

Jakub Murat, Adam Smyk, Rafał Laskowski, Politechnika Warszawska

Dobór optymalnej średnicy rurociągów sieci ciepłowniczej

Dobór średnic rurociągów dla nowoprojektowanych i podlegających modernizacji sieci ciepłowniczych jest istotny, gdyż pozwala obniżyć koszty przesyłania ciepła w krajowych systemach ciepłowniczych. W celu wyznaczenia optymalnych średnic rurociągów sieci ciepłowniczej o złożonej strukturze rozgałęźno-pierścieniowej, opracowano wielostopniowy algorytm optymalizacyjny.

Sieć ciepłownicza została przedstawiona w postaci grafów, a następnie zapisana w postaci macierzy, co umożliwiło automatyczne wykonywanie obliczeń hydraulicznych i ciepłno-bilansowych, dla dowolnej struktury sieci. W modelu uwzględniono opory hydrauliczne, równania ciepłno-bilansowe, nakłady inwestycyjne na odcinki sieci ciepłowniczej oraz koszty eksploatacyjne, w tym koszty strat przesyłania ciepła i pompowania wody sieciowej. Jako przykład działania programu przedstawiono w artykule obliczenia sprawdzające poprawność doboru średnic dla fragmentu istniejącej sieci ciepłowniczej w dużym systemie ciepłowniczym w Polsce. Artykuł jest kontynuacją i rozwinięciem problematyki poruszanej w [1-4].

Systemy scentralizowanego wytwarzania ciepła w krajach europejskich dostarczają od 10 do 90% zapotrzebowania na cele komunalne i technologiczne. W Polsce systemy ciepłownicze pokrywają zapotrzebowanie na ciepło ponad 40% mieszkańców kraju. Całkowita moc ciepłownicza tych systemów wynosi ok. 60 GW. Łączna długość sieci wchodzących w ich skład wynosi ponad 20 000 km, z czego 1700 km należy do największego w kraju systemu warszaw-

skiego. Koszty przesyłania ciepła stanowią istotną część (15-30%) kosztów loco odbiorca.

Przewymiarowanie rurociągów sieci ciepłowniczej oznacza większe koszty stałe, większe straty ciepła wynikające z większej powierzchni wymiany ciepła oraz mniejsze spadki ciśnień w odcinkach. Ustalenie zbyt małych średnic natomiast wprawdzie przynosi zmniejszenie kosztów stałych i kosztów strat ciepła, ale może skutkować pogorszeniem się jakości usług w postaci niedoborów ciśnień dyspozycyjnych w węzłach ciepłych odbiorców. Dlatego tak istotne jest prawidłowe określenie średnic rurociągów dla całej sieci ciepłowniczej.

W niektórych systemach sieci mają strukturę rozgałęźną, w innych złożoną strukturę rozgałęźno-pierścieniową. Odcinki domykające fragmenty sieci w pierścienie zwiększają wprawdzie nakłady inwestycyjne ponoszone na sieci, ale zdecydowanie zwiększają niezawodność zasilania odbiorców w ciepło i ograniczają skutki awarii sieci. Problem doboru średnic rurociągów sieci ciepłowniczej jest istotny dla każdego przedsiębiorstwa zajmującego się przesyłem i dystrybucją ciepła. Na bazie takich po-

treb, autorzy opracowali metodę optymalizacji średnic dla złożonego systemu rozgałęźno-pierścieniowego, stosowanego w wielu polskich i europejskich systemach ciepłowniczych [1-4]. W sensie numerycznym jest to zagadnienie optymalizacji z ograniczeniami równościowymi i nierównościowymi. Specyfika techniczna oznacza potrzebę wyznaczenia oporów hydraulicznych, strat ciepła i strumienia wody sieciowej we wszystkich odcinkach sieci ciepłowniczej. Do automatycznego wykonania tych obliczeń wykorzystano teorię grafów. Sieć ciepłownicza została przedstawiona w postaci grafów, a następnie zapisana w postaci trzech macierzy: macierzy incydencji, macierzy obwodów i macierzy cykli [5]. Nieliniowy algorytm optymalizacji z ograniczeniami rozwiązano przy pomocy SOLVERA programu Microsoft Excel. Program składał się z makr napisanych w języku Visual Basic umożliwiających połączenie obliczeń ciepłno-bilansowych z obliczeniami optymalizacyjnymi uwzględniającymi koszty inwestycyjne i koszty eksploatacyjne dla złożonej struktury sieci ciepłowniczej.

Zaprezentowane podejście, tj. połączenie obliczeń hydraulicznych i ciepłno-bilansowych z wykorzystaniem własno-

ści grafów i zagadnienia optymalizacji z ograniczeniami dla złożonej struktury sieci rozgałęźno-pierścieniowej, stanowią praktyczne rozwiązania ważnego zagadnienia w optymalizacji budowy i pracy systemów ciepłowniczych, które są i będą rozwijane w Europie [6].

■ Kryterium optymalizacji

Przy doborze optymalnej średnicy rurociągów sieci ciepłowniczej w układzie złożonym, tj. rozgałęźnym i pierścieniowym, pod uwagę brane są koszty całkowite przesyłania ciepła, w tym roczne koszty budowy i eksploatacji sieci [7-14]. Kryterium doboru dla tych układów jest minimum tychże kosztów, które stanowią sumę rocznych kosztów budowy i rocznych kosztów eksploatacyjnych dla wszystkich odcinków wchodzących w skład analizowanej sieci ciepłowniczej. Spełnienie tego kryterium jest równoznaczne z osiągnięciem minimum jednostkowych kosztów przesyłania ciepła, które są ilorazem rocznych kosztów całkowitych (stałych i eksploatacyjnych) i rocznej ilości sprzedawanego ciepła, zdyskontowanych w okresie n lat eksploatacji sieci [1, 2].

Zbiór optymalnych średnic rurociągów sieci ciepłowniczej to zbiór średnic wybranych z typoszeregu odpowiadający minimum kosztów przesyłania ciepła według zależności:

$$k_{gd} = \frac{\sum_{t=1}^n K_t \cdot a_t}{\sum_{t=1}^n A_t \cdot a_t} = \frac{\sum_{t=1}^n (K_A + K_F + K_O + K_P + K_S) \cdot a_t}{\sum_{t=1}^n A_t \cdot a_t} \Rightarrow \min \quad (1)$$

gdzie:

k_{gd} - jednostkowy zdyskontowany koszt przesyłania ciepła, PLN/GJ,

K_t - roczne koszty całkowite budowy i eksploatacji sieci w roku t , PLN/a,

A_t - ilość ciepła przesyłanego siecią w roku t , GJ/a,

a_t - współczynnik dyskontujący w roku t ,

n - liczba lat eksploatacji sieci.

Na roczne koszty eksploatacji systemu ciepłowniczego K składają się: roczne koszty inwestycyjne (amortyzacja) sieci K_A , roczne koszty finansowe

(obsługa kredytu) sieci K_F , roczne koszty operacyjne (bez amortyzacji i kosztów finansowych) K_O , roczne koszty pompowania wody sieciowej K_P i roczne koszty strat ciepła z sieci K_S .

Kryterium (1) odnosi się zarówno do złożonych układów sieci ciepłowniczej, jak również do układów prostych, tj. pojedynczych odcinków sieci. W przypadku rozgałęźnych i pierścieniowych układów sieci ciepłowniczej kryterium (1) musi być spełnione przy równoczesnym spełnieniu czterech następujących ograniczeń (2)-(5):

- nie przekraczania maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia w sieci ciepłowniczej występującego zwykle na wyjściu ze źródła ciepła (2),
- zapewnienie wymaganego minimalnego ciśnienia dyspozycyjnego we wszystkich węzłach ciepłych (3),
- zerowych wartości sumy spadków ciśnień w zamkniętych pierścieniach sieci (4),
- bilansowania się przepływów w rozgałęzieniach sieci, wynikającego z prawa zachowania masy (5).

$$p_{ECzi} = p_{ECp} + \Delta p_{zi} + \Delta p_{di} + \Delta p_{pi} \leq p_{max} \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, W_W \quad (2)$$

$$\Delta p_{di} \geq \Delta p_{dimin} \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, W_W \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{ni} \Delta p_j^i = 0 \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, S \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{ni} sign_j^i \cdot G_j^i = 0 \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, W_R \quad (5)$$

gdzie:

p_{ECzi} - ciśnienie na zasilaniu w źródle ciepła wynikające z przyjętego ciśnienia dyspozycyjnego i-tego węzła ciepłego i sumy spadków w sieci doprowadzającej ciepło do węzła, bar,

p_{ECp} - ciśnienie na powrocie w źródle ciepła, bar,

Δp_{zi} - spadek ciśnienia w rurociągach

zasilających od źródła ciepła do i-tego węzła ciepłego, bar,

Δp_{pdi} - ciśnienie dyspozycyjne i-tego węzła ciepłego, bar,

Δp_{ppi} - spadek ciśnienia na powrocie od i-tego węzła ciepłego do źródła ciepła, bar,

p_{max} - dopuszczalne maksymalne ciśnienie w systemie ciepłowniczym, bar,

Δp_{dimin} - wymagane minimalne ciśnienie dyspozycyjne i-tego węzła ciepłego, bar,

W_W - liczba węzłów ciepłych w sieci,

Δp_{ji} - spadek ciśnienia w j-tym odcinku należącym do i-tego pierścienia sieci, bar,

S - liczba zamkniętych pierścieni w sieci,

G_{ji} - j-ty przepływ związany z i-tym rozgałęzieniem sieci, kg/s,

$sign_j^i$ - znak j-tego przepływu dla i-tego rozgałęzienia: „+” dla wpływającego do rozgałęzienia lub „-” dla wyptywającego z rozgałęzienia,

W_R - liczba rozgałęzień w sieci,
 ni - liczba odcinków sieci w i-tym pierścieniu.

Zaproponowany proces optymalizacji sieci według kryterium (1) z ograniczeniami (2), (5), jest wielostopniowy [1], [2]. Jego realizację, uwzględniając zarówno postać matematyczną, jak i specyfikę struktury sieci ciepłowniczej, obrazują etapy E1-E5, a pełniejszy opis podany jest w dalszej części artykułu.

■ Algorytm optymalizacyjny

Ze względu na postać funkcji celu i ograniczenia oraz fakt, że optymalizacja może dotyczyć systemu istniejącego lub nowoprojektowanego - zastosowano wielostopniowy proces doboru optymalnych średnic sieci ciepłowniczej.

Optymalizacja wstępna (E1) przeprowadzana jest dla wszystkich odcinków sieci prócz odcinków pierścieniowych. Polega ona na wstępnym wyznaczeniu średnicy rurociągów dla każdego z tychże odcinków, tj. takiej średnicy, dla której jednostkowe kosz-

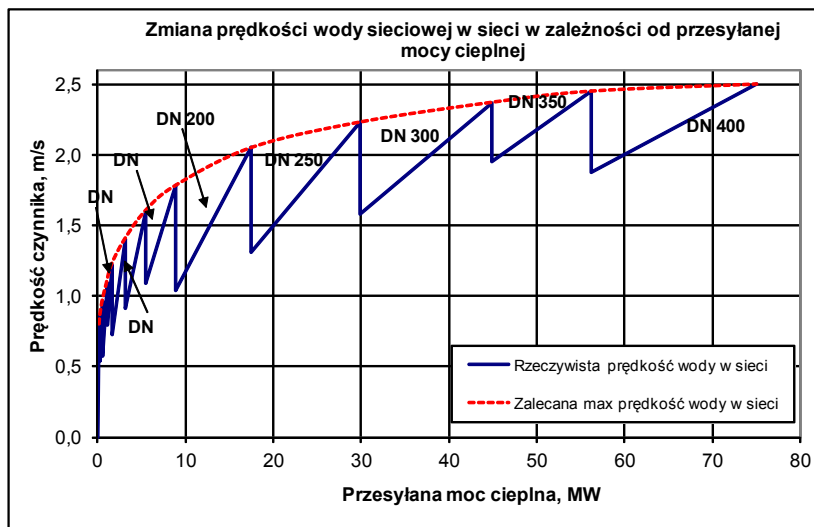
ty przesyłania ciepła są minimalne. W etapie tym nie są sprawdzane żadne z ograniczeń (2)-(5).

Zadaniem optymalizacji „prędkościowej” (E2) - rys. 1 jest sprawdzenie, czy prędkość przepływu czynnika przy wyznaczonej w poprzednim kroku średnicy rurociągów nie przekracza maksymalnej wartości prędkości dla tej średnicy stosowanej w projektowaniu sieci [2]. W przypadku gdy prędkość została przekroczona, średnica zostaje zwiększona o jedną, tj. na kolejną katalogową średnicę rurociągu. Prócz wspomnianych prędkości w tym etapie optymalizacji również nie sprawdza żadnego z ograniczeń.

Kolejnym krokiem algorytmu jest określenie średnicy odcinków pierścieniowych (E3). Użytkownik może wprowadzić wymagane wartości średnic tych odcinków (DEF) bądź zdefiniować je jako średnicę minimalną (MIN) lub maksymalną (MAX) spośród średnic sąsiednich odcinków sieci, tj. wszystkich odcinków, które zbiegają się w punktach początku i końca każdego z odcinków pierścieniowych. Takie postępowanie wynika z faktu, iż algorytm optymalizacyjny dąży do wyłączenia fragmentów sieci stanowiących pierścienie, gdyż kryterium ekonomiczne nie uwzględnia głównego celu ich budowy, którym jest zwiększenie pewności zasilania odbiorców.

W następnym etapie dotyczącym optymalizacji wybranych odcinków (E4) sprawdza się, czy przy średnicach tychże odcinków o jedną mniejszą niż określona dotychczas, jednostkowe koszty przesyłania ciepła są niższe niż dla średnic przed zmianą. Jeśli dla mniejszych średnic koszty są niższe oraz spełnione są wszystkie cztery ograniczenia, średnice te zostają przyjęte jako optymalne. Ten etap optymalizacji pozwala skorygować dobór średnic zrealizowany w etapie pierwszym i drugim z uwzględnieniem struktury sieci oraz ograniczeń.

Ostatnim etapem algorytmu jest optymalizacja wszystkich odcinków węzłowych (E5), tj. przyłączy do węzłów cieplnych. Średnica odcinka wę-



Rys. 1. Średnice rurociągów oraz zmiana prędkości przepływu w sieci w zależności od przesyłanej mocy przy doborze DN według zalecanych prędkości wody sieciowej, dla temperatur obliczeniowych wody sieciowej 120/60°C [7]



Rys. 2. Analizowany fragment systemu ciepłowniczego

złowego zostaje zmieniona w przypadku, gdy dla nowej średnicy rurociągu mniejszej niż dotychczas określonej jako optymalna, łączne roczne koszty sieci są mniejsze od dotychczasowych oraz ciśnienie dyspozycyjne wężła cieplnego zasilanego tymże odcinkiem jest nadal większe niż wymagane minimalne ciśnienie dyspozycyjne.

Po wykonaniu wszystkich wyżej opisanych kroków otrzymujemy zbiór optymalnych średnic nominalnych dla wszystkich odcinków sieci wchodzących w skład analizowanego fragmentu sieci ciepłowniczego. Poszczególne

etapy optymalizacji przedstawiono dokładniej w [1-3].

Numeryczny algorytm optymalizacyjny z ograniczeniami wykorzystywany jest w procesie optymalizacji (E1, E5) średnic sieci jako ostatni krok etapu E4 oraz w punkcie E5 do rozwiązania układów równań bilansujących przepływy i ciśnienia w sieci ciepłowniczego, w którym brane są pod uwagę odcinki pierścieniowe ze zdefiniowanymi średnicami. Pozwala to w sposób efektywny uwzględnić ograniczenia (2)-(5) w procesie poszukiwania minimum funkcji celu (1).

■ Analizowany fragment sieci ciepłowniczej

Działanie algorytmu optymalizacyjnego przetestowane zostało na wielu wariantach struktury sieci ciepłowniczej. Testy potwierdziły poprawność i skuteczność działania algorytmu. W artykule działanie algorytmu optymalizacyjnego zostanie zobrazowane na przykładzie optymalizacji fragmentu istniejącej sieci ciepłowniczej, która ze względu na długoletni okres eksploatacji poddawana jest kolejnym modernizacjom polegającym na wymianie najbardziej zużytych odcinków sieci (rys. 2). Ponieważ analizowana sieć była projektowana przed wielu laty dla znacznie większych mocy u odbiorców mamy w tym przypadku do czynienia ze wskazaniem przez algorytm optymalizacyjny potrzeby znacznej redukcji niektórych odcinków sieci.

Rzeczywisty fragment sieci ciepłowniczej z rys. 2 objęty kropkowaną niebieską linią został „zwinięty” poprzez przypisanie mocy rzeczywistych węzłów ciepłych do węzłów zastępczych zlokalizowanych w rozgałęzieniach sieci rzeczywistej i przedstawiony w formie grafu - rys. 3. Takie skompensowanie fragmentu sieci miało na celu wyodrębnienie jedynie odcinków sieci o średnicy powyżej DN 150. Model sieci optymalizowanej składa się zatem z 30 łuków ($U=30$), 28 wierzchołków ($W=28$) i 3 cykli ($S=3$) - tab. 1.

Podstawowe dane dla analizowanego fragmentu sieci ciepłowniczej przedstawiono w tab. 1. „Liczba łuków” i „liczba wierzchołków” wynika z wprowadzonej przez użytkownika struktury systemu, a „liczba cykli” to także wynikająca ze struktury liczba zamkniętych pierścieni. Liczba „cykli znalezionych” to liczba wszystkich zamkniętych pierścieni odnalezionych przez algorytm w przypadku, gdy pierścienie mają ze sobą części wspólne. „Liczba przypadków - KOMB” natomiast to liczba kombinacji odcinków do optymalizacji z wybranych przez użytkownika (w liczbie UOPT). Odcinki przewidywane do wymiany i objęte szczególnym trybem optymalizacji

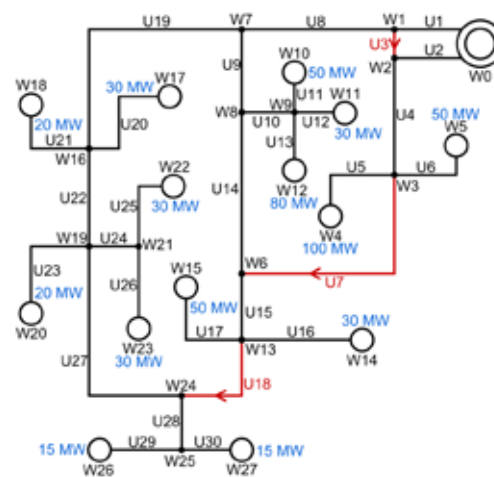
to odcinki U3, U7, U14, U18, U22, w tym U3, U7, U18 to odcinki zamykające pierścienie.

Dla sieci z rys. 2 zostały wykonane obliczenia optymalizacyjne oraz wyznaczono strumienie wody sieciowej i spadki ciśnień we wszystkich odcinkach analizowanej sieci.

W tab. 2 podane są wartości średnicy odcinków sieci w kolejnych etapach optymalizacji dla wariantu optymalnego oznaczonego w tab. 3 jako DEF2.

W tab. 3 podano pełne wyniki obliczeń optymalizacyjnych, w tym dane techniczne oraz składowe koszty przesyłania ciepła dla 4 wariantów: MIN, DEF1, DEF2, MAX różniących się zadanymi wartościami średnicy odcinków pierścieniowych U4, U7, U18 oraz dla wariantu obecnych średnic oznaczonego jako „RZECZ”. Dla sieci istniejącej (wariant RZECZ) jednostkowy koszt przesyłania ciepła wynosi 5,00 PLN/GJ. Optymalnym jest wariant DEF2, dla którego wartości średnicy DN dla odcinków pierścieniowych U4, U7, U18 wynoszą odpowiednio: 400, 700, 400. Wariant MIN ma wprawdzie niższy koszt jednostkowy, ale nie spełnia ograniczeń - za niskie są ciśnienia dyspozycyjne w kilku węzłach ciepłych.

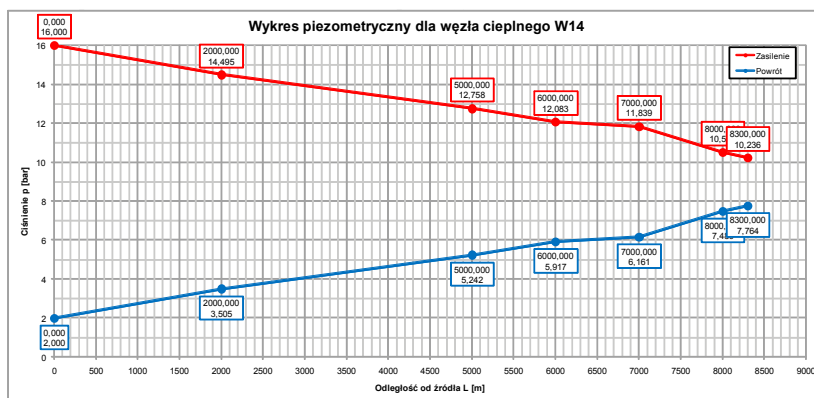
Opracowany program umożliwia przedstawienie spadków ciśnienia w postaci graficznej na drodze od źródła ciepła do dowolnego węzła końcowego. Dla przykładu przedstawiono wykres piezometryczny oraz ciśnienia dyspozycyjne dla węzła 14 (z rys. 3).



Rys. 3. Graf analizowanego fragmentu sieci ciepłowniczej

■ Wnioski

Zaprezentowany w artykule algorytm służący do doboru średnicy rurociągów sieci ciepłowniczej w układzie złożonym może być wykorzystywany do optymalizacji fragmentów sieci ciepłej zarówno nowo tworzonych, jak i już istniejących systemów ciepłowniczych. Pozwala on na znalezienie takiego zbioru średnic dla wszystkich odcinków analizowanego fragmentu sieci, dla którego spełnione jest kryterium ekonomiczne w postaci minimum jednostkowych kosztów przesyłania ciepła oraz towarzyszące temu kryterium ograniczenia hydrauliczne nałożone na źródło ciepła, węzły ciepłe, zamknięte pierścienie układu oraz roz-



Rys. 4. Rozkład ciśnienia od źródła do węzła oraz ciśnienie dyspozycyjne dla węzła 14

Tab. 1. Dane dla analizowanego fragmentu sieci ciepłowniczej

Sieć ciepłownicza rozgałęźno-pierścieniowa		
Liczba łuków	U	30
Liczba wierzchołków	W	28
Liczba cykli	S	3
Struktura		
Łuki:	U	30
Źródłowe	UEC	2
Pierścieniowe	UP	3
Końcowe	UW	14
Pozostałe	US	11
Wierzchołki:	W	28
Źródła	WEC	1
Węzły	WW	14
Rozgałęzienia	WR	13
Cykle	S	3
Cykle znalezione	S'	6
Optymalizacja		
Łuki do optymalizacji	UOPT	5
Liczba przypadków	KOMB	31

gałęzienia sieci. Jednoczesne spełnienie kryterium i wszystkich ograniczeń prowadzi do redukcji kosztów przesyłania ciepła przy zachowaniu wymagań technicznych i cieplno-przepływowych.

Z wykonanych obliczeń dla wielu wariantów sieci ciepłowniczej oraz fragmentów sieci dużych systemów ciepłowniczych wynika, iż poprzez odpowiedni dobór średnicy rurociągów sieci można ograniczyć koszty przesyłania o 0-10% dla nowobudowanych oraz o 0-20% dla istniejącej mocno przewymiarowanej sieci.

W zaprezentowanym przykładzie, ilustrującym proces optymalizacji, dokonano analizy poprawności doboru średnicy odcinków istniejącej sieci, przewidywanej do modernizacji. Sieć magistralna, o łącznej długości sieci 24,3 km, pobiera ze źródła ciepła (elektrociepłowni) moc 560 MW. Ciepło przesyłane jest dwiema głównymi magistralami oraz 26 odcinkami magistralnymi i rozdzielczymi oraz o średnicach podanych w tabeli 2. Jednostkowy koszt przesyłania ciepła dla tej sieci wynosi 5 PLN/GJ. Obliczenia tego samego fragmentu systemu w zaproponowanym w artykule procesie optymalizacji wykazały, że w wyniku korekty średnic wybranych odcinków koszt jednostkowy zmalałby do wartości 4,04 PLN/GJ, a zatem można uzyskać

Tab. 2. Zestawienie średnic odcinków z kolejnych etapów optymalizacji dla wariantu optymalnego DEF2

Zestawienie średnic odcinków z kolejnych etapów optymalizacji								
U	Wstępna	Prędkość.	Opt. wybr.	Opt. węzł.	Ostateczne	Rzeczyw.	Porówn.	Różnica
1	800	900	900	900	900	1100	mniejsza	-2
2	500	600	600	600	600	1000	mniejsza	-4
3	500	500	500	500	500	400	większa	2
4	500	600	600	600	600	900	mniejsza	-3
5	450	500	500	450	450	400	większa	1
6	300	350	350	300	300	300	taka sama	0
7	600	600	600	600	600	900	mniejsza	-3
8	800	900	900	900	900	900	taka sama	0
9	600	700	700	700	700	700	taka sama	0
10	500	600	600	600	600	500	większa	1
11	300	350	350	250	250	200	większa	1
12	250	300	300	200	200	200	taka sama	0
13	400	450	450	350	350	300	większa	1
14	400	450	450	450	450	600	mniejsza	-2
15	400	450	450	450	450	500	mniejsza	-1
16	250	300	300	300	300	350	mniejsza	-1
17	300	350	350	300	300	250	większa	1
18	400	400	350	350	350	300	większa	1
19	500	600	600	600	600	800	mniejsza	-2
20	250	300	300	250	250	300	mniejsza	-1
21	200	250	250	200	200	350	mniejsza	-3
22	450	500	500	500	500	600	mniejsza	-1
23	200	250	250	250	250	200	większa	1
24	300	350	350	350	350	250	większa	2
25	250	300	300	300	300	200	większa	2
26	250	300	300	300	300	250	większa	1
27	250	300	300	300	300	500	mniejsza	-4
28	250	300	300	300	300	500	mniejsza	-4
29	150	200	200	200	200	200	taka sama	0
30	150	200	200	200	200	200	taka sama	0

oszczędność 0,94 PLN/GJ, wynoszącą 19% obecnego kosztu.

Algorytm optymalizacyjny zaprezentowany w pracy, pozwala uzyskiwać zadowalające wyniki obliczeń cieplno-hydrauliczno-ekonomicznych dla inwestycji takich jak: budowa nowych bądź rozbudowa istniejących systemów. Ich stosowanie oraz wdrażanie zmian w oparciu o otrzymywane wyniki wpływa korzystnie na koszty ponoszone przez przedsiębiorstwa ciepłownicze zajmujące się przesyłaniem i dystrybucją ciepła. Optymalizacja konstrukcji (średnic) sieci ciepłej zrealizowana w oparciu o zaproponowany algorytm prowadzi zatem do poprawy efektywności energetycznej i ekonomicznej systemów ciepłowniczych. □

Literatura

1. Smyk A, Pietrzyk Z. Dobór średnicy rurociągów w sieci ciepłowniczej z uwzględnieniem optymalnej prędkości wody sieciowej. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* Nr 6, tom 97/2011.
2. Murat J.: Dobór optymalnej średnicy rurociągów sieci ciepłej w układzie rozgałęźnym i pierścieniowym w systemie ciepłowniczym zasilanym z elektrociepłowni, *Praca dyplomowa inżynierska, ITC PW, 2014.*
3. Murat J., Smyk A.: Dobór optymalnej średnicy rur rozgałęźno-pierścieniowej sieci w systemie ciepłowniczym zasilanym z elektrociepłowni *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* No 4, tom 46/2015.
4. Murat J., Smyk A.: Dobór średnicy rurociągów w układzie rozgałęźno-pierścieniowym dla przykładowych struktur sieci

ciepłowniczej. *INSTAL* No 9 2015

5. Wasilewski W., S. Turlejski S. - „Model matematyczny dla celów optymalizacji parametrów termodynamicznych i geometrycznych systemów ciepłowniczych”, *Po-
litechnika Warszawska, Wydział Inżynierii
Sanitarnej i Wodnej, Instytut Ogrzewnictwa
i Wentylacji, Warszawa 1984 (niepubliko-
wana).*

6. HEAT ROADMAP EUROPE 2050. *De-
partment of Development and Planning
Aalborg University Denmark May, 2013.
ISBN: 978-87-91404-48-1.*

7. M. Pirouti, A. Bagdanavicius, J. Eka-
nayake, J. Wu, N. Jenkins, *Energy con-
sumption and economic analyses of a di-
strict heating network, Energy 57 (2013).*

8. Li H, Svendsen S. *District heating ne-
twork design and configuration optimiza-
tion with genetic algorithm. J Sustain Dev
Energy, Water Environ Syst 2013;1(4).*

9. Pengfei Jie, Neng Zhu, Deying Li, *Ope-
ration optimization of existing district he-
ating systems, Applied Thermal Enginee-
ring 78 (2015).*

10. Phetteplace, G., *Optimal Design of Pi-
ping Systems for District Heating. CRREL
Report 95-17., U.S. Army Corps of Engine-
ers. Cold Regions Research and Enginee-
ring Laboratory. Hanover 1995.*

11. Hlebnikov A, Siirde A, Paist A. *Basics
of optimal design of district heating pipeli-
nes diameters and design examples of Es-
tonian old non-optimised district heating
networks, Doctoral School of Energy - and
Geo-technology, January 15-20, 2007, Ku-
ressaare, Estonia.*

12. T. Nussbaumer, S. Thalmann, *Influ-
ence of system design on heat distribu-
tion costs in district heating, Energy 101
(2016).*

13. Hossam A. A. Abdel-Gawad, *Optimal
design of pipe network by an improved ge-
netic algorithm, Sixth International Water
Technology Conference, IWTC 2001, Ale-
xandria, Egypt.*

14. Chiara Bordin, Angelo Gordini, Daniele
Vigo, *An optimization approach for district
heating strategic network design, Europe-
an Journal of Operational Research 252
(2016).*

**Tab. 3. Wyniki końcowe optymalizacji średnicy rurociągów sieci ciepłowniczej.
DEF2 - wariant optymalny**

Wyniki końcowe optymalizacji średnic rurociągów sieci ciepłowniczej							
Wielkość	Symbol	RZECZ	MAX	DEF 1	DEF 2	MIN	Jednostka
Źródło							
Moc źródła	QEC	550	550	550	550	550	MW
Przepływ źródła w warunkach obliczeniowych	Gobl	2189	2189	2189	2189	2189	kg/s
Wysokość podnoszenia źródła w warunkach obliczeniowych	Δp_{EC}	14	14	14	14	14	bar
Długości i średnice sieci							
Długość rzeczywista sieci	L	24300	24300	24300	24300	24300	m
Długość zastępcza sieci	Lz	5025	4621	4561	4541	4338	m
Długość hydrauliczna sieci	Lc	29325	28921	28861	28841	28638	m
Udział procentowy sieci magistralnych (DN \geq 350)	Lmag/L	80,25	79,01	79,01	78,19	68,72	%
Udział procentowy sieci przesyłowych (DN<350)	Lprz/L	19,75	20,99	20,99	21,81	31,28	%
Największa zastosowana średnica DN	DNmax	1100	900	900	900	900	-
Najmniejsza zastosowana średnica DN	DNmin	200	200	200	200	200	-
Ciśnienia							
Ciśnienie maksymalne w systemie	pmax	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	bar
Ciśnienie minimalne w systemie	pmin	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	bar
Największe ciśnienie dyspozycyjne węzła cieplnego w systemie	pdmax	11,037	4,059	3,940	3,960	4,377	bar
Najmniejsze ciśnienie dyspozycyjne węzła cieplnego w systemie	pdmin	2,524	2,019	2,002	2,004	-0,122	bar
Koszty							
Nakłady inwestycyjne	I	263243	213720	208680	207802	197890	tys. PLN
Roczne koszty stałe (od amortyzacji i stałe eksploatacyjne)	Ks	23692	19235	18781	18702	17810	tys. PLN/a
Roczne koszty pompowania	Kpomp	1897	1871	1867	1866	1852	tys. PLN/a
Roczne koszty strat ciepła	Kstr	1831	1665	1653	1640	1611	tys. PLN/a
Łączne koszty roczne eksploatacji sieci	K	27420	22770	22301	22208	21273	tys. PLN/a
Udział procentowy kosztów stałych	Ks/K	86,40	84,47	84,22	84,21	83,72	%
Udział procentowy kosztów pompowania	Kpomp/K	6,92	8,22	8,37	8,40	8,71	%
Udział procentowy kosztów strat ciepła	Kstr/K	6,68	7,31	7,41	7,39	7,57	%
Jednostkowe koszty przesyłania ciepła	kqj	0,21	0,17	0,17	0,17	0,16	PLN/(GJ*km)
	kq	5,00	4,14	4,05	4,04	3,87	PLN/GJ
Wartości średnicy DN dla odcinków pierścieniowych U4,U7,U18 dla rozpatrywanych wariantów: RZECZ: 900,900,3000; MAX: 800, 600, 400; DEF1: 400,700, 600; DEF2:400,700,400(OPTY) ; MIN: 500,300,250							