

Piotr PRYZSTAŁKA

Ryszard WYCZÓŁKOWSKI

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn. Politechnika Śląska, Gliwice

METODA ROZMIESZCZANIA URZĄDZEŃ POMIAROWYCH I WYKONAWCZYCH DO CELU DIAGNOZOWANIA WYCIEKÓW W SIECIACH WODOCIĄGOWYCH

Słowa kluczowe

Sieci wodociągowe, optymalizacja wielokryterialna, optymalne planowanie eksperymentów, przeszukiwanie systematyczne, algorytmy genetyczne.

Streszczenie

W artykule opisano metodę określania konfiguracji czujników przepływu oraz reduktorów ciśnienia, optymalnej ze względu na działanie systemu detekcji i lokalizacji wycieków pojawiających się w sieciach wodociągowych. Metoda optymalizacji w głównej mierze opiera się na algorytmie przeszukiwania systematycznego oraz algorytmie genetycznym. W obu przypadkach funkcję celu/przystosowania utworzono na bazie miar wrażliwościowych oraz z zastosowaniem ogólnej teorii optymalnego planowania eksperymentów. Przeprowadzone badania weryfikacyjne potwierdziły poprawność zaproponowanego rozwiązania oraz jego przydatność praktyczną.

Wprowadzenie

Sieci wodociągowe to megaukłady techniczne o szczególnym znaczeniu zarówno dla obiektów przemysłowych, jak również gospodarstw domowych.

W układach tego typu często zdarzają się niekontrolowane wycieki. Według [13] szacuje się, że straty wody sięgają 3–7% sumarycznego zużycia dla sieci poprawnie eksploatowanych (np. w Holandii) do 50% sumarycznego zużycia dla sieci o niższych standardach technicznych (np. w krajach nierozwiniętych).

Metody diagnozowania wycieków i skażenia wody na podstawie zmiennych procesowych rejestrowanych na monitorowanym obiekcie wymagają optymalnego wyboru lokalizacji rozmieszczenia oprzyrządowania pomiarowego [2, 6, 8, 9, 12, 18]. Problem ten poruszany był m.in. w pracach [1, 4, 7, 10, 11, 14, 19]. Większość proponowanych w tych pracach podejść bazuje na optymalizacji wielokryterialnej z wykorzystaniem modelu hydraulicznego rozważanej sieci wodociągowej. Kryteria optymalizacyjne w głównej mierze dobierane są w odniesieniu do sposobu diagnozowania. Ze względu na dużą złożoność kombinatoryczną problemu przeszukiwanie potencjalnych punktów pomiarowych zazwyczaj realizowane jest z zastosowaniem algorytmów genetycznych.

W niniejszych badaniach podjęto próbę opracowania metody określania rozmieszczenia urządzeń pomiarowych i wykonawczych, które wykorzystane zostaną na etapie realizacji algorytmów wykrywania i lokalizacji wycieków pojawiających się w sieci wodociągowej. Opracowana metoda wykorzystuje w procesie optymalizacji różne kryteria, w tym te wypracowane na gruncie teorii optymalnego planowania eksperymentów [17], w których informacyjną macierz Fishera estymowano na podstawie miar wrażliwości sygnałów diagnostycznych [16]. W dalszej części rozważań zakłada się, że dostępny jest model numeryczny, zrealizowany w oprogramowaniu EPANET, wstępnie skalibrowany na podstawie eksperymentów czynnych, bieżących pomiarów z n_0 przepływomierzy oraz na podstawie danych księgowych.

1. Zadanie optymalizacji rozmieszczenia czujników przepływu

Sieć wodociągowa zbudowana jest z r węzłów oraz z p połączeń pomiędzy wybranymi węzłami. Dostępnych jest n przepływomierzy, z których n_0 zamontowano wstępnie w wybranych punktach pomiarowych w celu kalibracji modelu hydraulicznego. Wiadomo również, że dostępnych pozostało m potencjalnych punktów pomiarowych, dla których znany jest koszt montażu urządzenia. Zadanie optymalizacji polega na znalezieniu takiej konfiguracji rozmieszczenia pozostałych przepływomierzy, aby zapewniona była jak najszybsza i jak najdokładniejsza lokalizacja wycieku. Przyjmuje się dwa podstawowe kryteria optymalizacyjne:

- minimalny koszt montażu urządzeń,
- maksymalną dokładność wskazania lokalizacji wycieku dla danej konfiguracji punktów pomiarowych.

Drugie z kryteriów wyrazić można w sposób pośredni za pomocą miar wrażliwości oraz miar zmienności wskazań poszczególnych przepływomierzy

[16], dla danej konfiguracji ich rozmieszczenia, na pojawiające się w sieci wodociągowej wycieki. Najogólniej funkcję celu zapisać można jako dwuwymiarowy wektor kryteriów:

$$\mathbf{F}(C_q) = [f_c(C_q) \ f_s(C_q)] \quad (1)$$

gdzie: C_q – indeks odpowiadający danej konfiguracji rozmieszczenia urządzeń pomiarowych, f_c, f_s – funkcje kryterialne reprezentujące koszt i wrażliwość, względem których oceniana jest dana konfiguracja.

W ramach prac rozważano dwa warianty zadania: z predefiniowanymi obszarami, w których następuje wyciek i bez predefiniowanych obszarów. W artykule przedstawiono jedynie pierwszy z wariantów, zastosowany później w praktyce. Ten wariant zadania wymaga podziału strefy sieci wodociągowej na skończoną liczbę obszarów. Każdemu obszarowi przydzielone są węzły, w których rozmieszczone są emiterzy dla potencjalnych wycieków. Miara wrażliwości i -tego urządzenia dla różnych obszarów wycieku zdefiniowana jest w sposób wektorowy:

$$s_i = [s_{ij}]_{j=1,2,\dots,z} \quad (2)$$

gdzie: z – liczba predefiniowanych obszarów.

Współrzędne wektora s_i wyznaczone są w następujący sposób:

$$s_{ij} = \lambda_j \sum_{p=1}^{v_j} \frac{\delta q_{ip}}{h_{jp}} \quad (3)$$

gdzie: v_j – liczba emiterów w danym obszarze.

W praktyce zdecydowanie częściej występuje sytuacja, w której liczba predefiniowanych obszarów jest większa od liczby dostępnych przepływomierzy. Do rozwiązania tego wariantu zadania zastosowano ogólną teorię optymalnego planowania eksperymentu. W tym podejściu znalezienie optymalnego rozmieszczenia czujników przepływu odpowiada znalezieniu ekstremum funkcjonu określonego na informacyjnej macierzy Fishera [17]. W praktyce bezpośrednie zastosowanie informacyjnej macierzy Fishera jest niedogodne, dlatego też zdecydowano się zastosować estymatę tzw. czułościowej macierzy Fishera jako iloczynu macierzy:

$$M = [s_i^T s_i]_{i=1,2,\dots,n} \quad (4)$$

Pozwala to na praktyczne zastosowanie wskaźników optymalności eksperymentu [17]. Bezpośrednie zastosowanie kryteriów optymalności macierzy Fishera nie było możliwe ze względu na problemy numeryczne, jakie napotykało podczas procesu optymalizacji. Było to powodem opracowania kryteriów odpornych na błędy numeryczne. W szczególności zdefiniowano:

a) odporne kryterium A-optymalności:

$$f_s(C_q) = \text{trace}[(\mathbf{M} + \mathbf{I})^{-1}] \quad (5)$$

b) zmodyfikowane odporne kryterium A-optymalności:

$$f_s(C_q) = \text{trace}[\|\mathbf{M} + \mathbf{I}\|^{-1}] \quad (6)$$

Zdefiniowane tu zadanie stanowi szczególny przypadek problemów optymalizacji, w którym przestrzeń rozwiązań jest zbiorem dyskretnym. Dla dużej liczby kombinacji skutecznym sposobem znalezienia rozwiązania optymalnego jest zastosowanie algorytmu genetycznego. W niniejszych badaniach zastosowano klasyczny algorytm genetyczny do optymalizacji jednokryterialnej [15] oraz algorytm genetyczny do optymalizacji wielokryterialnej [5]. Funkcję przystosowania definiuje się w oparciu o funkcję celu zarówno w postaci skalarnej, jak również w postaci wektorowej. Dla drugiego przypadku uzyskuje się rozwiązanie optymalne w sensie Pareto [3]. Podczas optymalizacji niezbędne jest odpowiednie skalowanie funkcji przystosowania, np. z zastosowaniem metody rankingowej lub proporcjonalnej.

2. Sformułowanie zadania optymalizacji rozmieszczenia reduktorów ciśnienia

Bardzo często, pomimo wskazania optymalnego (lub prawie optymalnego) rozmieszczenia przepływomierzy dla danego podziału strefy na obszary wycieku, istnieje problem trafnego wskazania miejsca występowania awarii. Jednym ze sposobów rozwiązania problemu nierozróżnialności obszarów wycieku jest metoda zaproponowana w [8] polegająca na odpowiedniej rekonfiguracji struktury sieci wodociągowej za pomocą reduktorów ciśnienia pracujących jako zasuw. W dalszej części rozważań zakłada się, że dostępnych jest g potencjalnych punktów, w których dostępne są zasuw lub mogą być zamontowane. Ponadto dla miejsc potencjalnego montażu zasuw znane są koszty ich instalacji. Dodatkowo zakłada się, że znane są optymalne (lub prawie optymalne) rozmieszczenie przepływomierzy oraz obszary wycieków, które są nierozróżnialne. Zadanie optymalizacji w tym przypadku można zdefiniować następująco. Dla znanego rozmieszczenia przepływomierzy oraz dla znanych identyfikatorów obszarów nierozróżnialnych w danej grupie należy znaleźć taką konfigurację

rozmieszczenia zasuw, aby możliwe było zwiększenie dokładności lokalizacji wycieku w następstwie przymknięcia lub otwarcia wskazanych zasuw. Przyjmuje się tu ograniczenie do dwóch zasuw.

W celu przeprowadzenia procesu optymalizacji definiuje się odpowiednią macierz obrazującą różnorodność wskazań zamontowanych przepływomierzy w wyniku pojawiających się wycieków w obszarach nierozróżnialnych. W celu rozwiązania zadania optymalizacji niezbędne jest sprawdzenie konfiguracji jedno- i dwuelementowych. Liczba kombinacji jest nieduża, dlatego w tym przypadku można zastosować metodę przeszukiwania systematycznego, biorąc pod uwagę wszystkie możliwe warianty rozmieszczenia zasuw.

3. Weryfikacja metody

W dalszej części artykułu zostaną pokazane wyniki optymalizacji rozmieszczenia oprzyrządowania pomiarowego i wykonawczego dla strefy Popielów-Radziejów miasta Rybnik. Przyjęto, że sieć zostanie podzielona wstępnie na 46 obszarów oraz zasadę, że miejscem podziału strefy na obszary są węzły sieci wodociągowej. Założono również, że przepływomierze lokalizowane będą w węzłach. Następnie wytypowano w sposób losowy z rozkładem równomiernym miejsca (emiterzy) potencjalnych wycieków w predefiniowanych obszarach strefy. Podczas optymalizacji rozmieszczenia oprzyrządowania pomiarowego i wykonawczego przyjęto niski poziom wycieku równy $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Kolejnym działaniem było odpowiednie określenie pewnych i potencjalnych miejsc lokalizacji przepływomierzy na podstawie informacji pozyskanych od specjalistów z PWiK Sp. z o.o. w Rybniku. Przyjęto koszt instalacji proporcjonalny do średnicy rurociągu, na którym urządzenie ma być zamontowane. Proces optymalizacji przeprowadzano dla godzin dziennych i wieczornych ze względu na potrzebę poprawnej lokalizacji wycieków przede wszystkim w chwilach największego obciążenia sieci wodociągowej oraz w okresie największego zróżnicowania zachowań odbiorców.

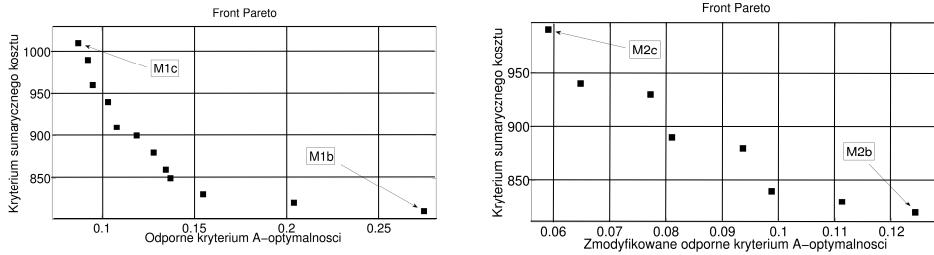
4. Wyznaczenie liczby i lokalizacji przepływomierzy

Biorąc pod uwagę wyniki badań uzyskane dla innych stref, zdecydowano, że minimalna liczba potencjalnych punktów montażu przepływomierzy brana pod uwagę podczas optymalizacji równa jest 8. Uwzględniając czynniki ekonomiczne, założono natomiast, że maksymalna liczba potencjalnych miejsc montażu przepływomierzy wynosi 25.

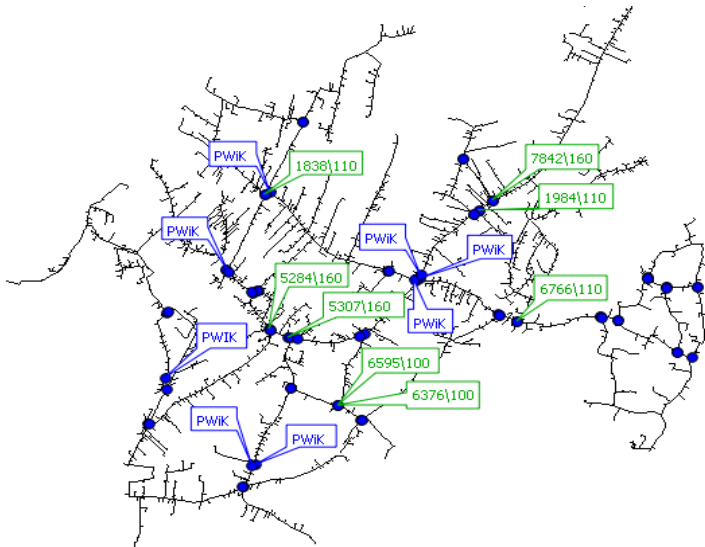
Zadanie określenia liczby i rozmieszczenia przepływomierzy rozwiązano, stosując metodę przeszukiwania bazującą na algorytmie genetycznym. Funkcję przystosowania definiowano na podstawie kryterium sumarycznego kosztu montażu urządzeń w danej konfiguracji oraz/lub kryterium wyznaczonego na bazie różnych miar niosących informację o czułości danych konfiguracji na pojawia-

jące się w różnych miejscach wycieki. Pozwoliło to na rozwiązanie zadania dla różnych wariantów oceny rozmieszczenia oprzyrządowania pomiarowego. W badaniach brano po uwagę następujące warianty kryteriów:

- wariant M1, gdzie f_s – odporne kryterium A-ptymalności, f_c – kryterium sumarycznego kosztu montażu urządzeń (funkcja przystosowania zdefiniowana w postaci skalarnej oraz w postaci wektorowej), f_d – dodatkowe kryterium wykluczające przepływomierze o bardzo niskich wartościach przepływu w strefie;
- wariant M2, gdzie f_s zmodyfikowane odporne kryterium A-ptymalności i f_c – kryterium sumarycznego kosztu montażu urządzeń (funkcja przystosowania zdefiniowana w postaci skalarnej oraz w postaci wektorowej), f_d – dodatkowe kryterium wykluczające przepływomierze o bardzo niskich wartościach przepływu w strefie.



Rys. 1. Przykładowe wyniki optymalizacji wg wariantu M1 i M2



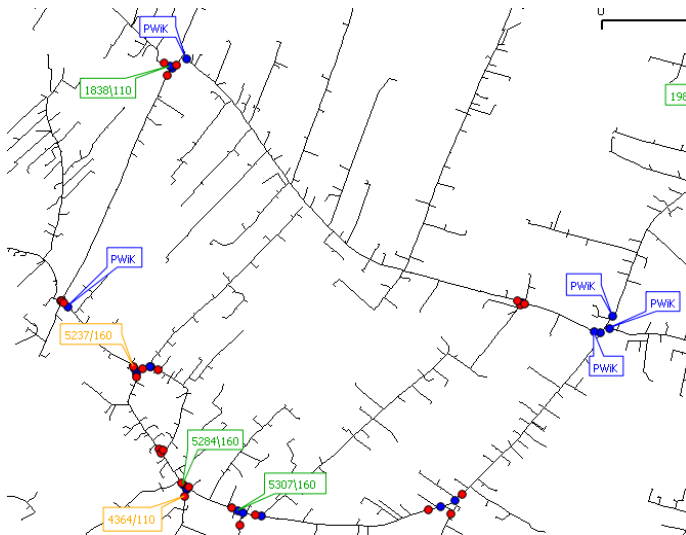
Rys. 2. Wizualizacja rozwiązania zadania optymalnego rozmieszczenia przepływomierzy dla strefy Popielów-Radziejów

W celu zminimalizowania prawdopodobieństwa osiągnięcia rozwiązania o charakterze lokalnym dla zadanych parametrów algorytmu genetycznego powtórzono kilkakrotnie obliczenia. Na rys. 1 pokazano przykładowe wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla strefy Popielów-Radziejów uzyskane z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Rysunek przedstawia Pareto-optymalne konfiguracje rozmieszczenia przepływomierzy oraz wytypowane na tej podstawie wybrane warianty miejsc ich lokalizacji.

Do dalszych badań zdecydowano się na wybranie konfiguracji M1c (rys. 1) ze względu na wysokie oceny podczas testu. Sposób weryfikacji opisano szczegółowo w pracy [8]. Na rys. 2 pokazano najlepiej ocenione podczas badań wstępnych rozlokowanie przepływomierzy wg wariantu M1c. Punktami oznaczono wszystkie możliwe lokalizacje przepływomierzy w rozważanej strefie. Miejsca pewnego montażu urządzeń pomiarowych oznaczono za pomocą komentarzy o treści PWiK. Pozostałe osiem punktów pomiarowych wytypowanych w procesie optymalizacji oznaczono komentarzami z informacją o identyfikatorze odcinka rurociągu i jego średnicy.

5. Wyznaczenie liczby i lokalizacji reduktorów ciśnienia

Biorąc pod uwagę wyniki analizy poprawności działania klasyfikatorów stanu dla strefy Popielów-Radziejów [9, 18], wskazano grupy obszarów trudno rozróżnialnych i nierozróżnialnych w rozważanej strefie. Analizy te wykorzystano w celu sformułowania warunków brzegowych do zadania optymalizacji liczby i lokalizacji rozmieszczenia reduktorów ciśnienia.



Rys. 3. Wizualizacja wytypowanych lokalizacji rozmieszczenia reduktorów ciśnienia

W porozumieniu ze specjalistami z PWiK Rybnik, wytypowane zostały potencjalne punkty montażu zasuw rekonfiguracyjnych (rys. 3) – punkty w kolorze czerwonym. Podczas optymalizacji rozważano wyłącznie kombinacje, w których możliwe jest przymknięcie/otwarcie maksymalnie dwóch zasuw jednocześnie. Na rys. 3 przedstawiono uzyskane rozmieszczenie zasuw dla rozpatrywanej grupy obszarów nierozróżnialnych nr 4 (zasuw nr 5237, 4364 zaznaczono komentarzami z informacją o koszcie montażu).

W celu wstępnej weryfikacji poprawności lokalizacji zasuw przeprowadzono symulację, podczas której rozważano wycieki w obszarach z grupy nr 4. Rozpatrywana grupa obszarów nierozróżnialnych jest specyficzna ze względu na strukturę sieci wodociągowej w tym regionie. Przyjęty podział strefy na predefiniowane obszary o numerach 6, 7, 8, 9 oraz wybór miejsc instalacji przepływomierzy wskazanych przez ekspertów z PWiK Rybnik (oznaczone poprzez komentarze o treści PWiK) i wytypowanych w procesie optymalizacji (id. 5284, 5307) pozwala uzyskać jedynie rozróżnienie wycieków w obszarze nr 7 względem wycieków w obszarach 6, 8, 9 przy zamknięciu wskazanych zasuw.

Wnioski i podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę określania konfiguracji przepływomierzy oraz reduktorów ciśnienia działających w trybie zasuw rekonfiguracyjnych, optymalnej ze względu na działanie systemu diagnostyki sieci wodociągowej. Zaprezentowane tu wyniki z prac badawczych potwierdzają poprawność zaproponowanego podejścia. W ramach realizacji projektu „*Zintegrowany, inteligentny system monitorowania i zarządzania siecią wodociągów na terenie działalności PWiK Sp. z o.o. w Rybniku*” określone zostały zarówno liczby urządzeń, jak również miejsca ich montażu. Wskazane lokalizacje urządzeń pomiarowych stanowią dane wejściowe do zadania utworzenia modeli przybliżonych oraz klasyfikatorów stanu, w którym dokonano końcowej weryfikacji zaproponowanego rozwiązania. Wyniki ilościowej oceny sprawności systemu detekcji i lokalizacji wycieków działającego w oparciu o wskazane miejsca montażu urządzeń pomiarowych i wykonawczych można znaleźć w pracach [9, 12, 18].

Przeprowadzone w tym zakresie badania optymalizacyjne oraz wstępne analizy weryfikacyjne wskazują na duży potencjał tych punktów jako źródeł informacji o stanie diagnozowanego obiektu. Podobne wnioski można wyciągnąć podczas analizy drugiej części zadania dotyczącej liczby i lokalizacji reduktorów ciśnienia. Niemniej jednak należy zauważyć, że możliwe jest zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego (ekonomicznego) punktu widzenia osiągnięcie zwiększenia stopnia rozróżnialności miejsc wycieku poprzez wykorzystanie wyłącznie urządzeń pomiarowych.

Podziękowania

Badania finansowane częściowo ze środków projektu POIG 01.04.00-24-027 pt. „Zintegrowany, inteligentny system monitorowania i zarządzania siecią wodociągów na terenie działalności PWiK Sp. z o.o. w Rybniku” oraz częściowo ze środków przeznaczonych na badania statutowe w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Autorzy dziękują Zarządowi Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Rybniku za aktywne współdziałanie przy realizacji tych zadań.

Bibliografia

1. Aral M., Guan J., Maslia M.: A multi-objective optimization algorithm for sensor placement in water distribution systems, World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'a Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008, pp. 1–11.
2. Blesa J., Puig V., Saludes J., Vento J.: Leak detection, isolation and estimation in pressurized water pipe networks using LPV models and zonotopes, The 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 2010, pp. 36–41.
3. Censor Y.: Pareto optimality in multiobjective problems, Applied Mathematics and Optimization 4(1), 1977, 41–59.
4. Farley B., Mounce S., Boxall J.: Field testing of an optimal sensor placement methodology for event detection in an urban water distribution network, Urban Water Journal 7/6, 2010, 345–356.
5. Kalyanmoy D.: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, John Wiley and Sons, 2001
6. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.): Fault diagnosis. Models, artificial intelligence, applications, Springer Berlin/Heidelberg, 2004.
7. Krause A., Leskovec J., Guestrin C., Vanbriesen J., Faloutsos C.: Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks, Journal of Water Resources Planning and Management 134/6, 2008, 516–526.
8. Moczulski W., Wyczółkowski R., Ciupke K., Tomasiak P., Wachla D., Przystała P., Wiglenda R.: Metodyka budowy systemu monitorowania wycieków w sieciach wodociągowych, Diagnostics of Processes and Systems, Zamość 2011.
9. Moczulski W., Wyczółkowski R., Ciupke K., Tomasiak P., Wachla D., Przystała P., Wiglenda R.: Metodyka budowy systemu monitorowania wycieków w sieciach wodociągowych – przykład zastosowania, Diagnostics of Processes and Systems, Zamość 2011.
10. Nicklow J., Reed P., Savic D., Dessalegne T., Harrell L., Chan-Hilton A., Karamouz M., Minsker B., Ostfeld A., Singh A., Zechman E.: State of the

- art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management, *Journal of Water Resources Planning and Management* 136/4, 2010, 412–432.
11. Preis A., Whittle A., Ostfield A.: Multi-objective sensor network placement model for integrated of hydraulic and water quality parameters, *World City Water Forum*, 2009.
 12. Przystałka P., Wyczółkowski R.: Detekcja małych wycieków w sieciach wodociągowych z zastosowaniem metody modelowania niepewności, *Diagnostics of Processes and Systems*, Zamość 2011.
 13. Puust R., Kapelan Z., Savic D., Koppel T.: A review of methods for leakage management in pipe networks, *Urban Water Journal* 7/1, 2010, 25–45.
 14. Shastri Y., Diwekar U.: Sensor placement in water networks: A stochastic programming approach, *Journal of Water Resources Planning and Management* 132/3, 2006, 192–203.
 15. Sivanandam S., Deepa S.: *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer, 2007.
 16. Sławik D.: Metody badania wrażliwości cech sygnałów diagnostycznych, *Zeszyty Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn*, z. 126, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
 17. Uciński D.: *Optimal Measurement Methods for Distributed Parameter System Identification*, CRC PRESS, 2005.
 18. Wachła D.: Metoda lokalizacji małych wycieków w sieciach wodociągowych, *Diagnostyka Procesów i Systemów*, Zamość 2011.
 19. Wu Z., Walski T.: Multi-objective optimization of sensor placement in water distribution systems, *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, pp. 1–11.

Recenzenci:
Andrzej PIECZYŃSKI
Mateusz TURKOWSKI

Sensor and actuator placement for leakage diagnosis in water distribution systems

Key words

Urban water networks, multiobjective optimisation, optimal design of experiments, systematic search, genetic algorithms.

Summary

The paper deals with a method for configuring flow meter locations and reducing valve set-up points. These positions are optimal for acquiring information that is needed for fault detection and locating small leakage points in water distribution systems. The method is based on systematic search and genetic algorithms. For both approaches, the objective/fitness function was created with the use of sensitivity measures and optimal experimental design criteria. The verification of the delineated approach was conducted for a real-world water supply network. The achieved results confirmed the correctness of the proposed method.