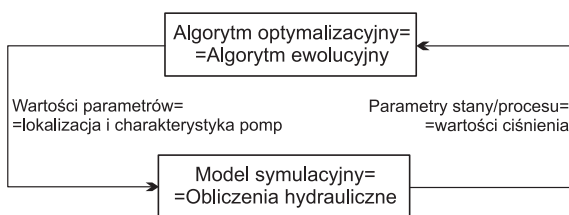


Paweł Malinowski

Propozycja struktury algorytmu ewolucyjnego do optymalizacji kosztów pompowania w wodnych sieciach przesyłowych

Zagadnienie optymalizacyjne, dotyczące eksploatacji i modernizacji wodnych sieci przesyłowych, takich jak sieci wodociągowe, ciepłownicze, czy też wody chłodzącej, może zostać sformułowane jako zadanie umieszczenia w sieci zadanej liczby pomp tak, aby zminimalizować koszty pompowania, przy zachowaniu minimalnych wahań ciśnienia dyspozycyjnego u odbiorców oraz spełnienia warunku nieprzekraczania wartości ciśnienia maksymalnego i minimalnego w elementach sieci. W zależności od typu sieci, zadanie to może być dodatkowo rozbudowane o inne zagadnienia, dotyczące na przykład czasu przepływu wody (w sieciach wodociągowych) lub strat ciepła (w sieciach ciepłowniczych). Do rozwiązania tego problemu w niniejszym artykule zaproponowano metodę algorytmu ewolucyjnego jako optymalizatora globalnego. W wyniku działania takiego algorytmu otrzymuje się model sieci zmodyfikowany w stosunku do wyjściowego poprzez umieszczenie w nim zadanej liczby pomp wraz z ich charakterystyką techniczną. Wyznaczone miejsca instalacji pomp prowadzą do obniżenia kosztów pompowania wody, nie powodując przekroczenia granicznych wartości (minimalnego i maksymalnego) ciśnienia w sieci.

Matematyczne modele przepływów w stanach ustalonych są obecnie dobrze znane. Podstawą każdego z nich jest konceptualny model przepływu, zdefiniowany w postaci układu równań wraz z algorytmem ich rozwiązania. Zagadnienia te zostały szczegółowo omówione w licznych opracowaniach [1–3], natomiast zastosowanie metod ewolucyjnych stanowi nowe podejście do zagadnienia optymalizacji sieci wodociągowych opisane w pracach [4–6], a także sieci ciepłowniczych [7, 8]. Na podstawie przedstawionej w artykule metodyki napisano zestaw programów komputerowych (komputerowy model symulacyjny przepływów w sieciach wodociągowych i ciepłowniczych), który został wykorzystany w badaniach. Schemat postępowania zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy rozwiązania zadania
Fig. 1. Block diagram for the solution of the problem

Łącząc ze sobą model symulacyjny obliczeń hydraulicznych sieci wodociągowej i/lub ciepłej z optymalizacją za pomocą algorytmu ewolucyjnego, otrzymano sposób postępowania przedstawiony na rysunku 2.

Struktura algorytmu ewolucyjnego

Chromosom składa się z $K=2M$ genów (M – liczba przewodów w modelu). Gen $g_m(1)$ ($m=\{1, \dots, M\}$) przyjmuje wartość 0, jeżeli na danym odcinku nie ma pompy, natomiast 1, gdy jest ona zainstalowana. Gen $g_m(2)$ opisuje charakterystykę pompy (tab. 1).

Tabela 1. Przykładowy chromosom
Table 1. Example of a chromosome

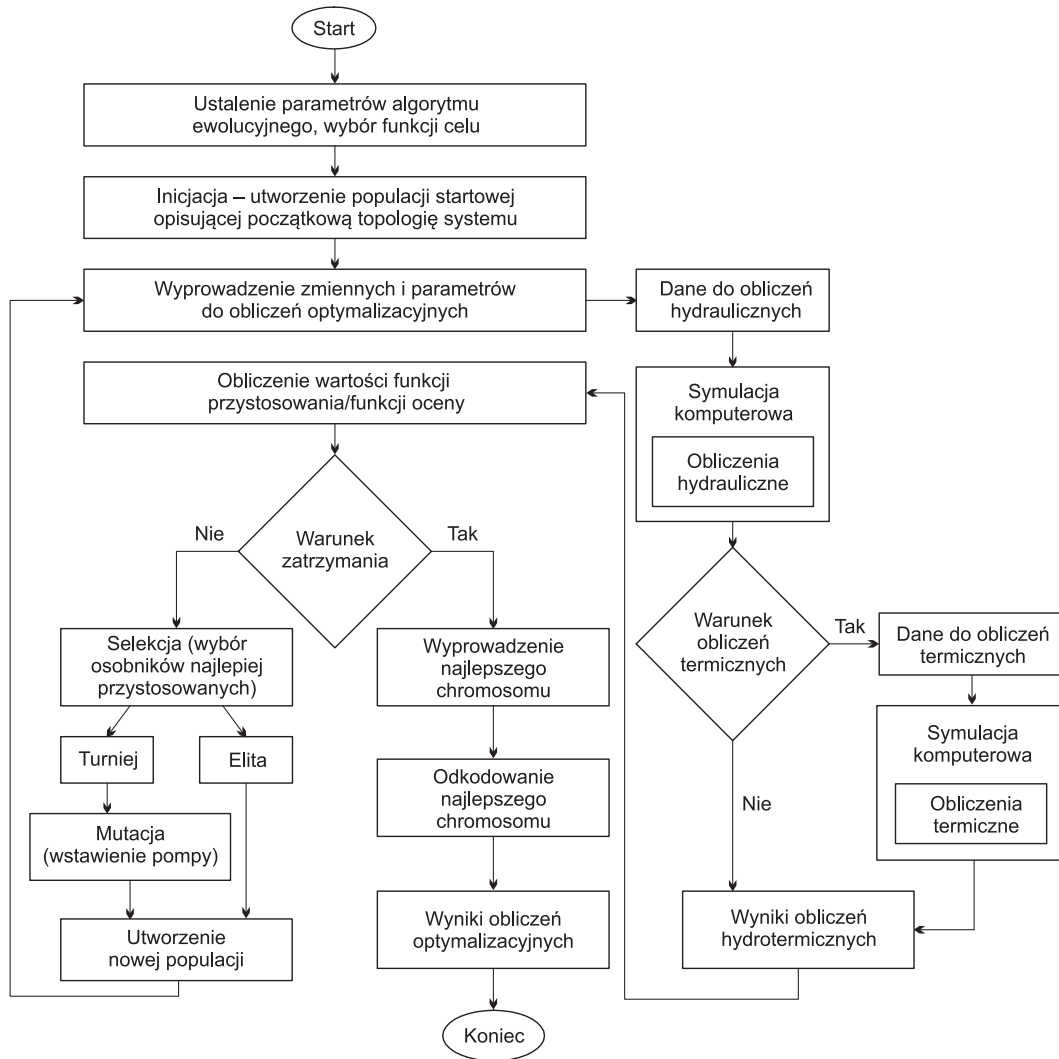
Gen	k_1	k_2	...	k_{K-1}	k_K
Przykładowy chromosom	1	1	...	0	0
Znaczenie genu	$g_1(1)$	$g_1(2)$...	$g_M(1)$	$g_M(2)$

Populacja inicjowana jest przez stworzenie zadanej liczby chromosomów. W pierwszym pokoleniu (populacja wyjściowa) osobniki opisują topologię sieci ciepłej – każdy gen ma wartość odpowiadającą parametrom przewodu (występowanie pompy i jej charakterystyka), który opisuje. Wszystkie osobniki są takie same.

Ocena przystosowania chromosomów w populacji

Funkcja oceny służy do porównywania rozwiązań zadane problemu przez poszczególne chromosomy w populacji, przy czym rozwiązania korzystniejsze powinny dawać lepszą wartość funkcji oceny. Rozwiązanie, które uzyskało najlepszą ocenę jest pamiętane jako wynik działania algorytmu, przy czym „n” najlepszych rozwiązań (n jest parametrem algorytmu) stanowi tzw. elitę [9]. Podczas tworzenia nowej populacji elita jest kopiowana bez zmian.

Funkcja oceny dobierana jest zgodnie z kryterium zadanym w przypadku danego przebiegu optymalizacyjnego. Należy zauważyć, że w niniejszych badaniach problem optymalizacji kosztów został sprowadzony do zagadnienia minimalizacji sumy kosztów strat ciepła i kosztów energii pompowania. Wynikało to z faktu, iż w przypadku systemu zaopatrzenia w ciepło opartym na sieci ciepłej przy danym zapotrzebowaniu na ciepło przez odbiorców, zmniejszając temperaturę sieciowej (spadek strat ciepła), należy zwiększyć strumień tej wody (wzrost zużycia energii do pompowania) i odwrotnie, zmniejszając strumień wody sieciowej (spadek kosztów pompowania), należy podnieść jej temperaturę (wzrost strat ciepła). Problem ten sprowadza



Rys. 2. Diagram algorytmu optymalizacyjnego [8]
Fig. 2. Diagram of the optimization algorithm [8]

się więc do minimalizacji wartości funkcji będącej sumą kosztów strat ciepła i energii pompowania:

$$K_{sc}^C = K_{sc}^{\Delta Q} + K_{sc}^{\Delta p} \quad (1)$$

Zadanie optymalizacji sprowadzić można zatem do minimalizacji sumy funkcji $K_{sc}^{\Delta Q}$ – opisującej koszty strat ciepła oraz $K_{sc}^{\Delta p}$ – opisującej koszty pompowania, wyrażonych wzorami:

$$K_{sc}^{\Delta p} = E_{sc}^{\Delta p} k_{el} \quad (2)$$

$$K_{sc}^{\Delta Q} = E_{sc}^{\Delta Q} k_{cp} \quad (3)$$

w których:

$E_{sc}^{\Delta Q}$ – straty ciepła w sieci podczas transportu ciepła, GJ
 $E_{sc}^{\Delta p}$ – energia zużyta do pompowania wody sieciowej, kWh
 k_{el} – jednoskładnikowa cena energii elektrycznej, zł/kWh
 k_{cp} – jednoskładnikowa cena ciepła, zł/GJ

Ponieważ wartość strat ciepła na sieci ciepłej podczas transportu ciepła określa zależność:

$$E_{sc}^{\Delta Q} = F_{sc}^{\Delta Q} (t_T^k - t_T^p) \quad (4)$$

zatem energię stanowiącą straty ciepła można wyznaczyć zgodnie z [10] ze wzoru:

$$E_{sc}^{\Delta Q} = \sum_{r=1}^R \sum_{T=T_{min}}^{T=T_{maks}} \sum_{t_T=t_T^p}^{t_T=t_T^k} q_{t_T, T, r}^{l+2} L_r \beta_r^m \beta_r^n (t_T^k - t_T^p) \quad (5)$$

w którym:

T_{min} – najniższa temperatura zewnętrzna, °C

T_{maks} – najwyższa temperatura zewnętrzna, °C

R – liczba przewodów obliczeniowych sieci ciepłej

t_T – kolejny krok czasowy występowania temperatury T

$q_{t_T, T, r}$ – jednostkowa sumaryczna strata ciepła na odcinku r w temperaturze T

L_r – długość odcinka r

β_r^m – współczynnik miejscowych strat ciepła na odcinku r

β_r^n – współczynnik uwzględniający dodatkowe straty ciepła wynikające z niestałości pracy termicznej sieci ciepłej na odcinku r

Energię zużyta do pompowania, szczególnie omówioną i wyznaczoną w pracach [8, 11], opisuje zależność:

$$E_{sc}^{\Delta p} = \alpha \sum_{p=1}^P \sum_{T=T_{min}}^{T=T_{maks}} \sum_{t_T=t_T^p}^{t_T=t_T^k} G_{t_T, T, p} \frac{\Delta p_{t_T, T, p}}{\eta_{t_T, T, p}} (t_T^k - t_T^p) + \beta \sum_{s=1}^S \sum_{T=T_{min}}^{T=T_{maks}} \sum_{t_T=t_T^p}^{t_T=t_T^k} G_{t_T, T, s} \frac{\Delta p_{t_T, T, s}}{\eta_{t_T, T, s}} (t_T^k - t_T^p) \quad (6)$$

w której:

S – liczba pomp sieciowych

P – liczba pomp w źródłach ciepła

$G_{t_r, T, p}$ – wydajność pompy p w źródle w temperaturze zewnętrznej T

$\Delta p_{t_r, T, p}$ – przyrost ciśnienia na pompie p w źródle w temperaturze zewnętrznej T

$\eta_{t_r, T, p}$ – sprawność całkowita pompy w źródle m w temperaturze zewnętrznej T

$G_{t_r, T, s}$ – wydajność pompy sieciowej s w temperaturze zewnętrznej T

$\Delta p_{t_r, T, s}$ – przyrost ciśnienia na pompie sieciowej s w temperaturze zewnętrznej T

$\eta_{t_r, T, s}$ – sprawność całkowita pompy sieciowej s w temperaturze zewnętrznej T

Po podstawieniu wzorów (5) i (6) do wzoru (1) otrzymuje się wzór na koszty całkowite (pompowania i strat ciepła) w wodnym sieciowym systemie zaopatrzenia w ciepło:

$$K_{sc}^C = K_{sc}^{\Delta Q} + K_{sc}^{\Delta p} = k_{cp} \sum_{r=1}^R \sum_{T=T_{min}}^{T=T_{maks}} \sum_{t_r=t_r^k}^{t_r=t_r^p} q_{t_r, T, r}^{l+2} L_r \beta_r^m \beta_r^n (t_r^k - t_r^p) +$$

$$+ k_{el} \alpha \sum_{p=1}^P \sum_{T=T_{min}}^{T=T_{maks}} \sum_{t_r=t_r^k}^{t_r=t_r^p} G_{t_r, T, p} \frac{\Delta p_{t_r, T, p}}{\eta_{t_r, T, p}} (t_r^k - t_r^p) +$$

$$+ k_{el} \beta \sum_{s=1}^S \sum_{T=T_{min}}^{T=T_{maks}} \sum_{t_r=t_r^k}^{t_r=t_r^p} G_{t_r, T, s} \frac{\Delta p_{t_r, T, s}}{\eta_{t_r, T, s}} (t_r^k - t_r^p) \quad (7)$$

Selekcja chromosomów i utworzenie nowej populacji

Do następnego pokolenia wybieranych jest n najlepszych osobników, tzw. elita (n jest parametrem algorytmu), zaś pozostała część populacji dopełniana jest nowymi osobnikami [9]. Nowe osobniki tworzone są w następujący sposób:

- najpierw wybieranych jest N–n rozwiązań rodzicielskich (N – całkowity rozmiar populacji, n – liczba najlepszych rozwiązań już wybranych do następnego pokolenia), przy czym wybór osobnika rodzicielskiego przeprowadzany jest metodą turniejową – losowanych jest t rozwiązań (t – parametr algorytmu), a najlepsze spośród nich zostaje osobnikiem rodzicielskim,
- na osobnikach rodzicielskich stosuje się operatory genetyczne – krzyżowanie i mutację.

Mutacja polega na przypadkowej zmianie wartości pojedynczego genu. Jeżeli na danym przewodzie nie ma pompy, jest ona na nim umieszczana, jeżeli natomiast na przewodzie umieszczona jest już pompa, to zmieniana jest jej charakterystyka. W obu przypadkach spełnione muszą być następujące warunki:

– na każdym z przewodów może nie być pompy lub umieszczona może być dokładnie jedna pompa:

$$\forall m \in \{1, \dots, M\} g_m(1) \in \{0, 1\} \quad (8)$$

– jeżeli na danym przewodzie znajduje się pompa, to jej charakterystyka może być jedną ze zbioru dostępnych:

$$\forall m \in \{1, \dots, M\} g_m(2) \in \Phi \quad (9)$$

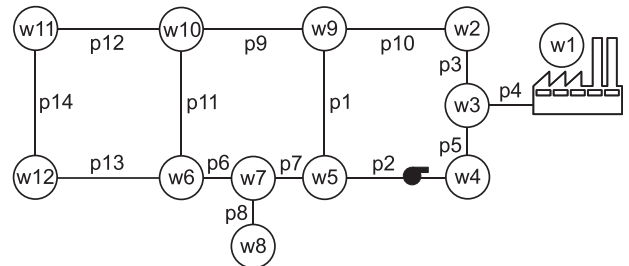
w którym Φ jest zbiorem dostępnych charakterystyk pompy.

Ponieważ chromosom opisuje rzeczywisty system, który podlega fizycznym ograniczeniom, niezbędna jest kontrola wyników pracy algorytmu pod względem spełnienia

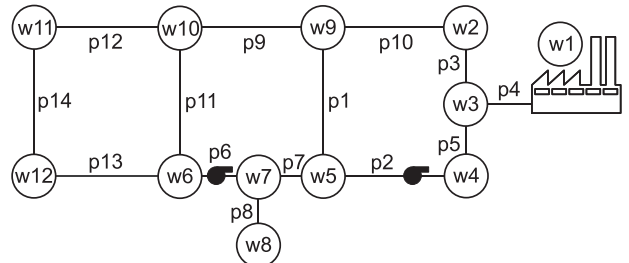
ograniczeń. W proponowanym algorytmie nie zmienia się jednak żadnej z cech systemu, która mogłaby przyjąć wartość niefizyczną. Kontrolowane są natomiast warunki ciśnienia minimalnego (nie powinno spaść poniżej pewnej wartości) i maksymalnego (nie może przekroczyć wyznaczonej wartości) zarówno na przewodach zasilających, jak i powrotnych. W przypadku sieci wodociągowych istotne wydaje się wprowadzenie dodatkowych warunków ograniczających [12–14]. W wyniku działania algorytmu ewolucyjnego otrzymuje się topologię sieci zmodyfikowaną w stosunku do wyjściowego opisu przez umieszczenie zadanej liczby pomp. Wyznaczone miejsca instalacji pomp oraz ich charakterystyki prowadzą do optymalizacji wybranej funkcji celu.

Przykład obliczeniowy

W tabelach 2 i 3 zamieszczono przykładowe dane chromosomów, natomiast na rysunkach 3 i 4 podano schemat sieci ciepłowniczej opisanej przykładowym chromosomem.



Rys. 3. Sieć ciepłownicza opisana przykładowym chromosomem
Fig. 3. Heat distribution network described by an example of chromosome



Rys. 4. Sieć ciepłownicza opisana chromosomem po mutacji
Fig. 4. Network described by a chromosome after mutation

Opierając się na warunkach i strukturze algorytmu ewolucyjnego przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne w przypadku zadania doboru lokalizacji i wielkości pomp w rzeczywistym systemie ciepłowniczym wybranego miasta z użyciem przedstawionej funkcji celu. Obliczenia wartości funkcji celu przeprowadzono z wykorzystaniem zbudowanego komputerowego hydrotermicznego modelu symulacyjnego systemu ciepłowniczego tego miasta. Podobnie obliczenia ewolucyjnej optymalizacji przeprowadzono z użyciem zbudowanego programu obliczeń ewolucyjnych. Szczegółowy opis metodyki doboru zakresu wartości parametrów omówiono w pracy [8].

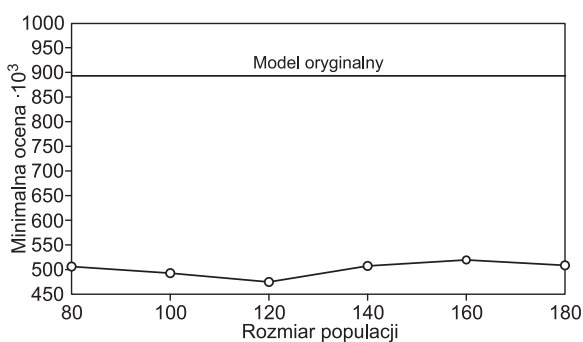
Wykres na rysunku 5 obrazuje wpływ przykładowego parametru algorytmu, jakim jest rozmiar populacji, na otrzymane wartości minimalne funkcji oceny. Pozostałe parametry – również istotne – to rozmiar elity, rozmiar turnieju, prawdopodobieństwo krzyżowania i mutacji oraz liczba pokoleń.

Tabela 2. Przykładowy chromosom przed mutacją
Table 3. Example of a chromosome before mutation

Przewód	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Gen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Wartość genu														
Obecność pompy	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Typ charakterystyki	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 3. Przykładowy chromosom po mutacji
Table 4. Example of a chromosome after mutation

Przewód	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Gen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Wartość genu														
Obecność pompy	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Typ charakterystyki	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0



Rys. 5 Wpływ parametru „rozmiar populacji” na minimalną wartość funkcji oceny

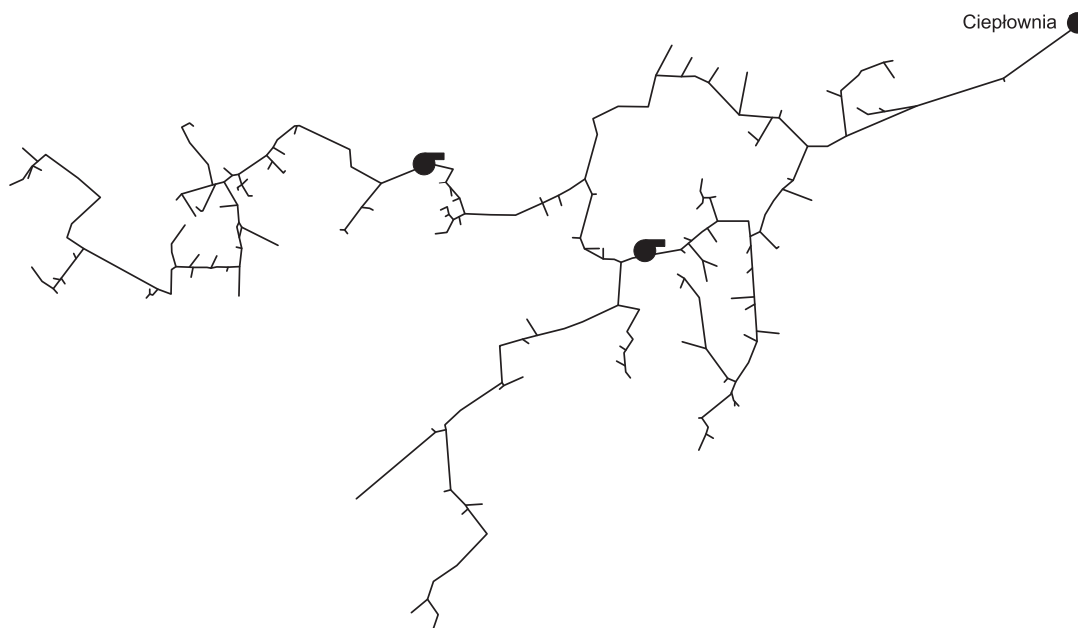
Fig. 5. Impact of the 'population size' parameter on the minimal value of the evaluation function

Na podstawie uzyskanych wyników do dalszych obliczeń przyjęto wariant o następujących parametrach: rozmiar populacji – 120, rozmiar elity – 50, rozmiar turnieju – 35, prawdopodobieństwo krzyżowania – 0,25, prawdopodobieństwo mutacji – 0,40, liczba pokoleń – 5(50). W celu przeprowadzenia obliczeń optymalizacyjnych wyboru lokalizacji dwóch pomp sieciowych w przypadku sieci

ciepłowniczej miasta, algorytm uruchamiano w różnych wariantach według parametrów wybranych na podstawie wyników wcześniejszej analizy doboru parametrów algorytmu. W wyniku przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych, przy początkowej wartości kosztów transportu ciepła w mieście bez pomp sieciowych wynoszącej ok. 900 tys. zł, wyznaczony po użyciu algorytmu koszt wyniósł ok. 550 tys. zł. Wykonane obliczenia optymalizacyjne umożliwiły wskazanie optymalnej lokalizacji dwóch pomp sieciowych. Na rysunku 6 przedstawiono fizyczną lokalizację pomp w przypadku założonej funkcji celu.

Podsumowanie

Zastosowanie algorytmu ewolucyjnego do optymalizacji wyboru miejsca lokalizacji i wielkości dwóch pomp sieciowych dało pozytywne rezultaty. W przypadku wybranych w procesie optymalizacyjnym miejsc lokalizacji dwóch pomp sieciowych, bez zmiany pozostałych parametrów fizycznych, otrzymano zmniejszenie kosztów przesyłu ciepła wynoszące 37,6%. W obliczeniach nie uwzględniono kosztów inwestycyjnych oraz analizy czasu zwrotu.



Rys. 6. Wyznaczona lokalizacja dwóch pomp sieciowych
Fig. 6. Optimal location of two network pumps

Przedstawiony w pracy algorytm o opisanej strukturze wykazał skuteczność poszukiwania rozwiązań optymalnych w przypadku zadanej funkcji oceny. Rozbudowa funkcji oceny o koszty inwestycyjne jest osobnym zagadnieniem, które nie wpływa na strukturę i działanie zaproponowanego algorytmu ewolucyjnego.

Zaprezentowana w artykule struktura algorytmu ewolucyjnego została zastosowana do optymalizacji kosztów transportu wody w sieci ciepłowniczej. W przypadku sieci wodociągowej struktura algorytmu będzie wymagała adaptacji niektórych elementów [13, 15]. W szczególności wydaje się, że należy rozbudować komputerowy model obliczeń hydraulicznych o zagadnienia związane ze zmniejszaniem się przepływności rurociągów [16, 17] oraz występowaniem przepływów zwrotnych w sieciach [18]. Jednakże sama struktura algorytmu ewolucyjnego, polegająca na połączeniu obliczeń optymalizacyjnych i metod ewolucyjnych oraz obliczeń hydraulicznych z użyciem modeli symulacyjnych, pozostaje bez zmian.

Zaproponowany algorytm wymaga dalszych badań i analiz, w szczególności przetestowania na większej liczbie modeli symulacyjnych wodnych sieci przesyłowych, oraz sformalizowania metody doboru parametrów obliczeń ewolucyjnych. Wyniki tych badań będą miały istotny wpływ na możliwości praktycznych zastosowań proponowanego algorytmu.

LITERATURA

1. T. WALSKI, D. CHASE, D. SAVIC: Water distribution modeling. Heated Press, Waterbury 2001.
2. Z. SIWON: Hydraulic analysis of water distribution systems. *Environment Protection Engineering* 1998, Vol. 24, No. 3–4, pp. 121–130.
3. P. BOULOS, D. WOOD: Explicite calculation of pipe network parameters. *Journal of Hydraulic Engineering* 1990, Vol. 116, No. 11, pp. 1329–1344.
4. K. VAIRAVAAMORTHY, M. ALI: Optimal design of water distribution systems using genetic algorithms. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering* 2000, No. 15, pp. 374–382.
5. D. SAVIC, G. WALTERS: Evolving sustainable water networks. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques* 1997, pp. 549–563.
6. D. SAVIC, G. WALTERS: Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 1997, pp. 67–77.
7. L. ADAMO, G. CAMMARATA, A. FICHERA, L. MARLETTA: Reti di teleriscaldamento: Analisi entropica e algoritmi genetici. *La Termotecnica* 1997, pp. 81–87.
8. P. MALINOWSKI: Modelowanie hydrotermiczne i optymalizacja systemów zaopatrzenia w ciepło. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
9. J. ARABAS: Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
10. A. SZKAROWSKI, L. ŁATOWSKI: Ciepłownictwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
11. W. JĘDRAL: Pompy wirowe. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2001.
12. H. HOTŁOŚ: Quantitative assessment of the influence of water pressure on the reliability of water-pipe networks in service. *Environment Protection Engineering* 2010, Vol. 36, No. 3, pp. 103–112.
13. H. HOTŁOŚ: Badania zmian poboru wody w wybranych miastach Polski w latach 1990–2008. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 3, ss. 39–42.
14. D. KOWALSKI: Zarządzanie jakością wody w systemie wodociągowym. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 37–40.
15. A. KOTOWSKI, A. PAWLAK, P. WÓJTOWICZ: Modelowanie miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę na przykładzie osiedla mieszkaniowego Baranówka w Rzeszowie. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 2, ss. 43–48.
16. A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
17. K. STRZELECKA, K. JEŻOWIECKA-KABSCH: Rzeczywiste wartości współczynnika strat miejscowych podczas przepływu wody przez nagłe zwężenie rury. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 33–37.
18. D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, M. KWIETNIEWSKI, A. MUSZ: Przepływy zwrotne w rozgałęzionej sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 4, ss. 31–36.

Malinowski, P. Structure Proposed for the Evolutionary Algorithm Enabling Optimization of Pumping Costs for Water Distribution Networks. *Ochrona Środowiska* 2011, Vol. 33, No. 2, pp. 59–63.

Abstract: A method is described, which enables the costs of pumping in water distribution networks (water-pipe network, heat distribution network) to be optimized effectively in economic terms under the operating conditions required. Considering the complexity of traditional optimization methods and the time-consuming computations involved, an evolutionary algorithm has been proposed to cope with this problem. With this algorithm a modified network model can be obtained, which differs from the input model in that it incorporates a given number of pumps and

their technical characteristics. The defined pump installation points, as well as the technical characterization of the pumps, make it possible to reduce the feeding pressure required, without exceeding the limit values (minimal and maximal) of water pressure in the network. The analysis is presented taking a municipal heat supply system of choice as an example. The structure proposed for the evolutionary algorithm permits the optimal location of the pumps in the heating system to be determined. The calculated results substantiate the possibility of reducing the water pumping costs in a heat supply system.

Keywords: Water distribution network, heat distribution network, pumping costs, optimization.