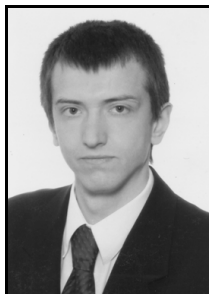


**Arkadiusz CIMIŃSKI, Kazimierz DUZINKIEWICZ, Jarosław GŁOWACKI**  
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, KATEDRA AUTOMATYKI

## Alokacja urządzeń pomiarowych hydrauliki w systemach wodociągowych w warunkach niepewności

Mgr inż. Arkadiusz CIMIŃSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w katedrze Automatyki (2005). Słuchacz Studium Doktoranckiego na tym wydziale od 2005 roku. Tematyka jego pracy wchodzi w zakres zagadnień krzepko dopuszczalnego sterowania systemami wodociągowymi oraz upraszczania i kalibracji modeli tych systemów.



e-mail: [acimin@ely.pg.gda.pl](mailto:acimin@ely.pg.gda.pl)

Dr inż. Kazimierz DUZINKIEWICZ

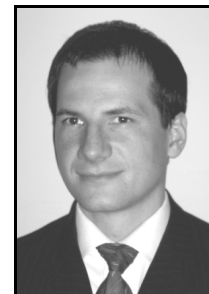
Starszy wykładowca w Katedrze Automatyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Stopień naukowy doktora uzyskuje na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w roku 1982. Dorobek naukowy obejmuje publikacje z zakresu sterowania systemami złożonymi (przemysł petrochemiczny, systemy elektroenergetyczne, systemy wodociągowo-kanalizacyjne), metody optymalizacji, analizy ryzyka dla obiektów technicznych oraz modelowanie matematyczne.



e-mail: [k.duzinkiewicz@ely.pg.gda.pl](mailto:k.duzinkiewicz@ely.pg.gda.pl)

Mgr inż. Jarosław GŁOWACKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w katedrze Automatyki (2005). Słuchacz Studium Doktoranckiego na tym wydziale od 2005 roku. Tematyka jego pracy wchodzi w zakres zagadnień upraszczania i kalibracji modeli systemów wodociągowych dla celów estymacji i sterowania oraz krzepkiej predykcji wyjść systemu wodociągowego.



W większości systemów tylko niewielka ich liczba jest dostępna pomiarowo. Powody takiej sytuacji mogą być wielorakie: brak urządzeń do pomiaru danej wielkości, wysoki koszt urządzeń pomiarowych lub niemożność zainstalowania danego urządzenia w określonym miejscu w systemie. Dla zdobycia pełnej, niezbędnej wiedzy o stanie rozważanego systemu można wykorzystać estymację (pomiar miękki). Integrując dostępne pomiary oraz modele matematyczne systemu uzyskuje się informację o niemierzonych lub/i niemierzalnych wielkościach charakteryzujących stan systemu. Proces estymacji wymaga jednak przygotowania modelu systemu z ujętym w nim w określony sposób modelem niepewności. Istotne znaczenie dla jakości estymacji ma umiejscowienie, liczba i rozlokowanie urządzeń pomiarowych odpowiednich wielkości hydraulicznych. Problemy alokacji nowych pomiarów w systemie oraz estymacji wielkości niemierzonych są ze sobą w naturalny sposób powiązane i powinny być rozwiązywane łącznie.

W artykule rozważa się problem alokacji urządzeń pomiarowych hydrauliki (pomiar ciśnienia hydraulicznego oraz natężenia przepływu wody (objętościowego natężenie przepływu)) w SW, które mają być wykorzystane do monitorowania i sterowania tym systemem. Trudności rozwiązania tego problemu wynikają głównie z rozległości SW oraz liczby możliwych kombinacji alokacji pomiarów nawet przy niewielkiej liczbie rozważanych miejsc, w których możemy umieścić pomiar. Odpowiedniego uwzględnienia w problemie estymacji wymaga niepewność związana zarówno z pomiarami, jak i strukturą modelu i jego parametrami. W systemach sieciowych, do jakich należą SW niepewność związana z estymatami może zostać istotnie zmniejszona przez odpowiednią alokację określonej liczby oraz określonej wielkości hydraulicznej. Uzyskanie jak najmniejszej niepewności związanej z estymowanymi wielkościami może być traktowane jako jeden z istotnych celów przy alokacji pewnej liczby urządzeń pomiarowych. W metodach estymacji stosowane są różne sposoby modelowania niepewności. W artykule przyjęty został przedziałowy opis niepewności zaproponowany w [1]. Estymator wykorzystujący ten sposób niepewności zaadoptowany do SW zaproponowany został w [2] a wyniki ostatnich badań w tym zakresie zostały opublikowane w [3]. W niniejszym artykule wykorzystano przedziałową reprezentację niepewności do zamodelowania przedziałów możliwej zmienności mierzonych i niemierzonych wielkości. Przy tym podejściu przez zmniejszenie niepewności estymat rozumie się zmniejszenie szerokości granic możliwej zmienności danych wielkości.

W artykule rozważa się rozlokowywanie urządzeń do pomiaru hydrauliki wykorzystujące zależności pomiędzy liczbą, rodzajem mierzonej wielkości hydraulicznej i rozmieszczeniem dodatkowych (w stosunku do istniejących w systemie) urządzeń pomiarowych a wielkością niepewności estymacji uzyskiwaną przy danej alokacji.

### Streszczenie

W artykule zaproponowana została metoda wspomagania decyzji alokacji urządzeń pomiarowych hydrauliki w systemie wodociągowym (SW) rozważana w powiązaniu z zagadnieniem estymacji wielkości niemierzonych SW oraz w warunkach korzystania z niedokładnych danych pomiarowych. Problem alokacji został sformułowany jako zagadnienie wielokryterialne, w którym składowymi wektora kryteriów są elementy rachunku kosztów tworzenia nowych punktów pomiaru oraz elementy oceny jakości estymat niemierzonych wielkości. Efektywność proponowanej metody została przetestowana symulacyjnie z wykorzystaniem danych sieci wodociągowej miasta Chojnice.

**Słowa kluczowe:** alokacja pomiarów, niepewność, systemy wodne, estymacja.

### The hydraulic sensor placement under uncertainty conditions in drinking water distribution systems

#### Abstract

The decision supporting method for hydraulic sensor placement in Drinking Water Distribution System (DWDS) considered together with unmeasured variable estimation problem and under uncertainty conditions is proposed in the paper. The sensor allocation problem was formulated as a multiobjective optimisation problem. The two types of objective functions were considered during solving this problem: quality of estimates of unmeasured variables and cost connected with a new measurement point construction. A new hybrid method which integrates a multiobjective genetic algorithm and a set bounded estimation method to solve the sensor allocation problem is proposed. The proposed method was applied to a real water network (Chojnice DWDS) and its performance was validated by simulations.

**Keywords:** sensor allocation, estimation, uncertainty, drinking water distribution systems.

### 1. Wstęp

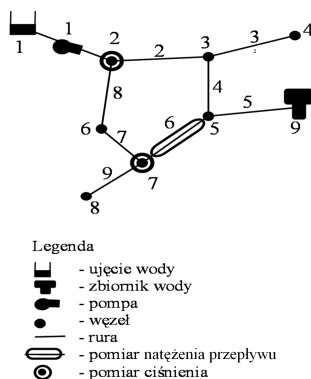
Podstawowym źródłem wiedzy o bieżącym stanie systemu, do celów sterowania i monitorowania są bezpośrednie pomiary (urządzenia pomiarowe) wielkości charakteryzujących ten system.

## 2. Charakterystyka opcji alokacji pomiarów w SW

W SW wykonywane są dwa podstawowe pomiary hydrauliczne: pomiar ciśnienia hydraulicznego oraz pomiar natężenia przepływu. Nie zmniejszając ogólności rozważań, można przyjąć, że pomiar naporu jest wykonywany w węźle sieci, zaś pomiar przepływu w elemencie połączeniowym pomiędzy tymi węzłami. Z różnych praktycznych powodów zainstalowanie urządzeń pomiarowych w dowolnym z podanych punktów jest najczęściej niemożliwe. Można wymienić następujące powody: (i) infrastruktura otoczenia - brak dostępu do źródła energii elektrycznej, (ii) bezpieczeństwo eksploatacji - możliwość uszkodzenia lub kradzieży, (iii) koszty - bardzo droga budowa studzienek pomiarowych, itd. Istnieje zatem konieczność zawężenia liczby możliwych miejsc pomiaru do pewnego podzbioru węzłów i rurociągów.

Dla danego SW można wskazać pewien skończony zbiór  $V$  możliwych miejsc alokacji pomiaru (np. zaproponowany przez ekspertów SW). Zbiór ten składa się z podzbiorów reprezentujących miejsca alokacji pomiaru ciśnienia  $V^h$  i natężenia przepływu  $V^q$ . Niech miejsce możliwej alokacji pomiaru ciśnienia będzie określone numerem identyfikacyjnym węzła sieci, a miejsce alokacji pomiaru natężenia przepływu numerem identyfikacyjnym połączenia. Nie zmniejszając ogólności rozważań możemy przyjąć, że numery identyfikacyjne przyjmują wartości kolejnych liczb całkowitych. Stąd można napisać  $V^h = \{i : i \in Z, i = \overline{1, I}\}$  oraz  $V^q = \{j : j \in Z, j = \overline{1, J}\}$ . Z tymi wektorami związane są wektory decyzyjne  $w^h = \{w_i^h : w_i^h \in \{0,1\}, i \in V^h\}$  oraz określające decyzję o alokacji  $w^q = \{w_j^q : w_j^q \in \{0,1\}, j \in V^q\}$  lub nie w danym możliwym miejscu alokacji urządzeń pomiarowych. Wektor  $W = \{w^q, w^h\}$  będziemy nazywać opcją alokacji pomiarów.

Spośród węzłów i połączeń sieci wodociągowej można wskazać te, dla których powinna być wykonywana na bieżąco estymacja związanych z nimi wielkości hydraulicznych. Niech miejsce wymaganej estymacji będzie określone w taki sam sposób jak miejsca alokowania pomiarów - za pomocą numerów identyfikacyjnych. Oznaczmy te zbiory  $E^h = \{r : r \in Z, r = \overline{1, R}\}$  oraz  $E^q = \{s : s \in Z, s = \overline{1, S}\}$ . Odpowiednio  $E^h$  oznacza zbiór punktów estymacji wartości naporu a  $E^q$  punkty estymacji wartości przepływu. Zbiór  $E = \{E^q, E^h\}$  może być wyznaczany przez ekspertów SW i określa istotne, ze względów sterowania operacyjnego i podejmowania decyzji, elementy SW, które należy monitorować. Zbiór  $E$  może w części lub w całości zawierać zbiór  $V$ . W niniejszym artykule zakłada się, że wielkości, w których jest zaalokowane urządzenie pomiarowe nie są estymowane. Graficznie miejsca alokacji na schemacie sieci są oznaczane przez zakreślenie odpowiednio do kształtu elementu (patrz rys. 1).



Rys. 1. Ilustracja miejsc alokacji pomiarów hydraulicznych  
Fig. 1. The hydraulic sensors placement in an exemplary network

## 3. Sformułowanie problemu alokacji urządzeń do pomiaru wielkości hydraulicznych

Zakup i zainstalowanie nowych urządzeń pomiarowych jest dla przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego działalnością inwestycyjną. Decyzja o wyborze do realizacji określonej opcji alokacji powinna być zatem zgodna z zasadami rachunku efektywności inwestycji. Rachunek ten bierze pod uwagę z jednej strony oszacowanie kosztów inwestycji a z drugiej prognozowane korzyści wynikające z jej realizacji. W proponowanym ujęciu miarą korzyści wynikających z powstania nowych punktów pomiarowych, jest poprawa jakości uzyskiwanej na bieżąco informacji o systemie.

W najprostszym ujęciu alokacja urządzeń pomiarowych może zostać wykonana w oparciu o heurystyczną wiedzę operatora systemu. Niemniej jednak takie podejście posiada istotne wady. Po pierwsze ilość informacji jaką operator musi przeanalizować jest tak duża, że nie jest on w stanie uwzględnić wszystkich tych informacji w procesie decyzyjnym. Po drugie kierując się regułą im więcej pomiarów tym mniejsza niepewność i na odwrót, najprawdopodobniej będzie proponował umieszczenie w sieci maksymalnej liczby urządzeń pomiarowych na jaką pozwala mu zakładana kwota wydatków na ten cel. Działanie to może prowadzić do niepotrzebnego inwestowania w kolejne urządzenia pomiarowe przy niewielkim zmniejszeniu niepewności estymat.

Celem prezentowanego algorytmu jest wybór opcji alokacji urządzeń pomiarowych, która pozwoli uzyskiwać wiedzę o systemie o akceptowalnej jakości przy jak najmniejszym określonym przez decydenta wskaźniku kosztowym, nie wyższym od zakładanej kwoty wydatków. Zatem, wybór opcji alokacji będzie następowal w oparciu o kryteria dwojakiego rodzaju: kryterium kosztowe oraz kryterium jakości informacji o systemie. Niżej zostaną podane propozycje sformułowania tych kryteriów.

W związku z pomiarami dwóch odrębnych wielkości hydraulicznych (ciśnienia i przepływu) należy rozróżnić dwa rodzaje urządzeń: pomiar ciśnienia i pomiar natężenia przepływu. Z każdym urządzeniem pomiarowym związany następujące charakteryzujące go dane [4]: (i) koszt zakupu urządzenia  $c_z^h$  lub  $c_z^q$ , odpowiednio dla urządzenia pomiaru naporu i przepływu, (ii) klasa dokładności czujnika pomiarowego  $\delta_{\%}^h$  lub  $\delta_{\%}^q$ , (iii) okres ekonomicznej eksploatacji  $T_e^h$  lub  $T_e^q$ , (iv) warunki instalowania, (v) warunki eksploatacji, itd. Warunki instalowania pozwalają określić koszty zamontowania urządzenia pomiarowego,  $c_{m,i}^h$  lub  $c_{m,j}^q$  w  $i$ -tym lub  $j$ -tym możliwym miejscu ze zbiorów odpowiednio  $V^h$  lub  $V^q$ . Warunki eksploatacji pozwalają określić koszty eksploatacyjne  $c_{e,i}^h$  lub  $c_{e,j}^q$  urządzenia umieszczonego w  $i$ -tym lub  $j$ -tym możliwym miejscu ze zbiorów odpowiednio  $V^h$  lub  $V^q$  przypadające na okres ekonomicznej eksploatacji  $T_e^h$  lub  $T_e^q$ . W formułowaniu kryteriów zagadnienia wielokryterialnego można traktować każdy z wymienionych składników kosztów jako oddzielne kryterium lub korzystać z jednego kryterium tworząc sumę nakładów na zakup, zainstalowanie i eksploatację określonego urządzenia pomiarowego. Zapisując elementy zbiorów  $W^h$  oraz  $W^q$  w postaci wektorów  $w^h$  oraz  $w^q$  możemy napisać:

$$f_z^h(w^h) = c_z^h w^h, f_m^h(w^h) = (c_m^h)^T w^h, f_e^h(w^h) = (c_e^h)^T w^h, \quad (1)$$

$$f_z^q(w^q) = c_z^q w^q, f_m^q(w^q) = (c_m^q)^T w^q, f_e^q(w^q) = (c_e^q)^T w^q, \quad (2)$$

lub

$$f_c^h(w^h) = f_z^h(w^h) + f_m^h(w^h) + f_e^h(w^h) = \left( (c_z^h)^T + (c_m^h)^T + (c_e^h)^T \right) w^h = (c^h)^T w^h, \quad (3)$$

$$f_c^q(w^q) = f_z^q(w^q) + f_m^q(w^q) + f_e^q(w^q) = \left( (c_z^q)^T + (c_m^q)^T + (c_e^q)^T \right) w^q = (c^q)^T w^q \quad (4)$$

Całkowity wskaźnik kosztowy wyboru określonej opcji alokacji pomiarów wyraża się wzorem:

$$f_c(W) = f_c^h(w^h) + f_c^q(w^q) \quad (5)$$

Całkowity wskaźnik kosztowy musi spełniać warunek dopuszczalności:

$$f_c(W) \leq f_c^{dop} \quad (6)$$

Przedziałowa estymacja niemierzonych wielkości przedstawiona w [2], [5] prowadzona na przedziale czasu  $T_m$  dostarcza danych dla sformułowania kryteriów drugiego rodzaju – kryteriów jakości informacji o systemie. Estymacja przeprowadzana jest dla określonej opcji alokacji pomiarów danej wektorem  $W$ , dla określonych warunków początkowych poziomów wody w zbiornikach  $y_0$ , dla określonych scenariuszy poboru wody w węzłach poboru  $d$ , dla określonych trajektorii sterowania pracą pomp i ustawienia zaworów  $u$ . Wynikami estymacji w przedziale czasu  $T_m$  są trajektorie estymowanych wielkości ciśnień i natężeń przepływów w postaci przedziałów ich zmienności.

Można zaproponować różne miary jakości estymowanej przedziałowej informacji o systemie oparte na odległościach trajektorii granicznych:

$$\Delta h_{\max}(W, y_0, d, u) = \max_r \max_{t \in T_m} \{h_r^g(t) - h_r^d(t)\}, \quad (7)$$

$$\Delta q_{\max}(W, y_0, d, u) = \max_s \max_{t \in T_m} \{q_s^g(t) - q_s^d(t)\}, \quad (8)$$

lub

$$\Delta h_{\sigma}(W, y_0, d, u) = \sum_r \int_{T_m} (h_r^g(t) - h_r^d(t)) dt, \quad (9)$$

$$\Delta q_{\sigma}(W, y_0, d, u) = \sum_s \int_{T_m} (q_s^g(t) - q_s^d(t)) dt. \quad (10)$$

Przedział estymacji  $T_m$  można przyjąć jako równy horyzontowi sterowania predykcyjnego stosowanemu w SW [5]. Praktycznie można w poszukiwaniu najlepszej opcji alokacji ograniczyć się do jednych reprezentatywnych wartości wielkości  $y_0$ ,  $d$ ,  $u$ . Tak też postąpiono w badaniach prezentowanych w artykule. Wartości estymat wylicza się w dyskretnych chwilach czasu przedziału  $T_m$ . Krok dyskretyzacji wynika z szybkości zmian wejść zakłócenowych SW, czyli szybkości zmian zapotrzebowania [5].

Problem alokacji miejsc pomiarowych w proponowanym ujęciu może być zapisany w postaci zadania optymalizacji sformułowanego jako:

Znajdź opcje alokacji pomiarów :

$W$

minimalizując :

1. zestaw wskaźników kosztów utworzenia nowych miejsc pomiarowych w SW (5),
2. zestaw wskaźników jakości informacji o SW (7) - (8) lub (9) - (10),

spełniając :

ograniczenia wskaźników kosztów (6) (11)

Występujące w sformułowaniu problemu alokacji kryteria są przeciwstawne. Zmniejszając liczbę alokowanych urządzeń (maleją koszty) zwiększa się przedziały niepewności estymowanych zmiennych i odwrotnie. Nie jest możliwe znalezienie jednej minimalizującej wszystkie te kryteria opcji. Możliwe jest znalezienie zbioru efektywnych rozwiązań, czyli zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. Ze zbioru tego należy wybrać opcję alokacji do realizacji.

#### 4. Metoda rozwiązania problemu alokacji

Przedstawione w poprzedniej sekcji sformułowanie zadanie alokacji (11) jest zadaniem optymalizacji wielokryterialnej ze zmiennymi binarnymi. Do rozwiązania tego zadania wykorzystano wielokryterialny algorytm genetyczny (WAG)WAG. Jako źródło danych pomiarowych (urządzenia pomiarowe) został wykorzystany symulator SW Epanet [6].

Na początku działania algorytmu losowana jest populacja początkowa, każdy osobnik w populacji reprezentuje opcję alokacji pomiarów. Kolejnym krokiem jest ocena poszczególnych osobników. Ocena dokonywana jest w oparciu o każde z kryteriów przyjęte w sformułowaniu problemu. Wartości kryteriów kosztowych mogą być obliczone wprost dla każdej opcji. Wyznaczenie wartości kryteriów jakości informacji wymaga rozwiązania zadania estymacji. Zadanie to rozwiązywane jest dla każdego z osobników reprezentującego inną propozycję rozmieszczenia urządzeń pomiarowych. Do rozwiązania zadania estymacji wykorzystano algorytm gwarantowanej przedziałowej estymacji dla wielkości hydraulicznych w SW [2], [5]. W metodzie tej górne i dolne granice niepewności poszczególnych wielkości hydraulicznych uzyskuje się poprzez rozwiązanie odpowiednio sformułowanych zadań optymalizacji (minimalizacji dla dolnych granic i maksymalizacji dla górnych granic) przy uwzględnieniu ograniczeń na niepewności pomiaru (natężenia przepływu i ciśnienia), niepewność zapotrzebowania oraz ograniczeń wynikających z modelu sieci [5]. Rozwiązanie zadania estymacji określa estymaty ciśnienia i natężenia przepływu w postaci przedziałowej.

Następnie populacja zostaje poddana działaniu operatorów genetycznych (selekcja, krzyżowanie, mutacja, elityzm) prowadzącemu do wytworzenia kolejnego pokolenia populacji. Sprawdzenie spełnienia warunku zatrzymania, albo kończy obliczenia albo prowadzi do wykonania kolejnego kroku obliczeń.

W [7] przedstawiono kilka testów porównawczych algorytmów WAG, w których najkorzystniej wypadł algorytm MGA oparty na algorytmie Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA – II). Sposób działania algorytmu NSGA – II został przedstawiony w [8]. Algorytm ten został w badaniach wykorzystany do rozwiązania problemu alokacji urządzeń pomiarowych hydrauliki w SW.

#### 5. Decyzja o alokacji

W związku z tym, iż zaproponowany algorytm alokacji urządzeń do pomiaru wielkości hydraulicznych bazuje na rozwiązywaniu wielokryterialnego zadania optymalizacji, w wyniku jego działania otrzymuje się zbiór Pareto optymalny. Wybór opcji alokacji miejsc pomiarowych do realizacji spośród opcji efektywnych wymaga ingerencji decydenta. Niżej zaproponowano metodę wyznaczenia opcji alokacji miejsc pomiarów do zrealizowania nie wymagającą ingerencji decydenta.

Dla każdego osobnika z ostatniej populacji wyznacza się względne wartości funkcji kryterialnych. Oznaczmy kryteria użyte w problemie alokacji  $f^k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , a ich wartości dla  $i$  – tej opcji z populacji końcowej  $P$   $f_i^k$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $i \in P$ , wówczas względne wartości funkcji kryterialnych oblicza się:

$$f_{wzgl,i}^k = \frac{f_i^k}{\max_{i \in P} \{f_i^k\}}, \quad k = \overline{1, K}, i \in P. \quad (12)$$

Korzystając z (12) wyznacza się dla każdego osobnika, z ostatniej populacji, względne odległości odpowiadających mu wartości funkcji kryterialnych od początku układu współrzędnych przestrzeni kryteriów:

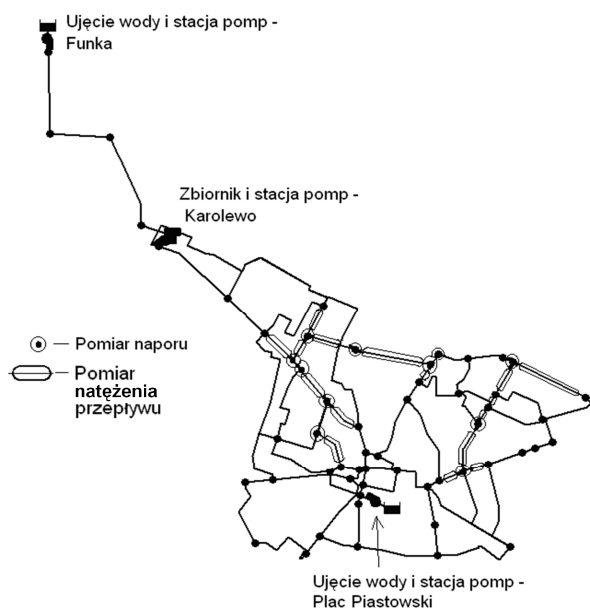
$$d_{wzgl,i} = \left( \sum_{k=1}^K (f_{wzgl,i}^k)^2 \right)^{1/2}. \quad (13)$$

Proponuje się do realizacji wybierać rozmieszczenie  $(W_*)$ , dla którego względna odległość od początku układu współrzędnych jest najmniejsza, czyli:

$$(W_*) = \arg \min_{i \in P} \{d_{wzgl,i}(W_i)\}. \quad (14)$$

## 6. Przykład wyznaczenia alokacji punktów pomiarowych

Do badań testowych proponowanego algorytmu wykorzystano model sieci wodociągowej miasta Chojnice - miasto w północno-zachodniej Polsce. Ze względu na dużą liczbę elementów występujących w tej sieci (węzłów - 177 i rur - 271) zbudowano model dla sieci uproszczonej wykorzystując metodę przedstawioną w [9]. Struktura sieci uproszczonego modelu przedstawiona została na rys. 2. Zawiera ona 56 węzłów i 83 rury, 2 rezerwuary modelujące ujęcia wody, 1 zbiornik i 7 skumulowanych odbiorców [9]. Model pełny i uproszczony są równoważne pod względem hydraulicznym, tzn. parametry hydrauliczne obydwu sieci różnią się o akceptowalny błąd przy symulacjach na zakładanym horyzoncie czasu.



Rys. 2. Dopuszczalne miejsca alokacji urządzeń pomiarowych w sieci Chojnic  
Fig. 2. The allowable hydraulic sensor locations in Chojnice network

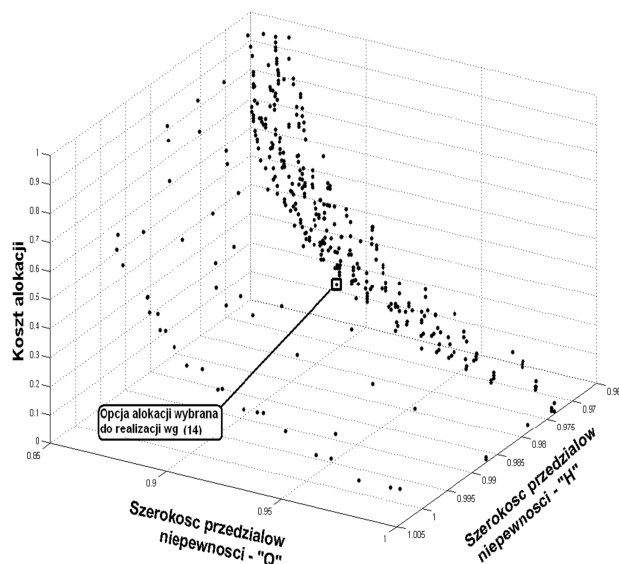
Założono, iż w sieci można umieścić pomiary i natężenia przepływu tylko w istniejących już studzienkach pomiarowych umieszczonych na głównym rurociągu w sieci. Dodatkowo założono, że pomiar natężenia przepływu można umieścić w każdym rurociągu jaka jest podłączona do danej studzienki pomiarowej. Całkowita liczba miejsc alokacji pomiaru natężenia przepływu wyniosła 17 natomiast pomiaru ciśnienia 10.

Dokładność urządzenia pomiarowego ciśnienia przyjęto (według katalogu urządzeń pomiarowych preferowanych przez decydenckiego systemu) na poziomie 2 %, a pomiaru przepływu 5 %

w całym zakresie pomiarowym. Przyjęto umowne koszty alokacji urządzenia do pomiaru napięcia 1000 j.p. a pomiaru przepływu 5000 j.p. Oprócz alokowanych pomiarów w obliczeniach uwzględniano dotychczasowe miejsca pomiaru ciśnienia i przepływu ulokowane w stacjach pompowania. Możliwe miejsca pomiarów przedstawiono na rys. 2.

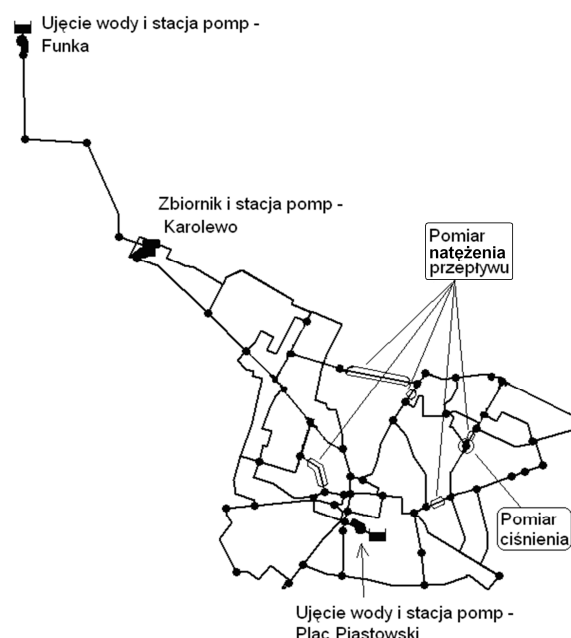
W badaniach przyjęto trzy kryteria oceny alokacji: wskaźnik (5), (9) oraz (10) oraz brak ograniczeń na koszty alokacji.

Na rys. 3 przedstawiono rozmieszczenie punktów zbioru Pareto w przestrzeni celów oraz wskazano najlepszy punkt ze zbioru Pareto wyznaczony według zależności (14).



Rys. 3. Wybór ostatecznej alokacji pomiarów  
Fig. 3. The Pareto optimal set

Wyznaczony w ten sposób najlepszy punkt zbioru Pareto odpowiada opcji alokacji przedstawionej na rys. 4, tzn. zakłada on umieszczenie w sieci pięciu urządzeń do pomiarów natężenia przepływu i jednego urządzenia do pomiarów ciśnienia.



Rys. 4. Alokalacja pomiarów w sieci dla najlepszego punktu ze zbioru Pareto  
Fig. 4. The final hydraulic sensor placement in the network for the best point of Pareto set



## 7. Podsumowanie

W artykule została przedstawiona propozycja metody wspomagającej podjęcie decyzji alokacji pomiarów hydrauliki w SW z wykorzystaniem niedokładnych danych reprezentowanych w postaci przedziałów. Metoda ta wykorzystując WAG jako optymalizator oraz przedziałowy estymator niemierzonych wielkości, jako wynik proponuje zbiór efektywnych opcji alokacji pomiarów. Zaproponowano również sposób wyznaczenia z tego zbioru rozwiązania do realizacji. Przeprowadzono testy proponowanej metody dla SW miasta Chojnice.

## 8. Literatura

- [1] F. C. Schweppe: Uncertain Dynamic Systems. Engelwood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1978.
- [2] M. A. Brdys, K. Chen: Joint state and parameter estimation of dynamic water supply systems under bounded uncertainty Integrated Computer Applications in Water Supply. Research Studies Press Ltd. And John Wiley & Sons Inc., 1, 335-355, 1996.
- [3] K. Duzinkiewicz: Set Membership Estimation of Parameters and Variables in Dynamic Networks by Recursive Algorithms with Moving Measurement Window. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol.16., No. 2, 209-217, 2006.

- [4] Pociąg U.: Procedury doboru aparatury pomiarowej do kontroli obiektów o strukturze sieciowej, Metrologia i Systemy Pomiarowe, Monografia 2, PAN Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej, Warszawa 1990.
- [5] K. Duzinkiewicz: Zintegrowane sterowanie systemami zaopatrzenia w wodę pitną. AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Kraków, 2005.
- [6] L. A. Rossman: EPANET 2 Users manual, United States Environment Protection Agency, Cincinnati, 2000.
- [7] E. Zitzler, L. Thiele, M. Laumanns, C. Fonseca, V. da Fonseca: Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review Evolutionary Computation, IEEE Transactions on evolutionary computation, Vol. 7, No. April, 2117-132, 2003.
- [8] K. Deb, T. Goel: Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithms for better convergence. Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Proceedings, 67-81, 1993.
- [9] K. Duzinkiewicz, A. Cimiński: Modelowanie sieci wodociągowych podejście do problemu szkieletyzacji. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa, 2005.

*Artykuł recenzowany*

## INFORMACJE

# Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki  
ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

## Sieci Komputerowe i Systemy Telekomunikacyjne (SKST)

### Cel Studiów

Celem studiów jest przekazanie wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych w zakresie: budowy bezpiecznych i wydajnych sieci komputerowych, konfiguracji i eksploatacji sieci komputerowych ze szczególnym uwzględnieniem sieci korporacyjnych, diagnostyki i pomiarów w sieciach komputerowych.

Zajęcia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub co drugi weekend (opcja do wyboru), przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

### Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: re2@polsl.pl lub agnieszka.skorkowska@polsl.pl, http://imeia.elekt.polsl.pl

### Kierownik studiów:

Dr hab. inż. Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI, prof. Pol. Śl.

### Profil uczestnika studiów

Studia przeznaczone są dla pracowników o różnych specjalnościach z wyższym wykształceniem o kierunku elektrycznym, elektronicznym, telekomunikacyjnym lub pokrewnym, zajmujących się bądź potencjalnie zainteresowanych administracją i eksploatacją komputerowych sieci telekomunikacyjnych.

