko izolirane cevi, ki so omogočale veliko višje izkoristke kot prej, standard pa je narekoval obvezno merjenje porabe energije na primarnem generatorsko-distribucijskem omrežju in na sekundarnem porabniškem omrežju. Kot energenti za generiranje toplote so se uporabljali biomasa, premog in plin. Uvedeni so bili tudi prvi sistemi, ki so izkoriščali odvečno toploto industrijskih procesov, na primer v železarski industriji, talilnicah kovin itd. Za regulacijo temperature vode je bilo razvitih kar nekaj ventilov s specifičnimi karakteristikami.

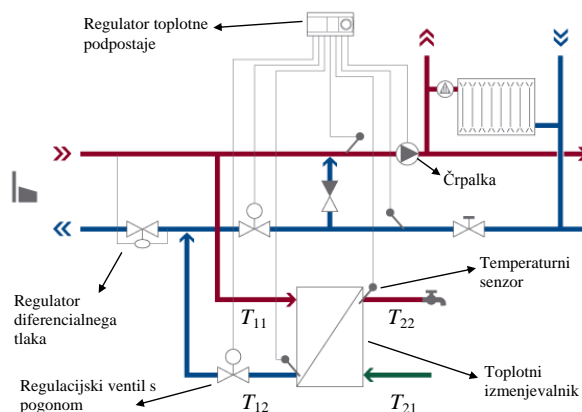
V četrti generaciji daljinskega ogrevanja (po letu 2010) se kažejo na novo zadane smernice energetske varčnosti in želje po zmanjšanju izpustov  $\text{CO}_2$ . Zaradi uporabe najnovejših izolacijskih materialov na dovodnih ceveh in učinkovitejše izolacije ogrevanih stavb se potreba po energiji zmanjšuje. Posledično lahko temperaturo vode, ki se uporablja za distribucijo toplote, znižamo pod 80 °C. Učinkovito delovanje takšnega

sistema pa lahko zagotovimo samo z naprednimi sistemi nadzora distribucijskega in porabniškega omrežja; ti sistemi povezujejo delovanje celotnih stavb v tako imenovane BMS-sisteme (BMS – Building Management System). Kljub vsem prizadevanjem in vložkom v čim višjo energetske učinkovitost pa posamezni proizvajalci še vedno zagovarjajo različne poglede na karakteristiko regulacijskih ventilov, ki bi dajala najboljše rezultate v sistemih daljinskega ogrevanja in tudi v ogrevalno-prezračevalnih sistemih.

## 2 PODPOSTAJA ZA PRIPRAVO TOPLE SANITARNE VODE

Primarna naloga podpostaj daljinskega ogrevanja je zagotavljanje dobave energije za ogrevanje porabniku in hidravlična ločitev dveh vodnih tokokrogov: na primarno (generatorsko-distribucijsko) stran in sekundarno (porabniško) stran. Primarna stran namreč uporablja vodne dodatke, ki preprečujejo korozijo in razvoj mikrobioloških kultur, zato je hidravlična ločitev nujna. Podpostajo (slika 1) sestavljajo naslednje komponente:

- toplotni izmenjevalnik,
- regulacijski ventil s svojim pogonom,
- regulator diferencialnega tlaka,
- filtri,
- zaporni ventili,
- merilniki energije oz. toplote,
- temperaturni senzorji,
- regulator temperature,
- vodna črpalka.



Slika 1: Shema podpostaje za ogrevanje in pripravo tople sanitarne vode [2]

Podpostaja je na primarni strani priključena na omrežje daljinskega ogrevanja, od koder toplarna dobavlja vodo pod tlakom in s konstantno temperaturo; podpostaja toploto z dovoda prek toplotnega izmenjevalnika prenaša na sekundarno stran k porabniku. Pomemben vpliv na količino prenesene toplote ima regulacijski ventil, saj s svojo stopnjo

odprtosti vpliva na pretok vode skozi toplotni izmenjevalnik in s tem na količino dovedene toplote, ki je na voljo za prenos. Stopnjo odprtosti ventila pa narekuje njegov pogon, kateremu nadrejeni regulator daje ukaz za odpiranje ali zapiranje ventila v odvisnosti od temperature na sekundarni strani prenosnika toplote. Ker dovodna voda s primarne strani podpostaje odda energijo sekundarni porabniški strani, se ohladi in se prek povratnega voda vrne v toplarno, kjer se zopet segreje in tvori zaključen krog.

Tlačni in temperaturni nivoji vode v dovodu omrežja daljinskega ogrevanja so si med sabo različni glede na omrežne zahteve in povprečne zunanje temperature. Če je na primer omrežje daljinskega ogrevanja speljano po bolj hribovitem območju, bodo za premagovanje višinskih razlik tlaki v sistemu višji. V območjih, kjer so povprečne zunanje temperature relativno nizke, je treba dvigniti temperaturo vode, ki kroži po omrežju, saj se toplotne izgube v ceveh povečajo. Ravno nasprotno pa velja na območjih z visoko povprečno zunanjo temperaturo. Tako imajo na Norveškem določeno temperaturo vode dovoda za pripravo tople sanitarne vode na primarni strani 80 °C in povratka 30 °C (režim 80/30 °C), medtem ko v Nemčiji določajo predvsem 70 °C za temperaturo dovoda in 40 °C za temperaturo povratka (režim 70/40 °C) [3].

Podpostaja tako igra pglavnitvo vlogo pri regulaciji temperature na sekundarni (porabniški) strani in s tem na porabo energije celotne stavbe. Za doseganje čim večjega prenosa toplote s čim manjšim pretokom skozi regulacijski ventil je nujno zelo dobro poznati lastnosti in medsebojne odvisnosti toplotnega izmenjevalnika, regulatorja in regulacijskega ventila s pogonom. Temperatura povratne vode v toplarno pri pripravi tople sanitarne vode mora biti čim nižja (dober termični izkoristek), temperatura na sekundarni porabniški strani pa čim bolj konstantna, ne glede na odvzem (dobra regulacija temperature).

V nadaljevanju bodo podrobneje predstavljeni toplotni izmenjevalnik, regulacijski ventil in njegov pogon.

## 2.1 Toplotni izmenjevalnik

Naloga toplotnega izmenjevalnika je prenos energije od toplega medija k hladnemu s čim višjim izkoristkom ter čim manjšim padcem tlaka. V podpostajah daljinskega ogrevanja se najpogosteje uporabljajo ploščni izmenjevalniki toplote.

Toplota, prenesena prek toplotnega izmenjevalnika s primarne na sekundarno stran, ni sorazmerna pretoku vode na primarni strani, temveč izkazuje nelinearno karakteristiko, ki je odvisna od temperaturnega izkoristka  $\eta$  [4]:

$$\eta = \frac{T_{11} - T_{12}}{T_{11} - T_{21}} \quad (1)$$

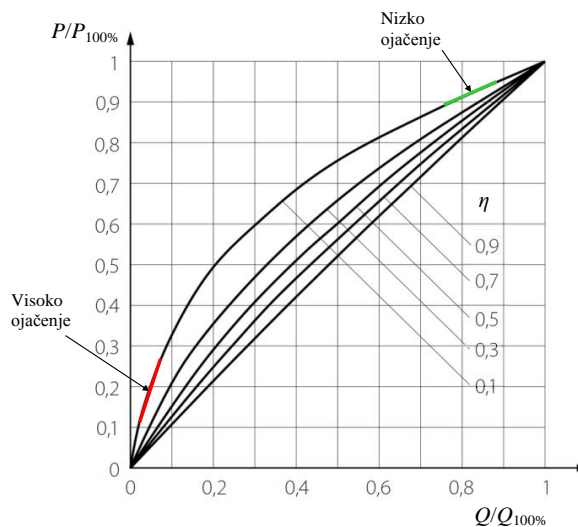
Pri tem je  $T$  temperatura vode, indeksi pa indicirajo temperaturo v toplotnem izmenjevalniku ali iz njega (slika 1).

Prenos toplote toplotnega izmenjevalnika v odvisnosti od masnega pretoka vode  $Q$  lahko zapišemo z enačbo:

$$\frac{P}{P_{100\%}} = \frac{1}{1 + \eta \frac{1 - Q/Q_{100\%}}{Q/Q_{100\%}}}, \quad (2)$$

kjer je  $P$  trenutna toplotna moč,  $P_{100\%}$  maksimalna toplotna moč,  $Q$  trenutni prostorninski pretok vode in  $Q_{100\%}$  maksimalen pretok vode.

Manjši kot je temperaturni izkoristek  $\eta$ , bolj je prenos toplote odvisen od pretoka vode in karakteristika je manj linearna (slika 2). Pri nižjih temperaturnih izkoristkih  $\eta$  je za majhne pretoke  $Q$  (torej pri manjših potrebah po toploti) strmina karakteristik občutno večja kot pri velikih pretokih (takrat so potrebe po toploti višje). V regulacijsko-tehničnem pogledu tako sistem pri manjših potrebah po toploti izkazuje višje ojačenje, kar lahko privede celo do nestabilne regulacije temperature.



Slika 2: Karakteristike toplotnega izmenjevalnika v odvisnosti od temperaturnega izkoristka  $\eta$  [5]

## 2.2 Regulacijski ventil

Z regulacijskimi ventili uravnavamo pretoke tekočin in kompenziramo motnje v sistemu, da obdržimo regulirane veličine čim bližje želene vrednosti. Pri podpostajah za pripravo tople sanitarne vode daljinskega ogrevanja regulacijski ventil nadzira pretok vode in kompenzira motnje v obliki porabe (umivanje rok, tuširanje itd.), da je temperatura vode  $T_{22}$  čim bolj konstantna in enaka svoji željeni vrednosti.

V nadaljevanju bodo obravnavani dvopotni regulacijski ventili, ki so namenjeni manipulaciji pretoka vode z odpiranjem in zapiranjem, kar pomeni,

da lahko spreminjajo masni pretok vode. Dvopotni ventili imajo en vhod in en izhod in so v omrežjih daljinskega ogrevanja najbolj razširjeni.

Za pravilno izbiro regulacijskega ventila za toplotno podpostajo moramo izračunati potreben karakterističen pretok oz. pretočno število ventila  $K_v$ . Pretok skozi popolnoma odprt ventil v kubičnih metrih na uro [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] pri 1 baru razlike med tlakoma na vhodu in izhodu ventila pa označujemo s  $K_{vs}$ . Podajo ga izdelovalci ventilov in pomeni indeks zmogljivosti ventila [6]. Glede na predhodno izračunan potreben pretok  $K_v$  pri znanem padcu tlaka na ventilu ga uporabljamo pri izbiri ventila. Ponavadi izberemo ventil z višjo vrednostjo  $K_{vs}$ , kot je naša izračunana vrednost  $K_v$ , zato je takšen ventil predimenzioniran in pri uporabi ne deluje v popolnoma odprtih legah.

Zaradi različnih oblik krožnika in sedeža ventila ter zaradi omejene natančnosti njihove mehanske obdelave ima vsak ventil omejene zmožnosti reguliranja pretoka v zaprtih legah. Izdelovalci ventilov podajajo minimalen pretok, ki ga je ventil še sposoben regulirati, s t. i. regulacijskim razmerjem  $R$ , ki nam pove, kolikšen del hoda ventila je uporaben za regulacijo pretoka oz. kakšno je območje regulacije pretoka. Regulacijsko razmerje  $R$  je definirano kot razmerje med vrednostjo  $K_{vs}$  in minimalno vrednostjo pretoka  $K_{vr}$ , ki ga je ventil sposoben regulirati pri padcu tlaka za 1 bar. Višje kot je regulacijsko razmerje, bolj natančno lahko reguliramo pretok z ventilom v zaprtih legah, kar je zelo pomembno v sistemih, kjer je ventil predimenzioniran in je delovna točka pogosto blizu zaprte lege ventila.

Odvisnost prostorninskega pretoka skozi ventil  $Q$  od hoda ventila  $s$  narekuje enačba:

$$Q = K_v \cdot f(s) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{G}} \quad (3)$$

Poleg pretočnega števila ventila  $K_v$  in padca tlaka na ventilu  $\Delta p$  v njej nastopata še  $G$  kot relativna gostota medija (v našem primeru vode znaša 1) in funkcijska odvisnost od hoda ventila  $f(s)$ . Regulacijski ventili se namreč med seboj razlikujejo tudi po karakteristikah pretoka vode v odvisnosti od odprtosti oz. hoda ventila. Najpogosteje srečamo logaritemsko, linearno in eksponentno karakteristiko; njihov vpliv na regulacijo temperature sanitarne vode bo raziskan v nadaljevanju prispevka. Funkcijsko odvisnost  $f(s)$  za logaritemsko karakteristiko zapišemo v odvisnosti od regulacijskega razmerja  $R$  in hoda ventila  $s$  kot [7]:

$$f(s) = R^{s-1} \quad (4)$$

Pri linearni karakteristiki velja preprosta relacija:

$$f(s) = s \quad (5)$$

Pri eksponentni karakteristiki nastopa še parameter ventila  $a$ :

$$f(s) = s^{1/a} \quad (6)$$

Regulacijski ventili z logaritemsko karakteristiko imajo ponavadi dolge hode, zato je pri njih treba uporabljati zelo hitre (in posledično dražje) pogone, če želimo doseči sprejemljive regulacijske čase. Razviti pa so bili tudi regulacijski ventili s tako imenovano deljeno karakteristiko, ki je sestavljena iz dveh linearnih karakteristik in izkazuje pri nižjih hodih manjše, pri višjih hodih pa večje ojačenje. Takšni ventili zaradi svojih kratkih hodov omogočajo uporabo cenejših pogonov.

Primeri različnih tipov karakteristik v odvisnosti od nekaterih parametrov so prikazani na sliki 3.

Navedene karakteristike regulacijskih ventilov pa veljajo le, če je diferencialni tlak na ventilu enak pri vseh vrednostih hoda ventila  $s$ . Pri bolj priprtem ventilu se namreč tlačni padec na ventilu poveča in dejanski pretok posledično odstopa od tistega, ki ga izračunamo po enačbi (3). Na dogajanje namreč vpliva t. i. avtoriteta ventila  $V_a$ :

$$V_a = \frac{\Delta p_{100\%}}{\Delta p_{100\%} + \Delta p_{sist}} \quad (7)$$

kjer je  $\Delta p_{100\%}$  diferencialni tlak na ventilu, ko je le-ta popolnoma odprt,  $\Delta p_{sist}$  pa diferencialni tlak preostalega sistema (toplotni izmenjevalnik, cevi itd.). Pretočna oz. vgrajena karakteristika ventila se potem z vplivom avtoritete ventila izraža kot [9]:

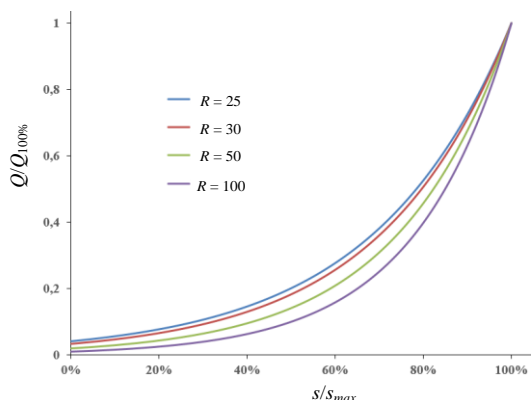
$$Q = f(s) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{1 - (1/K_v^2 + 1) \cdot V_a}} \quad (8)$$

V idealnih razmerah bi bila avtoriteta ventila enaka 1; temu se lahko približamo z vgradnjo regulatorja diferencialnega tlaka. V nasprotnem primeru lahko vgrajena karakteristika ventila po obliki precej odstopa od idealne.

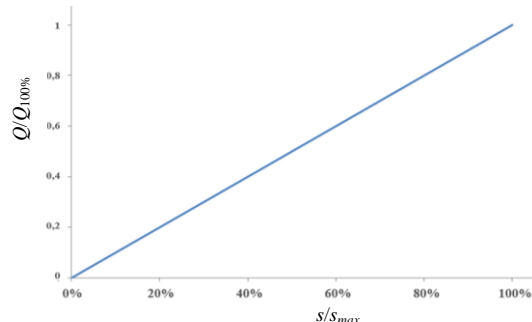
### 2.3 Pogon regulacijskega ventila

Za pogon (odpiranje in zapiranje) regulacijskih ventilov se uporabljajo večinoma električni motorji – sinhronski s trajnimi magneti ali pa elektronsko komutirani enosmerni motorji. Pri tem ločimo:

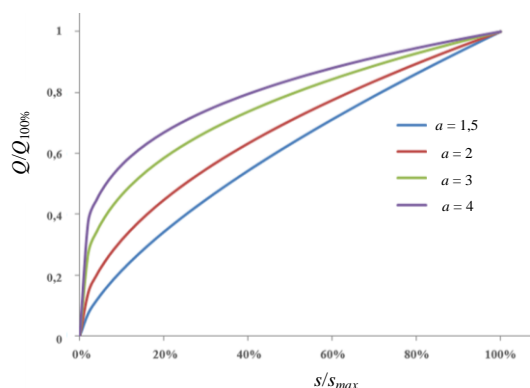
a) Tritočkovne pogone, kjer z ustreznima logičnima krmilnima signaloma odpiramo ali zapiramo ventil; kadar sta signala na logični "0", mora motor mirovati in s svojim zadržnim navorom ohranjati pozicijo ne glede na spremembe tlaka na ventilu.



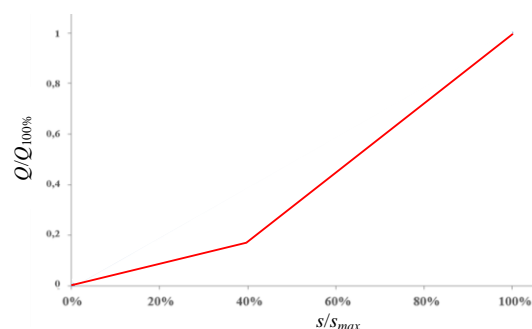
a) Logaritemska karakteristika ventila



b) Linearna karakteristika ventila



c) Eksponentna karakteristika ventila



d) Deljena karakteristika ventila

Slika 3: Karakteristike regulacijskih ventilov – odvisnost pretoka  $Q$  od hoda ventila  $s$ 

b) Modulacijske pogone, kjer z analognim signalom določamo želeno pozicijo pogona oz. ventila.

Modulacijski pogoni so zaradi povratne informacije o trenutni poziciji bistveno natančnejši, a je njihova izvedba dražja, prav tako pa so bolj dovzetni za elektromagnetne motnje.

### 3 SIMULACIJSKI MODEL PODPOSTAJE

Simulacijski model podpostaje za pripravo tople sanitarne vode je bil izdelan z orodjem Matlab Simulink. Model (slika 4) dovolj natančno popisuje komponente podpostaje za pripravo tople sanitarne vode, da je primeren za analizo dinamičnega obnašanja regulacije temperature na sekundarni strani toplotnega izmenjevalnika  $T_{22}$ , pri čemer omogoča eksperimentiranje z različnimi karakteristikami regulacijskih ventilov.

Uporabljen je bil Danfossov model ECL PI-regulatorja, katerega vhoda sta želena vrednost ( $T_{22}^*$ ) in dejanska vrednost temperature ( $T_{22}$ ) in ki omogoča nastavitve ojačenja  $K_p$ , integracijske časovne konstante  $T_i$ , časa, ki ga pogon potrebuje za celoten hod ventila  $T_{rum}$ , in širine mrtve cone  $N_z$  za temperaturo  $T_{22}$ .

Pri tritočkovnem elektromotorskem pogonu regulacijskega ventila je mogoče izbrati kataloško hitrost uporabljenega pogona. Histereza pogona, ki nastopi zaradi zračnosti med zobniki ob spremembi smeri vrtenja, je v našem primeru zanemarljiva.

Regulacijski ventil bi lahko modelirali po enačbah (3)–(6), ker pa obstajajo tudi ventili z deljenimi karakteristikami, dobimo realnejšo sliko z uporabo izmerjenih in tabelarično podanih karakteristik ventilov. V simulacijskem modelu je predpostavljena uporaba regulatorja diferencialnega tlaka na ventilu – posledično je na ventilu vzdrževan konstanten tlak ne glede na odprtost ventila. V nasprotnem primeru bi učinek avtoritete ventila močno popačil njegovo karakteristiko.

Model toplotnega izmenjevalnika je zastavljen po Perssonu [9] in temelji na energetskem ravnotežju med primarno (vročo) in sekundarno (hladno) stranjo, vključujoč prenos toplote skozi stene med njima. Zanemarjena je toplotna upornost sten toplotnega izmenjevalnika, prav tako tudi toplotne izgube toplotnega izmenjevalnika v okolico, saj proizvajalci toplotnih podpostaj večino toplotnih izmenjevalnikov izolirajo. Določiti oz. nastaviti moramo še porabniško motnjo (porabo) na sekundarni strani toplotnega izmenjevalnika  $Q_2$ , temperaturo dovoda v toplotni izmenjevalnik  $T_{11}$  in temperaturo povratka  $T_{21}$  v toplotni izmenjevalnik na sekundarni strani (slika 1). Izhoda toplotnega izmenjevalnika sta temperatura povratka na primarni strani  $T_{12}$  in regulirana temperatura  $T_{22}$  na sekundarni strani.

Temperaturni senzor smo ponazorili s členom 1. reda in pripadajočo časovno konstanto.

#### 4 REZULTATI

Preden predstavimo rezultate simulacij delovanja podpostaje za pripravo tople sanitarne vode, si oglejmo regulacijske zahteve pri pripravi tople sanitarne vode, kakršne je podalo finsko združenje daljinskega ogrevanja [10]:

- Statični pogrešek temperature sanitarne vode na porabniški strani  $T_{22}$  mora biti manjši od 2 K.
- Najvišja dopustna amplituda oscilacij temperature sanitarne vode na porabniški strani  $T_{22}$  je  $\pm 2$  K.
- Med obratovanjem toplotne podpostaje prenehaj oz. dinamični pogrešek temperature sanitarne vode na porabniški strani  $T_{22}$  ne sme preseči 10 K.
- Najdaljši regulacijski čas po spremembi obremenitve mora biti krajši od 120 s. Regulacijski čas je čas, ki ga potrebuje temperatura  $T_{22}$ , da se ustali v razponu  $\pm 2$  K odstopanja od zelene vrednosti.

Najprej smo proučili obnašanje podpostaje ob uporabi regulacijskih ventilov z različnimi karakteristikami: logaritemsko, deljeno in linearno. Podatki, uporabljeni pri simulacijah, so zbrani v tabeli 1, izbrano maksimalno pretočno število ventila  $K_{vs}$  je bilo  $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Na sliki 5 so prikazani rezultati za primer, ko je uporabljen relativno počasen pogon regulacijskega ventila s hitrostjo hoda  $v^{-1} = 8 \text{ s/mm}$  (hitrosti pogonov ventilov se v praksi navajajo v sekundah, ki jih potrebuje ventil, da opravi hod 1 mm). Začetna vrednost pretoka  $Q_2$  na porabniški strani znaša  $360 \text{ l/h}$  in se 100 sekund po začetku opazovanja poveča na  $720 \text{ l/h}$ , po 300 sekundah pa spet upade na  $360 \text{ l/h}$ . Čeprav so prehodni pojavi temperature  $T_{22}$  dokaj počasni, je ob povečanju odjema tople vode dinamični pogrešek pri vseh karakteristikah ventilov večji od dopustnih 10 K; doseženi statični pogreški so praktično zanemarljivi. Pri ventilu z linearno karakteristiko je presežena mejna vrednost regulacijskega časa 120 s, pri ventilu z deljeno karakteristiko smo blizu te meje, najboljši odziv pa dosežemo z ventilom z logaritemsko karakteristiko.

Uporaba pogona z višjo hitrostjo  $v^{-1} = 3 \text{ s/mm}$  privede do krajših regulacijskih časov (slika 6), ki so za vse tri karakteristike ventilov v predpisanih okvirih.

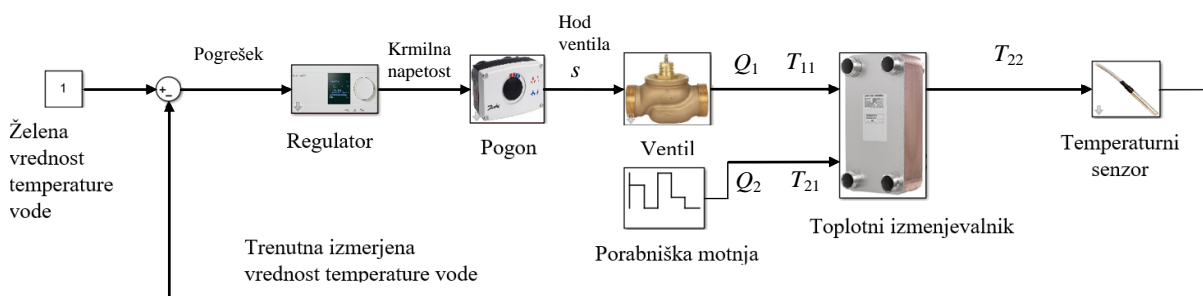
Prenihaji temperature  $T_{22}$  so zelo blizu dovoljenih 10 K, zanimiv pa je majhen podnihaj, ki sledi temperaturnemu prenehaju ob zmanjšanju odjema tople vode. Opaziti je statične pogreške, ki pa so v okviru predpisanih 2 K. Tudi pri tej hitrosti pogona se najbolje izkaže ventil z logaritemsko karakteristiko.

Tabela 1: Parametri toplotne podpostaje pri analizi različnih karakteristik regulacijskih ventilov

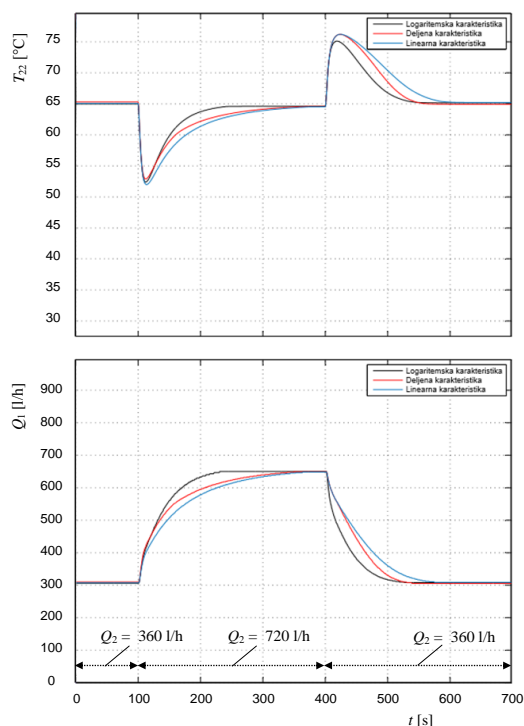
Ime parametra	Simbol	Vrednost
Kapaciteta toplotnega izmenjevalnika	$P$	100 kW
Tlačni padec na ventilu	$\Delta p$	1 bar
Hod ventila	$s$	5 mm
Želena temperatura	$T_{22}$	65 °C
Amplituda spremembe porabniške motnje	$Q_2$	360 l/h
Trajanje porabniške motnje	$t$	300 s
Temperatura dovoda primarne strani	$T_{11}$	80 °C
Temperatura dovoda sekundarne strani	$T_{21}$	20 °C
Časovna konstanta temperaturnega senzorja	$\tau$	1,5 s

Še hitrejši pogon s hitrostjo  $v^{-1} = 1 \text{ s/mm}$  dodatno skrajša regulacijske čase in zmanjša prenehaje (slika 7). Ob uporabi ventila z deljeno karakteristiko pri manjšem odjemu zaznamo oscilacije temperature  $T_{22}$  z amplitudo  $\pm 0,6 \text{ K}$  (kar je še dopustno), ki prenehajo ob povečanju odjema. Ta pojav mejnega nihanja je značilen za nelinearne sisteme in je posledica višjega systemskega ojačenja pri nižjih potrebah po toploti oz. manjših pretokih (slika 2).

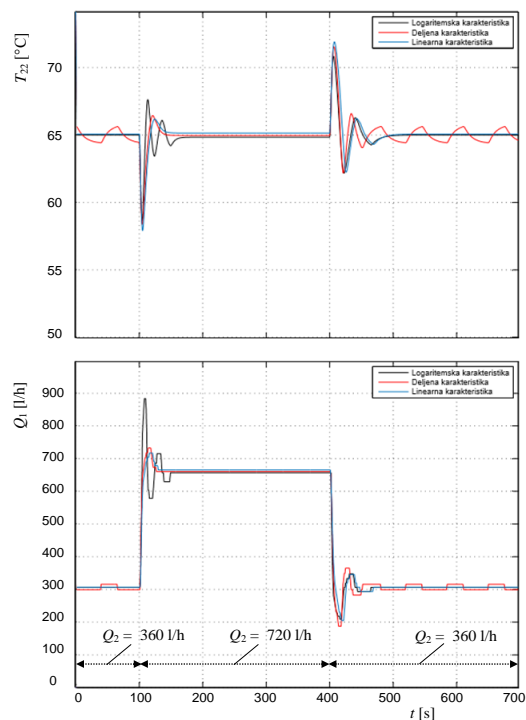
Načrtovalci toplotnih podpostaj ponavadi izračunavajo potrebne parametre podpostaje in njenih komponent za najzahtevnejše zimske razmere, zato so tudi pozimi izbrane komponente za večino časa obratovanja predimenzionirane. Pojasnili smo že, da mora biti maksimalno pretočno število izbranega regulacijskega ventila  $K_{vs}$  večje od preračunanega potrebnega pretočnega števila  $K_v$ , pogosto pa se zgodi, da ima izbrani ventil maksimalno pretočno število tudi do 6-krat večje od potrebnega. Posledično ventil večino časa deluje v bolj priprtih legah, pri čemer je uporaben hod ventila krajši, kar seveda vpliva na natančnost regulacije pretoka skozi ventil.



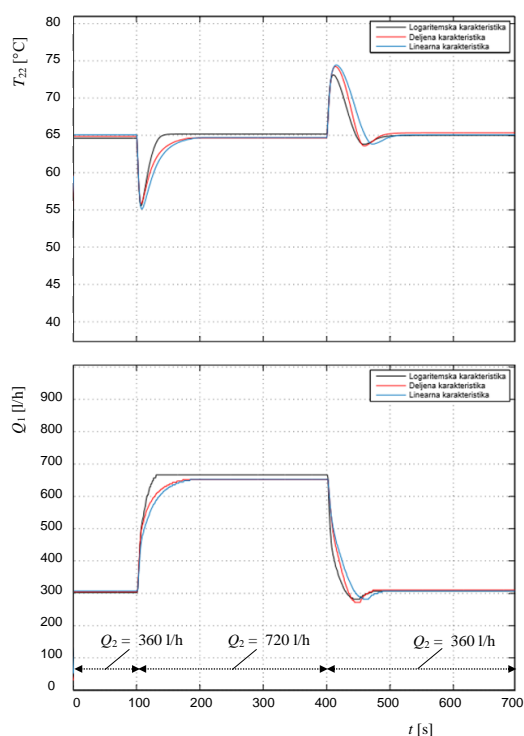
Slika 4: Simulacijska shema regulacije temperature na toplotni podpostaji za pripravo tople sanitarne vode



Slika 5: Odziv temperature  $T_{22}$  in pretoka  $Q_1$  na spremembo pretoka na porabniški strani  $Q_2$  za različne karakteristike regulacijskih ventilov pri hitrosti pogona 8 s/mm



Slika 7: Odziv temperature  $T_{22}$  in pretoka  $Q_1$  na spremembo pretoka na porabniški strani  $Q_2$  za različne karakteristike regulacijskih ventilov pri hitrosti pogona 1 s/mm

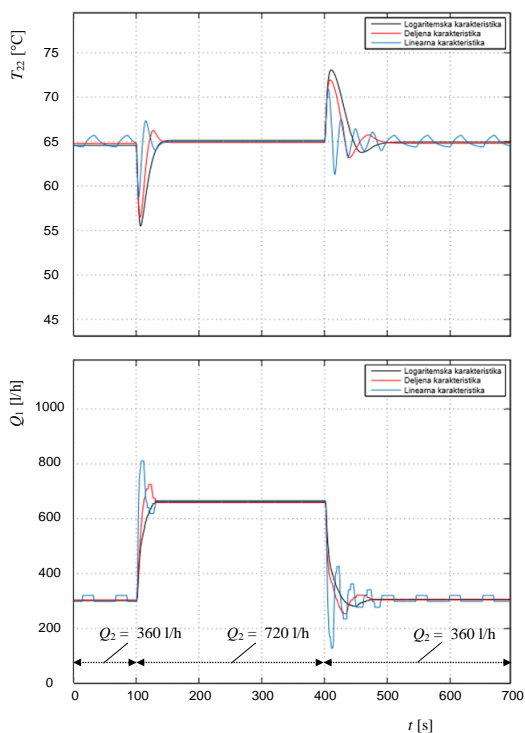


Slika 6: Odziv temperature  $T_{22}$  in pretoka  $Q_1$  na spremembo pretoka na porabniški strani  $Q_2$  za različne karakteristike regulacijskih ventilov pri hitrosti pogona 3 s/mm

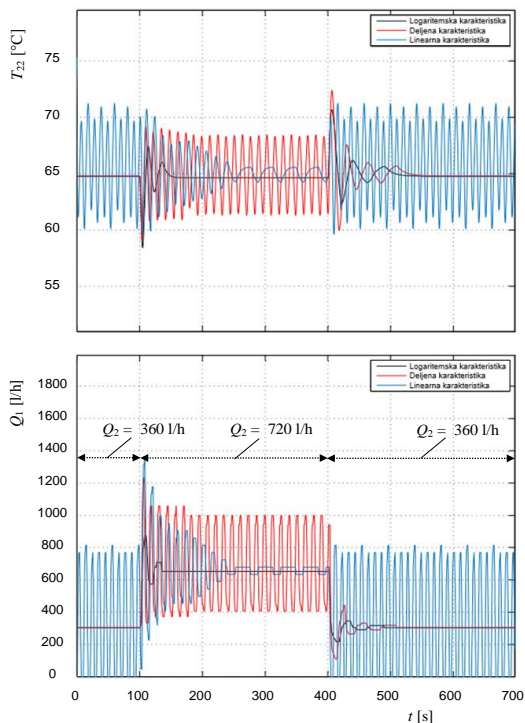
V nadaljevanju so prikazani odzivi sistema s podatki iz tabele 1 in izbranim maksimalnim pretočnim številom  $K_{vs} = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ , kar pomeni, da je takšen ventil 5,6-krat predimenzioniran glede na potrebe ( $1,43 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Pri nižji hitrosti pogona ( $v^{-1} = 3 \text{ s/mm}$ ) so za vse karakteristike ventilov regulacijski časi relativno kratki in prenehajo temperature  $T_{22}$  v dovoljenih okvirih (slika 8). Pri ventilu z linearno karakteristiko se pri manjšem odjemu pojavi še sprejemljivo nihanje temperature  $T_{22}$  (amplituda  $\pm 0,7 \text{ K}$ ), ker izkazuje sistem pri nižji odprtosti ventila z linearno karakteristiko višje ojačenje. Vpliv predimenzioniranega ventila ob enakih drugih okoliščinah lahko razberemo, če primerjamo sliko 8 s sliko 6.

Višja hitrost pogona ( $v^{-1} = 3 \text{ s/mm}$ ) ob majhnem odjemu pri ventilu z linearno karakteristiko povzroči občutno nihanje temperature  $T_{22}$ , ki z amplitudo  $\pm 6 \text{ K}$  presega predpisano mejo (slika 9). Amplituda tega nihanja se občutno zmanjša ob povečanju odjema, prav tako frekvenca, ker je ojačenje toplotnega izmenjevalnika in s tem tudi sistemsko ojačenje pri večjih pretokih manjše. Ventil z deljeno karakteristiko pri majhnem odjemu izkazuje stabilno obnašanje, pri povečanem odjemu pa zaoscilira z amplitudo  $\pm 3,5 \text{ K}$ . To se zgodi zaradi obratovanja v okolici prevojnne točke deljene karakteristike (slika 3d); v desni okolici te točke ima namreč sistem ob višji hitrosti pogona, ki prispeva k skupnemu ojačenju, pri višjih odprtostih ventila višje ojačenje kot v njeni levi okolici.



Slika 8: Odziv temperature  $T_{22}$  in pretoka  $Q_1$  na spremembo pretoka na porabniški strani  $Q_2$  za različne karakteristike predimenzioniranih regulacijskih ventilov pri hitrosti pogona 3 s/mm



Slika 9: Odziv temperature  $T_{22}$  in pretoka  $Q_1$  na spremembo pretoka na porabniški strani  $Q_2$  za različne karakteristike predimenzioniranih regulacijskih ventilov pri hitrosti pogona 1 s/mm

Pri pogonu z višjo hitrostjo edino ventil z logaritemsko karakteristiko izkazuje sprejemljive prehodne pojave in stabilno stacionarno stanje ne glede na intenziteto odjema tople vode. Vpliv predimenzioniranega ventila vidimo, če odzive s slike 9 primerjamo s tistimi s slike 7.

## 5 SKLEP

Pri nastavljanju podpostaj daljinskega ogrevanja za pripravo tople sanitarne vode nemalokrat nastanejo težave, da regulacija temperature tople sanitarne vode ne dosega zahtevanih parametrov – regulacijskega časa, prenehaja temperature in temperaturnih oscilacij. Do teh težav lahko privedejo različni vzroki, a pogosto so posledica napačne izbire karakteristike regulacijskega ventila. Simulacijski rezultati regulacije tople sanitarne vode, ki so predstavljeni v tem prispevku, takšno tezo potrjujejo. Izkaže se, da je pri uporabi predimenzioniranega regulacijskega ventila zelo dobra rešitev izbira ventila z logaritemsko karakteristiko, ki najboljše delovanje doseže v kombinaciji s hitrimi pogoni. Ker imajo ventili z logaritemsko karakteristiko v realnosti daljše hode kot ventili z linearno ali deljeno karakteristiko, namreč potrebujemo hitrejša pogona, ki pa so dražji. A takšne investicije v vseh primerih ne moremo upravičiti.

Če izhajamo iz teorije linearnega prenosa toplote, kjer poskušamo medsebojno kompenzirati nelinearnosti statičnih karakteristik regulacijskega ventila in toplotnega izmenjevalnika, se cenovno sprejemljivejša rešitev kaže z uporabo ventila z deljeno karakteristiko, ki zaradi svojega krajšega hoda ne potrebuje zelo hitrega pogona. Kljub temu lahko pri takšnem ventilu zaznamo prevelika nihanja temperature tople sanitarne vode, kadar delujemo v okolici prevojnne točke ventilov karakteristike, kar se zgodi zaradi predimenzioniranosti ventila.

S pridobljenimi praktičnimi izkušnjami z obstoječih toplotnih podpostaj lahko okvirno potrdimo ugotovitve, do katerih smo prišli s pomočjo simulacij. Natančno verifikacijo simulacijskih ugotovitev bi seveda dosegli z meritvami na laboratorijski toplotni podpostaji. Zanimivo pa bo raziskati tudi, kako na regulacijo tople sanitarne vode v povezavi s hitrostjo pogona regulacijskega ventila in njegovo karakteristiko vplivajo še nekatere druge komponente toplotnih podpostaj, kot so npr. temperaturni senzori, njihova namestitvev in dinamika.

## LITERATURA

- [1] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, B. V. Mathiesen: "4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems", Elsevier Energy, Vol. 68, pp. 1–11, 15 April 2014.
- [2] heating.danfoss.com [Elektronski], [21.08.2017].



- [3] A. Benonysson, H. Boysen: "Optimum control of heat exchangers", 5th International Symposium on Automation of District Heating systems, . Otaniemi, Finska, 1999.
- [4] W. Betschart: *Hydronics in Building Technology: Efficient Heating and Cooling*, Faktor Verlag AG, Zürich, 2016.
- [5] A. Benonysson, H. Boysen: "Valve characteristics for motorized valves in district heating substations", Euroheat & Power International, p. 3, 7/8 1999.
- [6] A. Senegačnik, V. Butala, B. Drobnič, U. Stritih: Gradivo za predavanja pri predmetu Raba energije, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. [lab.fs.uni-lj.si/kes/raba\\_energije/re-predavanje-06.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/kes/raba_energije/re-predavanje-06.pdf) [Elektronski] [21.08.2017].
- [7] *Control Valve Handbook*, Fisher Controls International Inc., Marshalltown, Iowa, U.S.A., 2001.
- [8] A. Cjuha, P. Matičič, J. Torkar, B. Koren, M. Bobič, D. Vnučec: "Učinkovito načrtovanje in upravljanje toplotnih postaj", Slovensko društvo za daljinsko energetiko, Mednarodna konferenca daljinske energetike, Portorož, 2010.
- [9] T. Persson: "District Heating for Residential Areas with Single-Family Housing with Special Emphasis on Domestic Hot Water Comfort", Division of Energy Economics and Planning, Department of Heat and Power Engineering, Lund University, Lund, 2005.
- [10] *District heating in buildings - requirements and instructions*, Finish District Heating Association, Helsinki, 1992.

**Sandro Terzić** je diplomiral leta 2016 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je v podjetju Danfoss Trata, kjer je odgovoren za razvoj portfelja regulatorjev diferencialnega tlaka, regulacijskih ventilov in njihovih pogonov za aplikacije daljinskega ogrevanja in hlajenja.

**David Nedeljković** je diplomiral leta 1991, magistriral leta 1996 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je kot profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 2008 tudi prodekan za finančne zadeve. Ukvarja se s problematiko digitalnega procesiranja na področju naprav močnostne elektronike in elektromotorskih pogonov.