

# Planowanie systemu monitoringu wspomagającego zarządzanie miejską siecią wodociągową

Jan Studziński

Instytut Badań Systemowych PAN

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono algorytm planowania systemu monitoringu instalowanego na sieci wodociągowej w taki sposób, aby umożliwiał realizację określonych zadań związanych z eksploatacją sieci. Do takich zadań należą np. kalibracja modelu hydraulicznego sieci wodociągowej oraz lokalizacja awarii i ukrytych wycieków wody.

**Słowa kluczowe:** planowanie systemu monitoringu, zarządzanie siecią wodociągową, automatyczna kalibracja modelu hydraulicznego

W przedsiębiorstwach wodociągowych wprowadza się coraz powszechniej rozwiązania informatyczne wspomagające złożone procesy zarządzania. Standardem staje się już wdrażanie na sieciach wodociągowych systemów GIS do generowania map numerycznych sieci oraz systemów SCADA do monitorowania przepływów i ciśnień w wybranych punktach pomiarowych. Jednak te systemy są wdrażane niezależnie i bez koncepcji ich współpracy umożliwiającej kompleksowe zarządzanie siecią wodociągową. Aby to było możliwe, system monitoringu musi być odpowiednio skonfigurowany i sprzężony z mapą numeryczną, aby pomiary rejestrowane w trybie on-line w punktach pomiarowych były jednocześnie dostępne w bazie systemu GIS. Współpracujące ze sobą systemy GIS i SCADA mogą być podstawą do stworzenia zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego kompleksowe zarządzanie siecią wodociągową, stanowiąc źródło historycznych i aktualnych danych obliczeniowych dla programów realizujących różne zadania zarządzania, w tym w szczególności planowania inwestycyjnego, projektowania i sterowania operacyjnego siecią. W dalszym ciągu przedstawimy algorytm planowania optymalnej lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu oraz zadanie automatycznej kalibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, możliwe do wykonania dzięki takiemu systemowi.

## 1. Planowanie systemu monitoringu

Monitoring sieci wodociągowej oznacza w ogólności system komputerowy złożony z trzech podstawowych elementów: urządzeń pomiarowych do mierzenia ciśnień i przepływu wody, systemu transmisji danych z punktów pomiarowych do serwera zbierającego i archiwizującego dane pomiarowe, oraz programu wizualizacji i przetwarzania tych danych. Każdy z tych elementów ma wiele możliwości realizacji i powinien być analizowany niezależnie.

W przypadku urządzeń pomiarowych, idealny przypadek monitoringu oznacza, że w każdym węźle sieci jest zainstalowany ciśnieniomierz i w każdym odcinku sieci jest zainstalowany przepływomierz, w wyniku czego operator sieci na bieżąco otrzymuje informację o wszystkich przepływach i ciśnieniach, czyli o stanie pracy sieci. Taki przypadek monitoringu jest jednak w praktyce nie do zrealizowania ze względu na koszty. Dlatego projektując system monitoringu, należy dokonać ograniczonego wyboru punktów pomiarowych, kierując się przy tym dwoma kryterium: łącznymi kosztami montażu tych punktów i ilością informacji, które można z nich pozyskać. Jest to problem optymalizacji wielokryterialnej, przy czym pierwsze kryterium podlega minimalizacji, a drugie – maksymalizacji.

W przypadku liczenia kosztów montażu punktów pomiarowych uwzględnia się koszt aparatury pomiarowej w punkcie, czyli przepływomierza i ciśnieniomierza, koszt budowy studni umożliwiającej dostęp do rury wodociągowej oraz – w przypadku klasycznym – koszt montażu szafki pomiarowej zawierającej urządzenia zapisu i transmisji danych i szafki energetycznej zawierającej źródło zasilania elektrycznego urządzeń pomiarowych i transmisyjnych. Współcześnie system stosunkowo drogiej otwartych studni pomiarowych oraz szafek pomiarowych i energetycznych jest coraz częściej zastępowany tańszym systemem słupków pomiarowych zasilanych akumulatorowo, w których umieszczona jest aparatura transmisyjna połączona z aparaturą pomiarową zasypywaną po zainstalowaniu jej na rurze wodociągowej. Koszt jednostkowy ciśnieniomierza jest na ogół niezależny od wyboru punktu pomiarowego, natomiast koszt przepływomierza zależy w sposób istotny od średnicy rury, na której jest zamontowany. Oznacza to, że w przypadku rur o zróżnicowanych średnicach koszt montażu pojedynczego punktu pomiarowego na rurze o dużej średnicy może być większy od kosztu montażu na przykład dwóch punktów pomiarowych na rurach o małej średnicy. Stąd wynika, że aby zminimalizować koszty montażu punktów pomiarowych, należy na ogół ograniczać ich liczbę, chociaż minimalizacja kosztów montażu niekoniecznie oznacza minimalizację liczby punktów pomiarowych.

W przypadku maksymalizacji ilości informacji przekazywanych przez punkty pomiarowe, powinny one być wybrane w taki sposób, aby przekazywały wiedzę o stanie sieci wodociągowej nie tylko z danego punktu, ale również z jego dalszego otoczenia. Takie punkty wrażliwe na zmiany stanu sieci również w dużej od nich odległości, nazwiemy *punktami wrażliwymi*. Odpowiedni wybór sto-

sunkowo niewielkiej liczby punktów wrażliwych może być równoważny pod względem jakości przekazywanej wiedzy o sieci większej liczbie punktów zlokalizowanych w mniej wrażliwych miejscach sieci.

Wybór odpowiednich punktów pomiarowych do monitorowania sieci wodociągowej jest zadaniem, do rozwiązania którego można stosować algorytmy optymalizacji wielokryterialnej. Jednym z nich jest algorytm podany w [2], składający się z następujących czterech kroków:

- Wykonanie obliczeń symulacyjnych przy użyciu modelu hydraulicznego sieci wodociągowej dla stanu standardowej eksploatacji sieci: dla zadanego średniego obciążenia sieci wyznacza się ciśnienia węzłowe we wszystkich węzłach i przepływy we wszystkich odcinkach sieci.
- Wykonanie obliczeń symulacyjnych dla stanów awaryjnych sieci: przy symulowanych kolejno w każdym węzle sieci wyciekach awaryjnych, istotnie różnych od obciążenia średniego, wyznacza się nowe ciśnienia węzłowe we wszystkich węzłach i nowe przepływy we wszystkich odcinkach sieci.
- Sortowanie potencjalnych punktów pomiarowych  $m$  według malejącej wrażliwości  $S_P$  na zmiany ciśnienia i malejącej wrażliwości  $S_Q$  na zmiany przepływu:

$$S_{P_m} = \frac{\sum_{k \neq m} (\Delta p_{mk} / p_m) E_{km}}{\sum_{k \neq m} E_{km}}$$

$$S_{Q_m} = \frac{\sum_{k \neq m} (\Delta q_{mk} / q_m) E_{km}}{\sum_{k \neq m} E_{km}}$$

$$\Delta p_{mk} = |P_{mk} - p_m|, \Delta q_{mk} = |Q_{mk} - q_m|$$

$$m = 1, 2, \dots, N$$

gdzie  $p_m$ ,  $q_m$  oznaczają ciśnienie i przepływ w punkcie  $m$  dla średniego obciążenia sieci,  $P_{mk}$ ,  $Q_{mk}$  – ciśnienie i przepływ w punkcie  $m$  dla wycieku awaryjnego w punkcie  $k$ ,  $E_{km}$  – najkrótszą odległość liczoną wzdłuż odcinków sieci między punktami  $k$  i  $m$ ,  $N$  oznacza liczbę wszystkich węzłów sieci.

- Optymalizacja wielokryterialna dla wyznaczenia liczby i lokalizacji punktów pomiarowych: uwzględniając wszystkie możliwe kombinacje liczby i umiejscowienia punktów pomiarowych, wykonuje się obliczenia optymalizacji z następującymi kryteriami celu:
  - minimum liczby punktów,
  - maksimum wrażliwości lokalizacji wycieku,
  - minimum kosztów instalacji punktów pomiarowych.

W przypadku systemu transmisji danych pomiarowych mamy do czynienia z trzema możliwościami: przesyłem danych za pomocą systemu telemetrii, czyli drogą kablową, za pomocą systemu telefonii komórkowej, czyli w systemie GSM, oraz za pomocą transmisji radiowej przy użyciu radiomodemów. W przypadku łączności kablowej można korzystać z istniejącej sieci telefonii stacjonarnej lub ze specjalnie zainstalowanych światłowodów. W przypadku telefonii komórkowej przesył danych może się od-

bywać za pomocą standardowych komunikatów SMS lub za pomocą tzw. pakietowego przesyłu danych GPRS. W przypadku transmisji radiowej, dla której należy w punktach pomiarowych instalować maszty antenowe, można wybrać wariant stosunkowo niewielkiej liczby wysokich masztów widzących centralną antenę odbiorczą, zlokalizowaną w miejscu komputera zbierającego i archiwizującego dane pomiarowe lub wariant większej liczby niższych masztów, z których część stanowiłyby maszty przekaźnikowe. Każda z tych technologii charakteryzuje się innym stopniem niezawodności oraz różnymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi, stąd wybór określonego systemu transmisji danych jest w pewnym sensie również problemem optymalizacyjnym. Przedsiębiorstwa wodociągowe decydują się jednak coraz częściej na system telefonii komórkowej ze względu na jego stosunkowo niskie koszty inwestycyjne i dużą niezawodność.

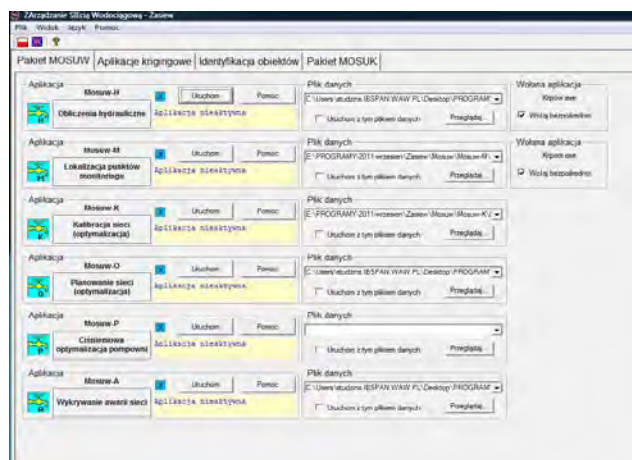
W przypadku wyboru programu wizualizacji dla systemu monitoringu sieci wodociągowej mamy do czynienia z dużą liczbą różnych programów o różnych możliwościach. Dostępne programy wizualizacji, oferowane przez różne firmy operujące na rynku polskim, to np. iFIX, InTouch, Genesis, Lookout, Wizcon, ProTool, ProconWin, WinCC i RSView.

Różne przedsiębiorstwa wodociągowe preferują różne programy, na ogół kierując się jedynie podstawowymi wymaganiami pod adresem monitoringu i ceną programu, zgodnie z wymaganiami obowiązujących procedur przetargowych. Te podstawowe wymagania, to wizualizacja danych pomiarowych i ich archiwizacja. Nie bierze się przy tym zwykle pod uwagę możliwej przyszłej rozbudowy systemu monitoringu i związanych z tym przyszłych wymagań, którym aktualnie wybrany program może nie sprostać. Te przyszłe wymagania mogą dotyczyć np. konieczności stosowania równoległe kilku różnych systemów transmisji danych, generowania różnych raportów o pomiarach dla celów badawczych lub sprawozdawczych, wykonywania różnych analiz statystycznych na podstawie zebranych pomiarów, zmiany ustalonych wcześniej kroków próbkowania oraz okresów uśredniania pomiarów, wreszcie możliwości rozbudowy systemu do odpowiednio dużej liczby punktów pomiarowych.

Dla celów badawczych i sprawozdawczych należy zwykle mieć możliwość samodzielnego pisania odpowiednich procedur narzędziowych, co oznacza, że program wizualizacji powinien dysponować własnym językiem programowania. Również nie każdy program może obsługiwać kilka kanałów transmisji danych i zwykle programy wizualizacji mają ograniczone możliwości odnośnie obsługi odpowiednio dużej liczby punktów pomiarowych. Także istotną sprawą jest posiadanie przez program wizualizacji wygodnego w obsłudze i bogatego w funkcje edytora graficznego.

W Instytucie Badań Systemowych PAN opracowano system informatyczny do wspomagania zarządzania miejską siecią wodociągową [3]. System składa się z następujących podstawowych modułów: systemu GIS generowania mapy numerycznej sieci wodociągowej, systemu SCADA monitoringu sieci, programu obsługi użytkowników sieci iBOK, oraz modułu programów obliczeń hydraulicznych,

optymalizacji, aproksymacji, sterowania i projektowania sieci wodociągowej. Wszystkie programy komunikują się ze sobą za pomocą tzw. plików buforowych. Głównym elementem systemu informatycznego jest system GIS, którego baza danych integruje wszystkie programy i jest dla nich podstawowym źródłem informacji do wykonywania obliczeń. Podstawowe zadania realizowane przez programy systemu są następujące: wizualizacja komputerowa sieci wodociągowej w postaci mapy numerycznej, monitoring sieci, obliczenia hydrauliczne sieci wodociągowej, optymalizacja sieci, optymalne projektowanie sieci przy jej rozbudowie, modernizacji i remontach, energooszczędne sterownie pompami w pompowniach i przepompowniach, wykrywanie i lokalizacja wycieków i strat wody w sieci, ustalanie racjonalnych cen wody oraz wyznaczanie wieku wody w sieci wodociągowej. Moduły zawierające system GIS, system SCADA oraz system bilingowy iBOK są produktami rynkowymi zaadaptowanymi do potrzeb systemu informatycznego. Natomiast modulem autorskim jest moduł zawierający programy obliczeń wykonujących zadania zarządzania siecią na podstawie danych dostarczanych przez mapę numeryczną, monitoring i system bilingowy. Programy te są zintegrowane za pomocą interfejsu ZASIEW (Zarządzanie SIEcią Wodociągową), posiadającego oddzielne zakładki dla programów wykonujących obliczenia hydrauliczne i optymalizacyjne sieci wodociągowej (Pakiet MOSUW) oraz grupę programów wykonujących obliczenia.



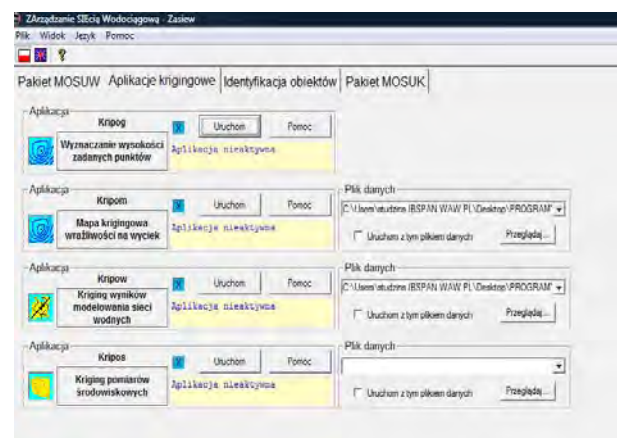
**Rys. 1.** Ekran interfejsu ZASIEW z wykazem aplikacji hydrauliczno-optymalizacyjnych

**Fig. 1.** Screen of the ZASIEW interface with the list of programs for hydraulic and optimization computing

W grupie aplikacji hydrauliczno-optymalizacyjnych systemu ZASIEW znajduje się m.in. program MOSUW-M, realizujący przedstawiony algorytm wyszukiwania punktów wrażliwych dla systemu monitoringu. Jego działanie jest zobrazowane na rys. 3, 4, 5.

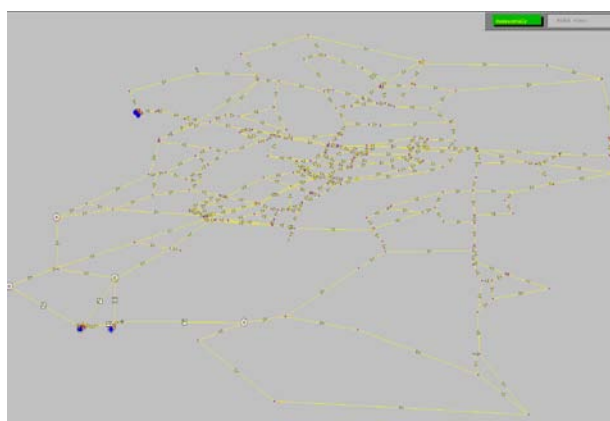
W grupie aplikacji kringingowych systemu ZASIEW znajduje się m.in. program Kripom tworzący mapy rozkładu badanego parametru za pomocą algorytmu aproksymacji kringingowej [5]. W naszym przypadku badanym parametrem jest wrażliwość sieci wodociągowej, mierzona zmianą ciśnienia i przepływu, na zmiany przepływu

w wybranym punkcie sieci. Wyniki działania programu Kripom jest zobrazowane na rys. 6, 7, 8, 9.



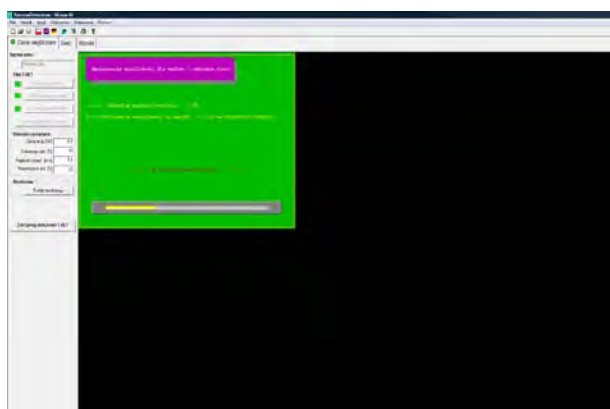
**Rys. 2.** Ekran interfejsu ZASIEW z wykazem aplikacji aproksymacyjnych

**Fig. 2.** Screen of the ZASIEW interface with the list of programs for approximation computing



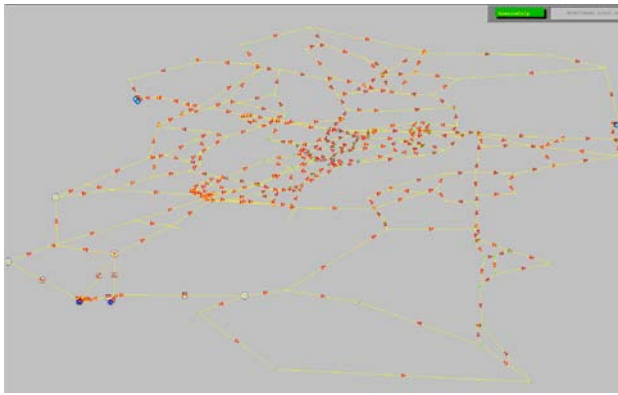
**Rys. 3.** Ekran programu MOSUW-M ze strukturą badanej sieci wodociągowej

**Fig. 3.** Screen of the MOSUW-M program with the structure of the water net investigated



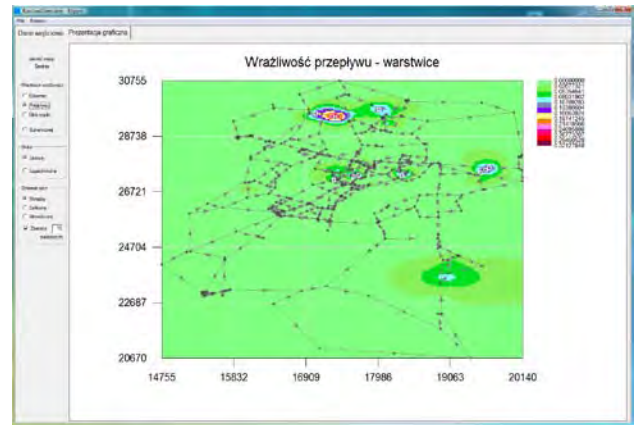
**Rys. 4.** Ekran programu MOSUW-M podczas wykonywania obliczeń symulacji awarii w kolejnych węzłach sieci wodociągowej

**Fig. 4.** Screen of the MOSUW-M program by simulating the water leaks in the subsequent nodes of the water net



**Rys. 5.** Ekran programu MOSUW-M z wynikami obliczeń hydraulicznych sieci wodociągowej

**Fig. 5.** Screen of the MOSUW-M program with the results of the water net hydraulic calculation



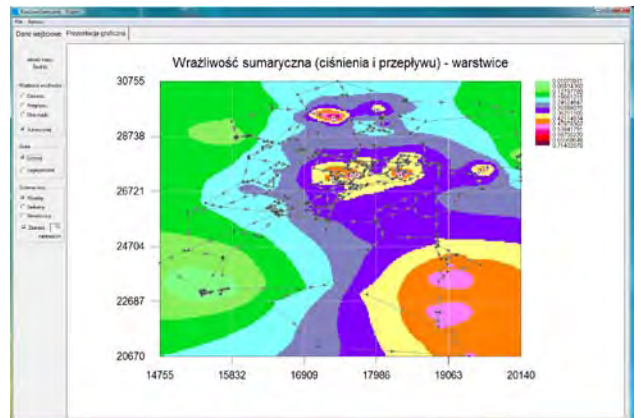
**Rys. 8.** Ekran programu Kripom z mapą krzygową wrażliwości sieci wodociągowej na zmianę przepływu

**Fig. 8.** Screen of the Kripom program with the kriging map showing the sensitivity of the water net regarding the flow changes



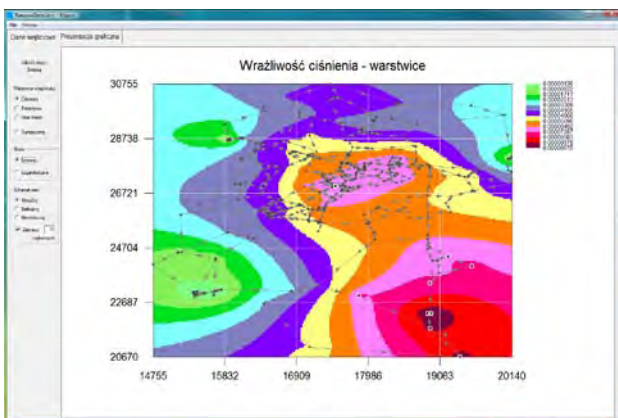
**Rys. 6.** Ekran programu Kripom ze strukturą badanej sieci wodociągowej zaimportowaną z programu MOSUW-M

**Fig. 6.** Screen of the Kripom program with the water net structure imported from the MOSUW-M program



**Rys. 9.** Ekran programu Kripom z mapą krzygową wrażliwości sieci wodociągowej na łączną zmianę ciśnienia i przepływu

**Fig. 9.** Screen of the Kripom program with the kriging map showing the sensitivity of the water net regarding the jointed pressure and flow changes



**Rys. 7.** Ekran programu Kripom z mapą krzygową wrażliwości sieci wodociągowej na zmianę ciśnienia

**Fig. 7.** Screen of the Kripom program with the kriging map showing the sensitivity of the water net regarding the pressure changes

## 2. Automatyczna kalibracja modelu hydraulicznego

Klasyczna (i zazwyczaj) realizowana funkcja monitoringu sieci wodociągowej to archiwizowanie i wizualizacja pomiarów przepływów i ciśnienia wody zbieranych w głównych punktach sieci, takich jak przepompownie strefowe i źródła wody. Jednak systemy monitoringu odpowiednio zaprojektowane mogą być używane również do innych zadań związanych bezpośrednio ze sterowaniem operacyjnym i zarządzaniem siecią wodociągową. Jednymi z takich zadań są na przykład lokalizacja awarii i ukrytych wycieków wody [5] oraz kalibracja modelu hydraulicznego sieci wodociągowej. Model hydrauliczny opisany liniowymi i nieliniowymi równaniami algebraicznymi zawiera szereg parametrów, których wartości w momencie formułowania modelu nie są dokładnie określone. Część

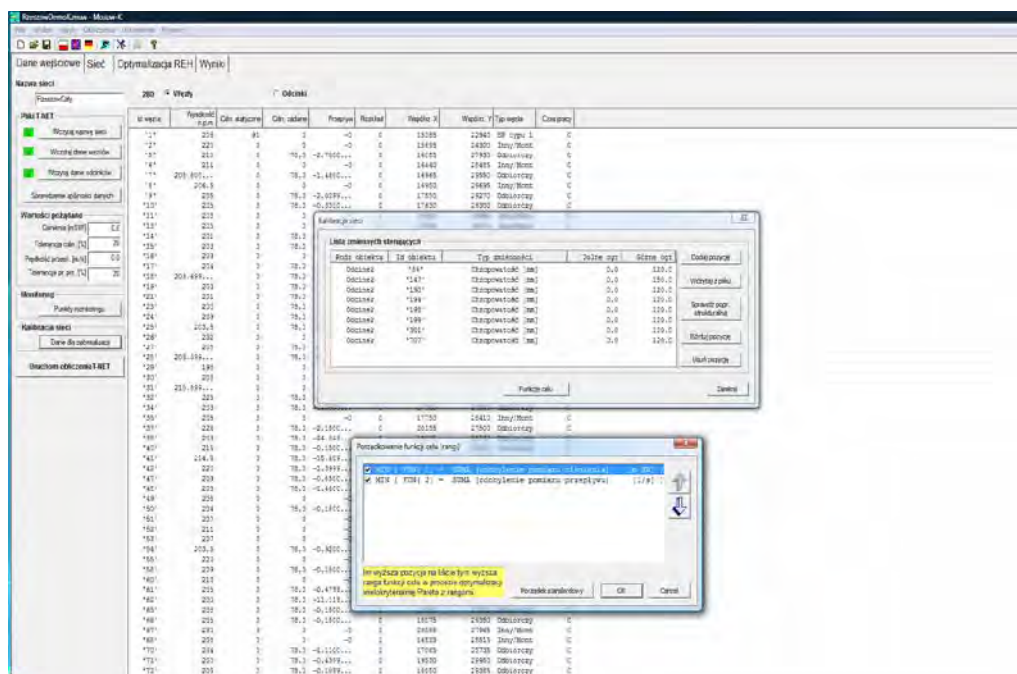
z tych parametrów, np. średnice rurociągów, można określić stosunkowo dokładnie, natomiast o wartościach innych parametrów, takich jak np. chropowatość odcinków sieci, wiadomo jedynie, że są zawarte w pewnym dopuszczalnym przedziale, i te wartości należy wyznaczyć w procesie obliczeniowym zwanym kalibracją. Zmieniając wartości nieznanymi parametrów w zadanych przedziałach i wykonując obliczenia symulacyjne modelu, oblicza się przepływy i ciśnienia w odcinkach i węzłach sieci, które porównuje się następnie z przepływami i ciśnieniami zmierzonymi w punktach pomiarowych systemu monitoringu. Jeżeli występuje zgodność wartości obliczonych i mierzonych, to przyjmuje się, że model jest poprawny i stanowi wiarygodne odzwierciedlenie badanego obiektu. Jeżeli takiej zgodności nie ma, to zmienia się, zwykle ręcznie, wartości parametrów modelu i ponownie sprawdza się jego poprawność, powtarzając te czynności do momentu uzyskania wymaganej zgodności między modelem i obiektem. Można zauważyć, że kalibracja modelu jest tym bardziej poprawna, im dysponuje się większą liczbą punktów pomiarowych monitoringu dla porównywania pomiarów z obliczeniami. Jednocześnie kalibracja nie jest czynnością jednorazową; ponieważ parametry sieci wodociągowej zmieniają się z czasem (jak na przykład chropowatość), wyznaczanie ich wartości należy okresowo powtarzać. W przypadku, gdy kalibracja modelu odbywa się w sposób ręczny, jest to bardzo żmudny i czasochłonny proces, nawet wówczas, gdy mamy rozbudowany system monitoringu. Jednak, dysponując takim systemem oraz odpowiednim algorytmem optymalizacji statycznej, można kalibrację modelu wykonać w sposób automatyczny, zamieniając zadanie kalibracji ręcznej na zadanie kalibracji automatycznej.

W grupie aplikacji hydrauliczno-optymalizacyjnych systemu ZASIEW znajduje się m.in. program MOSUW-K dokonujący identyfikacji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej na podstawie pomiarów z systemu monitoringu, zaplanowanego przy użyciu programu MOSUW-M i za pomocą algorytmu optymalizacji wielokryterialnej, z dwoma kryteriami celu. Ekran programu MOSUW-K, z edycją danych wejściowych, jest pokazany na rys. 10.

### 3. Wnioski

Powyższe rozważania wskazują, że opracowanie koncepcji systemu monitoringu, wybór punktów pomiarowych, wybór właściwego oprogramowania oraz firmy instalującej system, a także wdrożenie systemu, czyli przede wszystkim zakup sprzętu pomiarowego i wykonanie jego montażu na sieci wodociągowej, są złożonym zadaniem, realizacja którego wymaga różnorodnych kwalifikacji, odpowiedniej organizacji pracy, a także jest związana z poważnymi kosztami. Przy czym w realizację systemu powinny być zaangażowane osoby reprezentujące różne obszary wiedzy: informatycy, automatycy, programiści, matematycy, specjaliści branżowi dysponujący wiedzą i doświadczeniem z eksploatacji odnośnej sieci wodociągowej.

Niestety, zorganizowanie takiego wzorcowego zespołu w ramach danego przedsiębiorstwa wodociągowego jest bardzo trudne, kalkulowane koszty wydają się zwykle zbyt wysokie, a możliwe do uzyskania korzyści bardzo wątpliwe, jeżeli system monitoringu traktuje się jako niezależny program a nie zintegrowany z innymi programami w postaci zintegrowanego systemu informatycznego. To powoduje, że systemy monitoringu instalowane zwykle w polskich przedsiębiorstwach wodno-kanalizacyjnych są



Rys. 10. Ekran programu MOSUW-K kalibracji automatycznej sieci wodociągowej

Fig. 10. Screen of the MOSUW-K program for the water net automatic calibration

bardzo ograniczone odnośnie do liczby punktów pomiarowych i bardzo ubogie odnośnie do realizowanych przez nie zadań [1]. Dysponują one zwykle jedynie kilkoma punktami pomiarowymi, dodatkowo zainstalowanymi nie we wrażliwych, lecz w głównych punktach sieci, tzn. w punk-

tach źródłowych i w przepompowniach, czyli hydroforach strefowych, a ich zadania ograniczają się do informowania operatora sieci wodociągowej o ciśnieniach i przepływach w tych punktach.

Taki sposób informatyzacji przedsiębiorstw nie jest właściwy, tak z powodu małej użyteczności takich rozwiązań, jak i z przyczyn czysto psychologicznych i właściwym kierunkiem postępowania jest tworzenie zintegrowanych systemów informatycznych do kompleksowego zarządzania przedsiębiorstwami wodociągowymi.

## Bibliografia

1. Bogdan L., Karczmarska D., Studziński J.: *Computerization of waterworks in Poland – current state and perspective*, [w:] Studziński J., Drelichowski L., Hryniewicz O. (red.): *Applications of Informatics in Environment Engineering and Medicine*, PAS SRI, Series Systems Research, Vol. 42, Warsaw 2005, 157–169.
2. Straubel R., Holznagel B.: *Mehrkriteriale Optimierung fuer Planung und Steuerung von Trink- und Abwasser-Verbundsysteme*, „Wasser, Abwasser”, 140, Nr 3, 1999, 191–196.
3. Studziński J.: *Wspomaganie zarzadzania miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym za pomocą informacji z systemów monitoringu i mapy numerycznej*, [w:] Bojar W. (red.): *Studia i Materiały PSZW*, tom 14, PSZW Bydgoszcz 2008, 100–115.
4. Studziński J.: *Kompleksowe zarządzanie miejską siecią wodociągową w oparciu o systemy GIS, SCADA i modele matematyczne*, „Wodociągi i Kanalizacja”, 12(94)/2011, 36–39.
5. Studziński J.: *Application of kriging algorithms for solving some water nets management tasks*, [w:] Pillmann W., Schade S., Smitts P. (red.): *Innovations in Sharing Environmental Observations and Information, Part 1: Environmental Informatics*, Proceedings

of EnviroInfo Ispra 2011, Shaker Verlag, Aachen 2011, 493–488. ■

## Planning the monitoring systems supporting the communal water nets management

**Abstract:** In the paper an algorithm for planning the monitoring systems for communal water networks is described. This special planning enables designing the monitoring systems that make possible to support the water networks management and especially the operational control and planning of water nets. The exemplary tasks that can be solved using the monitoring systems properly planed are the finding out the hidden water leaks on the water net [5] and automatic calibration of the water net hydraulic model.

**Keywords:** planning the monitoring systems, water net management, automatic calibration of water net hydraulic models

### dr hab. inż. Jan Studziński

Ukończył studia techniczne na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1970 r. i studia matematyczne na Wydziale Matematyki Uniwersytetu Warszawskiego w 1977 r. Od 1970 r. pracuje w Instytucie Badań Systemowych PAN w Warszawie, gdzie w 1989 r. uzyskał stopień doktora i w 2005 r. stopień doktora habilitowanego. Kieruje tam Centrum Zastosowań Informatyki w Inżynierii Środowiska. Jest prezesem Fundacji Krzewienia Nauk Systemowych Polskiej Akademii Nauk.

e-mail: [studzins@ibspan.waw.pl](mailto:studzins@ibspan.waw.pl)

