

*Originalan naučni rad*

*UDC: 536.7:621.1*

## OPTIMALNI INTERVALI RADA TOPLOTNE MREŽE GEOTERMALNOG TOPLIFIKACIONOG SISTEMA

Veljko V. Đuričković<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Termotehnika-invest d.o.o. Banja Luka, e-mail: [termotehnika-invest@blic.net](mailto:termotehnika-invest@blic.net)*

### REZIME

Pravilno projektovana toplotna mreža podrazumijeva da svaka njena dionica radi u optimalnom području, to jest, da su ukupni troškovi svake dionice (investicioni i pogonski) minimalni. Da bi se projektnom dokumentacijom to obezbijedilo, projektant bi trebao da ima informaciju o osnovnim zavisnostima između opterećenja dionice, njenog promjera i troškova. Pri tome treba imati u vidu da je geotermalni toplifikacioni sistem, u poređenju sa klasičnim toplifikacionim sistemom, specifičan, kako po obezbijeđenju toplotne energije, tako i po njenom tretmanu, načinu rada, transportu, distribuciji i korištenju. U radu je izložena metoda određivanja optimalnih intervala rada mreže geotermalnog toplifikacionog sistema.

Ključne riječi: *geotermalni toplifikacioni sistem, optimalni intervali rada, toplotna mreža, investicioni troškovi, pogonski troškovi.*

## OPTIMAL INTERVALS OF GEOTHERMAL PIPE-LINE OF DISTRICT HEATING SYSTEM OPERATION

### ABSTRACT

Correct design of district heating network requires that each of its segments operates in optimal working interval, meaning that total costs of each segment (investment and operational costs) are minimal. In order to accomplish that, the designer needs to obtain all information regarding main dependences between segment load, its diameter and costs. Also, geothermal district heating system differs from traditional district heating system by source of heating energy, its treatment, transport, distribution and use. This article explains the methodology how to determine the optimal working interval of geothermal network heating system.

Key words: *geothermal district heating system, optimal working interval, investment costs, operational costs.*

### UVOD

Klasični vrelovodni sistem gradskog grijanja se stalno povećava jer sistem mora da prati razvoj grada razvojem distributivne mreže i odgovarajućim povećavanjem toplotnog kapaciteta toplotnog izvora. Radi toga je nemoguće za ovakav toplifikacioni sistem odrediti optimalne uslove pogona toplotne mreže za nekoliko godina unaprijed. Međutim, geotermalni toplifikacioni sistem je vezan na geotermalnu bušotinu čiji je kapacitet konstantan, radi čega se opterećenje toplotne mreže takvog

sistema ne mijenja. Radi toga je moguće pravilnim definisanjem tehničko-ekonomskog modela obezbijediti da toplotna mreža takvog sistema radi u optimalnim uslovima pogona dugi niz godina. Upravo radi toga je optimizacija transportne i distributivne mreže ovakvih sistema veoma važna.

## ANALIZA TROŠKOVA

Ukupni troškovi izgradnje i održavanja toplotne mreže, izraženi specifično, su dati sumom:

$$T_{UK} = T_M + T_P + T_Q, \quad \text{€/m god MW} \quad (1)$$

u kojoj su sa  $T_M$  označeni investicioni troškovi izgradnje mreže, sa  $T_P$  troškovi izgradnje i održavanja cirkulacionih pumpi te sa  $T_Q$  troškovi za pokriće toplotnih gubitaka u mreži.

## TROŠKOVI IZGRADNJE MREŽE

Danas se toplotne mreže grade fabrički predizolovanim cijevima proizvedenim prema evropskim normama EN 253, EN 448, EN 489. Cijevi se polažu direktno u zemlju, bez betonskih kanala. Specifična cijena trase izgrađena na ovakav način može se zapisati, prema katalogu proizvođača izrazom:

$$I_M = A \cdot d + B, \quad \text{€/m} \quad (2)$$

u kojem je sa  $d$  označen unutrašnji promjer cijevi u m.

Pri toplotnom opterećenju mreže:

$$Q_M = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_v \cdot (t_R - t_P), \quad \text{MW} \quad (3)$$

moguće je specifične troškove njene izgradnje zapisati u obliku:

$$T_M = \frac{a \cdot I_M}{Q_M} = \frac{a \cdot (A \cdot d + B)}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_v \cdot (t_R - t_P)}, \quad \text{€/m} \cdot \text{god} \cdot \text{MW} \quad (4)$$

Kapacitet mreže je približno jednak kapacitetu geotermalne bušotine; kapacitet priključenih potrošača pri tome mora biti manji za vrijednost toplotnih gubitaka u mreži. U vezi s tim, pogledati na primjer, radove autora (1, 2, 3).

U izrazima (3), (4) и (5) sa  $A$  i  $B$  su označeni koeficijenti prema katalogu proizvođača cijevi I4I ( $A=1.300$ ,  $B= -20$ ), sa  $\dot{V}$  je označen protok vode na dionici u  $\text{m}^3/\text{s}$ , sa  $\rho$  specifična masa vode pri srednjoj temperaturi  $80^\circ\text{C}$ ,  $972 \text{ kg/m}^3$ , sa  $c_v$  specifična toplota vode,  $4.195 \text{ J/kgK}$ , sa  $t_R$  i  $t_P$  temperatura vode u polazu i povratu,  $90/70^\circ\text{C}$ , sa  $a$  troškovi servisiranja kredita te sa  $Q_M$  projektno toplotno opterećenje mreže u MW.

Uvrštavanjem numeričkih vrijednosti dobija se:

$$T_M = 1,226 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1.300 \cdot d - 20}{\dot{V}} = 1,594 \cdot \frac{d}{\dot{V}} - 0,0245 \cdot \frac{1}{\dot{V}} \quad \text{€/m} \cdot \text{god} \cdot \text{MW} \quad (5)$$

## TROŠKOVI IZGRADNJE PUMPNE STANICE I ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA POGON PUMPI

Prema formuli Aljtšulja, za strujanje sa velikim vrijednostima Reynolds-ovog broja, jedinični pad pritiska u ravnom dijelu cijevi se može zapisati izrazom, prema (5):

$$R = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 0,11 \cdot \left(\frac{k_e}{d}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot V}{d^2 \cdot \pi}\right)^2 \quad \text{Pa/m} \quad (6)$$

Sređivanjem gornjeg izraza dobije se vrijednost jediničnog pada pritiska:

$$R = 8,92 \cdot 10^{-2} \cdot k^{0,25} \cdot \rho \cdot \frac{\dot{V}^2}{d^{5,25}} \quad \text{Pa/m} \quad (7)$$

Za specifičnu masu vode  $\rho = 972 \text{ kg/m}^3$  i strujanje kroz čelične cijevi ( $k = 0,0005 \text{ m}$ ):

$$R = 12,965 \cdot \frac{\dot{V}^2}{d^{5,25}}, \quad \text{Pa/m} \quad (7.a)$$

S tim je određena i specifična snaga za pogon cirkulacionih pumpi |6I|:

$$N = \frac{\dot{V} \cdot R}{\eta_p} \cdot \frac{1 + \alpha}{Q_M} = \frac{\dot{V} \cdot R}{\eta_p} \cdot \frac{1 + \alpha}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_v \cdot (t_R - t_p)} \quad \text{MW/m} \cdot \text{MW} \quad (8)$$

Uvrštavanjem numeričkih vrijednosti dobije se:

$$N = 0,233 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\dot{V}^2}{d^{5,25}} \quad \text{MW/m} \cdot \text{MW} \quad (9)$$

S tim su određeni i specifični troškovi za pogon cirkulacione pumpe i investicioni troškovi za njenu izgradnju:

$$T_p = N \cdot (n \cdot c_{el} + a \cdot I_{PS}) = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot (n \cdot c_{el} + a \cdot I_{PS}) \cdot \frac{\dot{V}^2}{d^{5,25}} \quad (10)$$

Uvrštavanjem numeričkih vrijednosti za geotermalni sistem Bijeljine slijedi:

$$T_p = 0,06235 \cdot \frac{\dot{V}^2}{d^{5,25}} \quad \text{€} \cdot \text{m} \cdot \text{god} \cdot \text{MW} \quad (10.a)$$

U izrazu (6) sa  $k_e$  je označena apsolutna hrapavost cijevi, 0,0005 m, sa  $\alpha$  učešće lokalnih otpora u ukupnim otporima cjevovoda, 10% |2I|, sa  $\eta_p$  stepen djelovanja cirkulacione pumpe, 0,75, sa  $\rho$  specifična masa vode pri 80°C, 972 kg/m<sup>3</sup>, sa  $d$  unutrašnji promjer cijevi u m., sa  $n$  vrijeme rada pumpne stanice (186 dan/god·24 h/dan = 4.464 h/god), sa  $c_{el}$  cijena električne energije (sa PDV-om) za pogon cirkulacionih pumpi, 50,06 €/MWh, sa  $a$  troškovi servisiranja kredita te sa  $I_{PS}$  investiciona vrijednost cirkulacione pumpe i neophodne armature (geotermalne toplane):

|   |              |
|---|--------------|
| - ventil za ublažavanje buke 12"                                | 1.200,00 €   |
| - leptirasti ventil sa izolacijom 12"                           | 1.750,00 €   |
| - mjerač protoka  | 1.100,00 €   |
| - duga prirubnica, kom. 10x480=                                 | 4.800,00 €   |
| - građevinski objekat 42 m <sup>2</sup> x 400€/m <sup>2</sup> = | 16.800,00 €  |
| - pločasti izmjenjivač toplote, kom.3 x 6 MW x 19.770 =         | 355.860,00 € |
|   | -----        |
| Ukupno:   | 381.510,00 € |

## TROŠKOVI ZA POKRIĆE GUBITAKA TOPLOTE U MREŽI

Prema katalogu proizvođača cijevi I4I specifični gubitak toplote po dužnom metru trase cjevovoda, pri srednjoj temperaturi vode u sezoni grijanja (54,2<sup>0</sup>C), se može izraziti formulom:

$$q_{gub} = 68,5 \cdot d + 26,743. \text{ W/m} \quad (11)$$

u kojoj je promjer  $d$  izražen u metrima. S tim su toplotni gubici

$$\begin{aligned} Q_{gub} &= \frac{q_{gub} \cdot n}{Q_M} = (68,5 \cdot d + 26,743) \cdot \frac{n}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_v \cdot (t_R - t_P)} = \\ &= (374,95 \cdot \frac{d}{\dot{V}} + 146,386 \cdot \frac{1}{\dot{V}}) \cdot 10^{-5} \text{ MWh/m} \cdot \text{god} \cdot \text{MW} \end{aligned} \quad (12)$$

Troškovi za pokriće ovih gubitaka su sada jednaki:

$$\begin{aligned} T_Q &= Q_{gub} \cdot c_Q = (374,955 \cdot \frac{d}{\dot{V}} + 146,386 \cdot \frac{1}{\dot{V}}) \cdot c_Q \cdot 10^{-5} = \\ &= 0,265 \cdot \frac{d}{\dot{V}} + 0,104 \cdot \frac{1}{\dot{V}} \text{ €/m} \cdot \text{god} \cdot \text{MW} \end{aligned} \quad (13)$$

pri tome je sa  $c_Q$  označena cijena toplotne energije (sa PDV-om), 70,80 €/MWh. Cijene toplotne i električne energije su uzete iz završnog Izvještaja o poslovanju banjalučke toplane za 2008 godinu, uvećane za 10%. Uočljiv je izrazito nelogičan odnos između ovih cijena; cijena električne energije bi trebala biti bar tri puta veća od toplotne! O specifičnim problemima transporta tople vode na veće udaljenosti vidjeti u radovima autora (2, 5, 6):

## UKUPNI TROŠKOVI

Ukupni troškovi izgradnje i održavanja toplotne mreže geotermalnog toplifikacionog sistema dobiju se sabiranjem izraza (5), (10) i (13):

$$T_{UK} = 0,0623 \cdot \frac{\dot{V}^2}{d^{5,25}} + 1,859 \cdot \frac{d}{\dot{V}} + 0,0759 \cdot \frac{1}{\dot{V}} \text{ €/m} \cdot \text{god} \cdot \text{MW} \quad (14)$$

Izraz (14) predstavlja zavisnost osnovnih parametara toplotne mreže geotermalnog toplifikacionog sistema - protoka, promjera cjevovoda i ukupnih troškova. Ova zavisnost je prikazana na dijagramu sl.1.i trebala bi biti putokaz projektantu toplotnih mreža geotermalnih toplifikacionih sistema.

Iz dijagrama slijedi nekoliko važnih saznanja:

- optimalne tačke pogona dionica različitih promjera slijede hiperboličnu ovojniciu, što znači da se specifični troškovi pogona smanjuju porastom promjera cjevovoda,
- dionice većeg promjera imaju znatno veći interval optimalnog pogona; opterećenje takvih dionica se može povećati nekoliko puta, a da se pri tome radna tačka dionice ne pomjeri iz optimalnog područja. To znači da se pri povećavanju kapaciteta mreže intervencije trebaju vršiti uglavnom na dionicama manjih promjera.

- dionice manjih promjera su veoma osjetljive na promjenu opterećenja; već pri malom povećanju protoka, radna tačka dionice se pomjera izvan optimalnog područja. Ovo saznanje je veoma važno jer su to krajnje dionice u mreži i značajno doprinose ukupnom povećanju pritiska u mreži.

### OPTIMALNO PODRUČJE RADA MREŽE

Izraz (14) daje mogućnost da se analitički odredi optimalni protok svake dionice mreže:

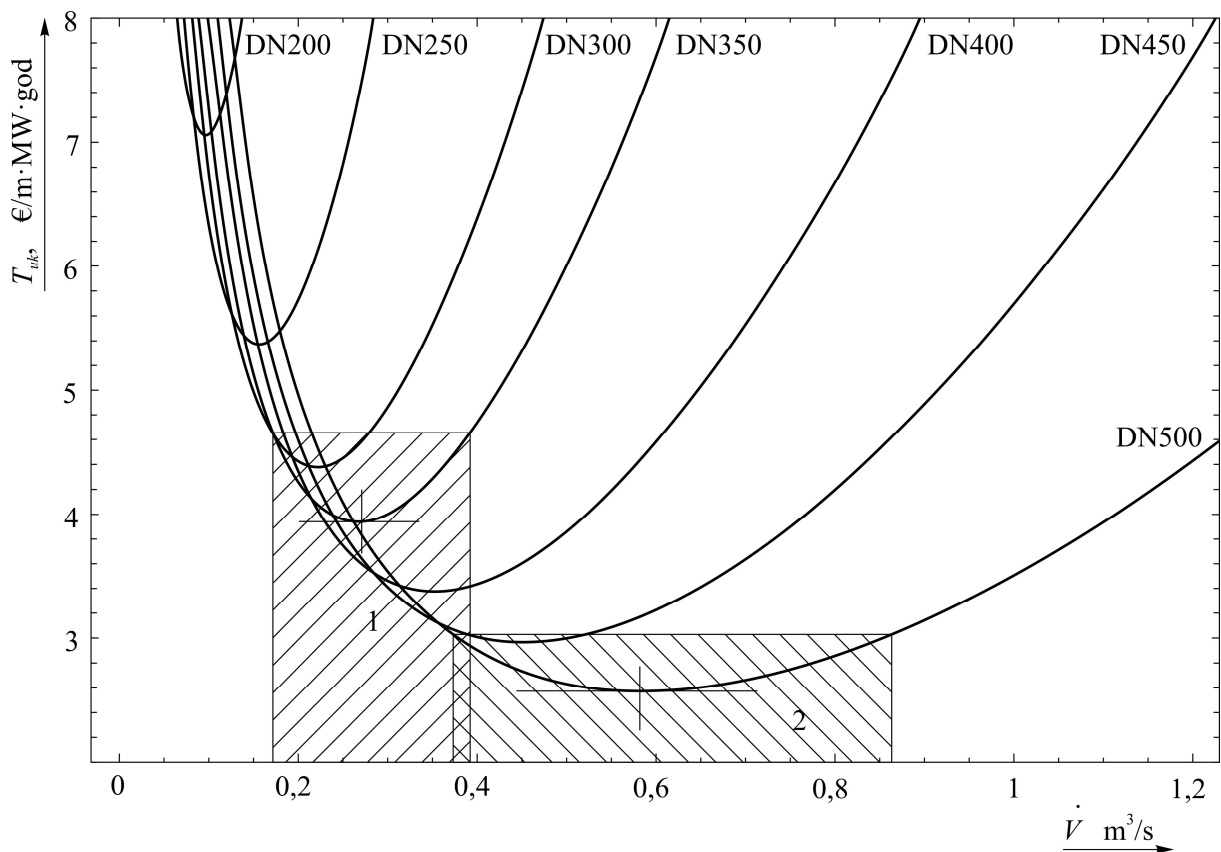
$$\frac{\partial T_{UK}}{\partial \dot{V}} = 0,1247 \cdot \frac{\dot{V}}{d^{5,25}} - 1,859 \cdot \frac{d}{\dot{V}^2} - 0,0795 \cdot \frac{1}{\dot{V}^2} = 0 \quad (15)$$

Iz izraza slijedi optimalni protok na dionici, to jest, protok pri kojem su ukupni troškovi minimalni:

$$\dot{V}_{opt} = (14,908 \cdot d^{6,25} + 0,6375 \cdot d^{5,25})^{1/3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (16)$$

a takođe i optimalna vrijednost brzine vode na dionici promjera d:

$$w_{opt} = (14,908 \cdot d^{0,25} + 0,6375 \cdot d^{-0,75})^{1/3} \text{ m/s} \quad (17)$$



Slika 1. Optimalni intervali rada mreže geotermalnog toplifikacionog sistema Bijeljine.  
 1, 2 – optimalno područje rada dionica DN350 i DN500.  
 Figure 1. Optimal intervals of Geothermal Pipe-line of District Heating System Operation.  
 1, 2 - Optimal Intervals of Shares DN350 and DN500.

ili jednostavnije po izrazu:

$$w_{opt} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{opt}}{\pi \cdot d^2} \quad \text{m/s} \quad (18)$$

Izrazi za optimalni protok i optimalnu brzinu, za dati promjer cijevi, (16) i (17), daju znatno veće vrijednosti (i do 30%) od onih koje naši projektanti usvajaju pri razradi projektnih rješenja. To je nesumljivo posljedica izrazito niske cijene električne energije utrošene za transport vode od bušotine do potrošača.

Dijagram na sl. 1 se koristi na slijedeći način: najprije se po izrazu (16) odredi optimalan protok na dionici datog promjera, a zatim po (14) ukupni troškovi te dionice u optimalnoj tački pogona. Ako se prihvati da se u toku eksploatacije mreže ukupni troškovi mogu povećati za 20% dobiće se optimalno područje rada dionice u intervalu ( $T_{uk} \div 1,2 \cdot T_{uk}$ ) (šrafirano područje na dijagramu). Vidi se da se povećavanjem promjera ovo područje povećava, uz istovremeno smanjenje specifičnih troškova.

## ZAKLJUČAK

Opterećenje toplotne mreže klasičnog toplifikacionog sistema se stalno mijenja radi potrebe da se razvojem toplifikacionog sistema prati razvoj grada. Radi toga se mora stalno povećavati kapacitet toplotnog izvora, a stim i veličina i opterećenje toplotne mreže. Radi toga tehničko-ekonomska optimizacija takvih mreža nije interesantna jer se njeni efekti izgube vrlo brzo, već nakon godinu-dvije od stavljanja u pogon.

Toplotna mreža geotermalnog toplifikacionog sistema radi sa konstantnim opterećenjem, jer se kapacitet bušotine ne mijenja. Radi toga je tehničko-ekonomska optimizacija takvih mreža veoma opravdana jer su njeni efekti prisutni tokom čitavog vremena eksploatacije sistema.

U radu je izložen model tehničko-ekonomske optimizacije, koji omogućava da se odredi optimalno područje dionica mreže različitih promjera, a takođe i da se za svaku dionicu odrede vrijednosti optimalnog protoka i optimalne brzine. Međutim, vrijednosti ulaznih podataka se vremenom mijenjaju (cijena energije, rada, opreme i drugih uticajnih parametara), pa bi trebalo povremeno ove podatke inovirati i postupak ponoviti u cilju kontrole radne tačke svake dionice u odnosu na optimalnu vrijednost.

## LITERATURA

1. Đuričković, V.: Maksimalne vrijednosti toplotnog bilansa toplifikacionog sistema. Termotehnika, 1-2 Beograd, 1985, s. 55-63
2. Đuričković, V.: Toplotne mreže. Univerzitetska knjiga. Banja Luka, 1987. s. 97.
3. Đuričković, V., Ištvanic Z.: Hidraulični proračun inženjerskih cijevnih mreža različitih temperaturnih režima rada. XIX Kongres o grejanju, hlađenju i klimatizaciji, Beograd, 1988. s. 85-101.
4. Đuričković, V.: Mathematical Approach to the Analysis of Many Years Change of Distric Heating System Heat Capacity. The Second World Congress on Heating, Ventilating, Refrigerating and Air Conditioning – CLIMA 2000. Sarajevo. 1989. Book: Heating Components and Systems. p. 187-192.
5. Đuričković, V.: Transport vode na veće udaljenosti. Novi pristup hidrauličnom proračunu. PROCESING. 95. Tivat 1995.
6. Katalog proizvođača cijevi BRUGG ROHRSYSTEME