



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

BADANIA SYSTEMOWE

Inżynieria Środowiska

**BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW
ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA
W WODĘ**

Janusz Rak

Barbara Tchórzewska-Cieślak

Jan Studziński

Warszawa 2013



**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Seria: BADANIA SYSTEMOWE

Tom 72

**Redaktor naukowy:
Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum**

Warszawa 2013

Rada redakcyjna serii: **BADANIA SYSTEMOWE**
Inżynieria Środowiska

Prof. Olgierd Hryniewicz - przewodniczący

Prof. Jakub Gutenbaum – redaktor naczelny

Prof. Janusz Kacprzyk

Prof. Tadeusz Kaczorek

Prof. Roman Kulikowski

Prof. Marek Libura

Prof. Krzysztof Malinowski

Prof. Zbigniew Nahorski

Prof. Marek Niezgódka

Prof. Roman Słowiński

Prof. Jan Studziński

Prof. Stanisław Walukiewicz

Prof. Andrzej Weryński

Prof. Antoni Żochowski



**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Janusz Rak

Barbara Tchórzewska-Cieślak

Jan Studziński

**BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW
ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA
W WODĘ**

Warszawa 2013

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN
Warszawa 2013

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. Janusz R. Rak

Politechnika Rzeszowska
rakjan@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Barbara Tchórzewska-Cieślak

Politechnika Rzeszowska
cbarbara@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Jan Studziński

IBS PAN Warszawa
studzins@ibspan.waw.pl

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Janusz Łomotowski

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Dr hab. inż. Izabela Zimoch

Politechnika Śląska w Gliwicach

Skład: Aneta M. Pielak

Wydawca:

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk
Newelska 6, 01-447 Warszawa
www.ibspan.waw.pl

*Publikacja wydana ze środków projektów rozwojowych
Narodowego Centrum Badań i Rozwoju
nr NR 14-0006-10/2010 oraz NR 14-0011-10/2010*

ISSN 0208-8029

ISBN 83-894-7549-9

17. Systemy ICT wspomagające niezawodność i bezpieczeństwo miejskich systemów zaopatrzenia w wodę

17.1. Przesłanki wdrażania analizy systemowej do zarządzania SZZW

Inną formą oceny zagrożeń w funkcjonowaniu miejskich systemów wodociągowych oraz działań zaradczych, zwiększających ich niezawodność i bezpieczeństwo, niż forma zaproponowana w poprzednich rozdziałach, jest wykorzystanie do tego celu narzędzi analizy systemowej (Hryniewicz, Studziński, 2000). Badany system traktuje się w tym podejściu jako pewien proces z określonymi sygnałami wejściowymi i wyjściowymi, powiązany ze sobą pewnym operatorem, który może być liniowy lub nieliniowy, statyczny lub dynamiczny, deterministyczny lub stochastyczny, i na tej podstawie tworzy się model matematyczny systemu. Wszystkie działania związane z analizą systemu i opracowywaniem i testowaniem algorytmów mających na celu optymalizację jego funkcjonowania prowadzi się następnie przy użyciu tego modelu, który w obliczeniach zastępuje system rzeczywisty. Takie działania są szybsze, prostsze i bezpieczniejsze dla badanego systemu, niż działania wykonywane bezpośrednio na nim, nie narażając systemu na możliwe zakłócenia lub szkody spowodowane zastosowaniem w praktyce nowo opracowanych i nie sprawdzonych dokładnie algorytmów, które przenosi się do praktyki eksploatacyjnej dopiero po ich przetestowaniu za pomocą modelu. W ten sposób model matematyczny badanego systemu jest pewnym narzędziem stosowanym dopóty, dopóki opracowane algorytmy obliczeniowe nie dowiodą swojej przydatności na podstawie badań symulacyjnych. Warunkiem powodzenia takich działań jest stworzenie modelu, który za pomocą swoich równań dobrze odwzorowuje badany system, opracowanie algorytmu obliczeniowego, który umożliwia dokładną symulację komputerową modelu, oraz opracowanie lub dobór takiego algorytmu identyfikacji modelu, który dobrze dopasuje model do systemu na podstawie odpowiednio zebranych danych pomiarowych. Oznacza to, że aby otrzymać poprawne narzędzie, które w obliczeniach zastąpi w sposób wiarygodny badany system, należy zrealizować kolejno cztery etapy badawcze: sformułowanie postaci modelu, jego symulację komputerową, zebranie danych pomiarowych do identyfikacji i identyfikację (względnie kalibrację) modelu. Przy czym przez identyfikację rozumie się estymację parametrów modelu prowadzoną w sposób automatyczny,

zwykle za pomocą metod optymalizacji statycznej, natomiast przez kalibrację rozumie się dobór wartości parametrów modelu w sposób ręczny i weryfikację poprawności tego doboru za pomocą powtarzanych obliczeń symulacyjnych. Jednocześnie, aby móc wykonywać obliczenia komputerowe, należy opracowany model matematyczny oraz algorytmy jego symulacji i identyfikacji oprogramować.

Widać z tego, że zastosowanie narzędzi analizy systemowej do badania niezawodności i bezpieczeństwa systemów wodociągowych jest procesem złożonym, czasochłonnym i również dosyć skomplikowanym ze względów organizacyjnych. Wymaga ono bowiem zorganizowania zespołu interdyscyplinarnego złożonego z matematyków, automatyków i informatyków, którzy zajmą się opracowaniem oraz testowaniem odpowiednich algorytmów i programów oraz następnie wykonywaniem obliczeń symulacyjnych, identyfikacyjnych i optymalizacyjnych, czyli tych, które są ostatecznym celem badań i dla wykonania których w ogóle tworzy się model matematyczny systemu. Dodatkowo, dla pozyskania danych pomiarowych niezbędnych do automatycznej identyfikacji względnie ręcznej kalibracji modelu, jest konieczna dobra współpraca zespołu prowadzącego badania z pracownikami badanego obiektu, w omawianym przypadku – przedsiębiorstwa wodociągowego. To wszystko generuje koszty, tak po stronie przedsiębiorstwa, jak i po stronie zaangażowanej w badania jednostki naukowej. W Polsce przedsiębiorstwa wodociągowe są w większości komunalne i zwykle nie dysponują środkami, aby sfinansować badania o tak złożonym i kompleksowym charakterze. Podobnie problemy finansowe mają krajowe uczelnie i instytuty badawcze, zdane w takiej sytuacji na pomoc państwa w postaci programów badawczych o charakterze aplikacyjnym, organizowanych obecnie przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w Warszawie. Ponadto, ponieważ badania tego rodzaju mają charakter innowacyjny, to znaczy polegają nie tyle na zastosowaniu w praktyce gotowych narzędzi analizy systemowej, co na ich opracowaniu, przetestowaniu i dopiero później wdrożeniu, to zauważa się po stronie zarządów przedsiębiorstw wodociągowych pewną niechęć do realizacji kosztownych i czasochłonnnych przedsięwzięć badawczych, spowodowaną niepewnością odnośnie spodziewanych efektów eksploatacyjnych i korzyści finansowych.

To wszystko powoduje, że chociaż dostępny aparat matematyczny analizy systemowej umożliwia rozwiązywanie problemów związanych z niezawodnością i bezpieczeństwem systemów wodociągowych i jednocześnie użycie tego aparatu jest bezpieczne i w dużym stopniu gwarantuje uzyskiwanie oczekiwanych wyników, to jego zastosowanie w praktyce jest bardzo rzadkie i jeżeli do niego dochodzi, to zwykle w bardzo ograniczonym i cząstkowym zakresie. Kompleksowe podejście do rozwiązywania tych problemów wymaga, aby w przedsiębiorstwie wodociągowym został zainstalowany na sieci wodociągowej system GIS (*Geographi-*

cal Information System), system SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) i model hydrauliczny, które służą następnie jako źródła danych dla algorytmów optymalizacyjnych i aproksymacyjnych rozwiązujących zagadnienia bezpieczeństwa (Studziński, 2012c, 2013a). Podejście cząstkowe skutkuje zainstalowaniem na sieci wodociągowej zwykle pojedynczego programu, na przykład systemu GIS lub systemu monitoringu (SCADA) (Studziński, 2012d), co zmniejsza koszty i oczywiście przynosi także pewne pozytywne wyniki, jednak są one ograniczone, ponieważ brak innych programów i współpracy między nimi nie wywołuje pożądanego efektu synergii.

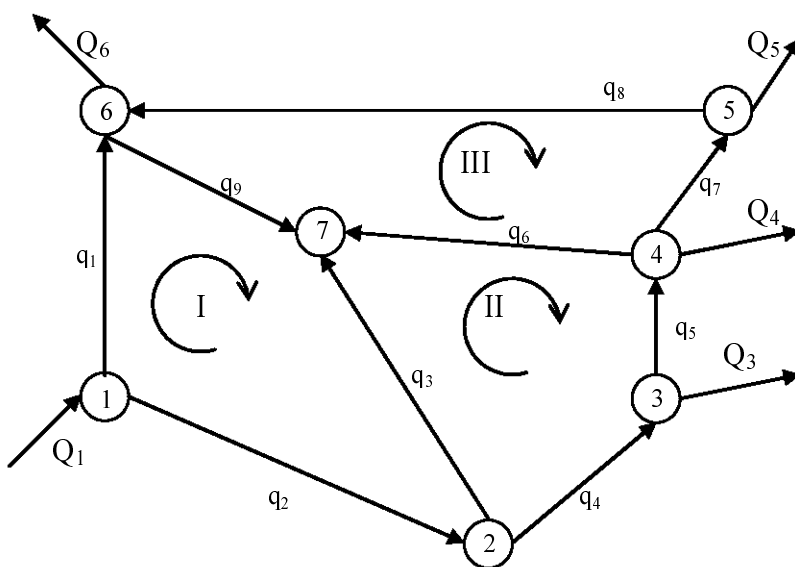
W dalszym ciągu rozdziału zostanie omówiona problematyka wyznaczania modelu hydraulicznego sieci wodociągowej jako jednego z podstawowych źródeł informacji, obok systemu SCADA, o stanie pracy sieci i jednocześnie podstawowego narzędzia przy opracowywaniu algorytmów wpływających na wzrost niezawodności i bezpieczeństwa sieci wodociągowej, następnie zostanie przedstawiona koncepcja zintegrowanego systemu informatycznego (systemu ICT - *Information and Communication Technology*) wspomagającego i usprawniającego kompleksowe zarządzanie miejskim systemem zaopatrzenia w wodę za pomocą modelowania matematycznego i optymalizacji oraz zostaną omówione podstawowe algorytmy działające w ramach takiego systemu.

17.2. Podstawy hydrauliczne modeli sieci wodociągowych

- **Model hydrauliczny**

Podstawowym modelem w systemie zarządzania siecią wodociągową jest model hydrauliczny do obliczania przepływów i ciśnień wody w sieci. Model ten jest opisany liniowymi i nieliniowymi równaniami algebraicznymi, podobnymi do równań opisujących bilanse natężeń i napięć prądów w sieciach elektrycznych i wynikających z I i II *prawa Kirchhoffa* znanych z elektrotechniki (Todini, Pilati, 1987). Dla sformułowania równań modelu należy zadać strukturę sieci wodociągowej oraz charakterystyki obiektów aparaturowych znajdujących się w sieci. Sieć składa się z węzłów i odcinków, czyli zadanie jej struktury polega na podaniu współrzędnych przestrzennych węzłów, ich typów oraz długości i średnic odcinków. Podstawowe typy węzłów, to węzły zasilające sieć, węzły odbiorcze oraz węzły montażowe. Z kolei podstawowe obiekty aparaturowe sieci wodociągowej, to zasuw, zawory zwrotne, reduktory ciśnienia, zbiorniki wyrównawcze, układy pompowe w węzłach zasilających na wejściu sieci i w hydroforniach (przepompowniach strefowych) umieszczonych wewnątrz sieci. Dodatkowe niezbędne dane,

to wartości rozbiorów wody w węzłach odbiorczych na wyjściu sieci. Sieci wodociągowe są sieciami ciśnieniowymi. Przepływ wody w odcinku sieci następuje pod wpływem różnicy ciśnień między dwoma sąsiednimi węzłami, zaś prędkość przepływu zależy od ilości przenoszonej wody i średnicy rury. Przepływ wody powoduje spadek ciśnienia wzdłuż rury, zależny od prędkości wody i szorstkości materiału, z którego rura jest wykonana. Dla wykonania obliczeń hydraulicznych sieci należy mieć określone średnice i długości rur, współczynniki szorstkości materiałowej w rurach oraz wymagane wartości ciśnień w węzłach odbiorczych.



Rys. 17.1. Przykładowy schemat sieci wodociągowej.

Poglądowy przykład sieci wodociągowej jest pokazany na rys. 17.1 Składa się ona z $K=7$ węzłów, $R=9$ odcinków i $S=3$ pierścieni. Przy tym węzeł 1 jest zasilający, węzły 3, 4, 5, 6 są odbiorcze i węzły 2, 7 są montażowe. Q_1 oznacza dopływ wody do sieci, natomiast Q_3 do Q_6 oznaczają zadane rozbiory wody w węzłach odbiorczych. Na rysunku zaznaczono także sugerowane kierunki przepływu wody w odcinkach sieci oraz szukane wartości przepływów q_i , $i=1, \dots, 9$. Zadaniem modelu jest obliczenie wartości przepływów w R odcinkach sieci i ciśnień wody w K węzłach.

Znając liczbę węzłów, odcinków i pierścieni sieci można wyznaczyć liczbę szukanych niewiadomych modelu

$$N = K + R = 2K + S - 1 = 16$$

gdzie

$$R = K + S - 1$$

W tym celu należy sformułować odpowiedni układ N równań modelu. Na podstawie I *prawa Kirchhoffa* formułuje się dla K węzłów K liniowych równań algebraicznych do obliczania przepływów wody z ich bilansów węzłowych. W rezultacie otrzymuje się układ równań, których liczba jest mniejsza od liczby niewiadomych. Dzieje się tak w przypadku sieci pierścieniowych, w których liczba węzłów jest zawsze mniejsza od liczby odcinków. Część dodatkowych równań otrzymuje się na podstawie II *prawa Kirchhoffa*, formułując dla S pierścieni S nieliniowych równań algebraicznych do obliczania przepływów wody w odcinkach pierścieni z bilansów ciśnień w pierścieniach. Zgodnie z tym prawem suma wszystkich spadków ciśnienia występujących w danym pierścieniu (oczku) jest równa zero. Nowe równania sformułowane dla sieci wodociągowej są nieliniowe, co różni je od równań używanych w elektrotechnice, które są również liniowe. Ta różnica utrudnia obliczanie sieci wodnych w porównaniu z sieciami elektrycznymi. Brakujące $(K-1)$ równań formułuje się na podstawie znanego z mechaniki płynów *równania Bernoulliego*. Są to liniowe równania algebraiczne do obliczania ciśnień w $(K-1)$ węzłach sieci. Ostatecznie liczba sformułowanych równań modelu wynosi

$$K + S + K - 1 = N$$

co umożliwi obliczenie N szukanych niewiadomych.

Można zauważyć, że sformułowanie modelu matematycznego dla dowolnej sieci wodociągowej nie jest sprawą trudną a istotne trudności występują dopiero przy obliczaniu sieci, co jest spowodowane wielką na ogół liczą równań w przypadku miejskich sieci wodociągowych, i nieliniowością tych równań.

Ostatecznie, równania modelu dla schematu sieci z rys. 17.1 są następujące:

- K równań z I prawa Kirchhoffa:

$$\begin{aligned}
 \text{Węzeł 1:} & \quad Q_1 - q_1 - q_2 = 0 \\
 \text{Węzeł 2:} & \quad q_1 - q_3 - q_4 = 0 \\
 \text{Węzeł 3:} & \quad q_4 - q_5 - Q_3 = 0 \\
 \text{Węzeł 4:} & \quad q_5 - q_6 - q_7 - Q_4 = 0 \\
 \text{Węzeł 5:} & \quad q_7 - q_8 - Q_5 = 0 \\
 \text{Węzeł 6:} & \quad q_1 + q_8 - q_9 - Q_6 = 0 \\
 \text{Węzeł 7:} & \quad q_3 + q_6 + q_9 = 0
 \end{aligned} \tag{17.1}$$

- S równań z II prawa Kirchhoffa:

$$\begin{aligned}
 \text{Pierścień 1:} & \quad h_{11} + h_{19} - h_{13} - h_{12} = 0 \\
 \text{Pierścień 2:} & \quad h_{13} - h_{16} - h_{15} - h_{14} = 0 \\
 \text{Pierścień 3:} & \quad h_{16} - h_{19} - h_{18} - h_{17} = 0
 \end{aligned} \tag{17.2}$$

gdzie h_i oznacza spadek ciśnienia wody wzdłuż odcinka i w danym pierścieniu.

Przy tym istnieje w mechanice płynów następujący wzór *Darcy-Weisbacha* do obliczania spadku ciśnienia wody płynącej w rurze (odcinku sieci)

$$h_i = \frac{\lambda l v^2}{2gD} \tag{17.3}$$

gdzie: λ – współczynnik tarcia, q – natężenie przepływu, g – przyspieszenie ziemskie, l – długość rury i D – jej średnica. Natężenie przepływu zastępuje się zwykle prędkością wody według wzoru

$$v = \frac{4q}{\pi D^2} \tag{17.4}$$

Postać *równania Bernoulliego* wiążącego przepływ wody z ciśnieniem w określonym punkcie rury jest następująca

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + H = const \tag{17.5}$$

gdzie p oznacza ciśnienie statyczne wody i H jest wysokością punktu, w którym mierzy się przepływ i ciśnienie.

Dla dwóch połączonych rurą węzłów sieci i oraz $(i+1)$ znajdujących się na różnych wysokościach, przy czym $v_i=v_{i+1}$, zachodzą na podstawie (17.5) zależności:

$$p_{i+1} + H_{i+1}^\gamma = p_i + H_i^\gamma \quad (17.6)$$

$$p_{i+1} = p_i + (H_i - H_{i+1})^\gamma \quad (17.7)$$

Równanie (17.7) obowiązuje w przypadku idealnym, gdy w rurze nie występują straty (spadek) ciśnienia h_i w wyniku tarcia wody o ścianki rury. W przypadku występowania takiego spadku ciśnienia określonego wzorem (17.3), równanie (17.7) przybierze postać

$$p_{i+1} = p_i + (H_i - H_{i+1})^\gamma - h_{ii} \quad (17.8)$$

Zastępując w (8) ciśnienie statyczne p_i ciśnieniem całkowitym

$$P_i = p_i + H_i^\gamma \quad (17.9)$$

otrzymujemy ostatecznie z (17.8)

$$P_{i+1} = P_i - h_{ii} \quad (17.10)$$

Na podstawie (17.10) można obecnie napisać $(K-1)$ brakujących równań modelu sieci:

- $(K-1)$ równań z równania Bernoulliego:

$$\text{Węzeł } i \ (i = 2, \dots, 7): \quad P_i = P_{i-1} - h_{ii} \quad (17.11)$$

We wzorze (17.4) występuje współczynnik tarcia λ , który opisuje się w obliczeniach hydraulicznych różnymi wzorami. Zależy on w ogólności od liczby *Reynoldsa* Re oraz od współczynnika szorstkości (chropowatości) materiału rury k , wprowadzonego do mechaniki płynów przez *Nikuradsego*. Liczbę *Reynoldsa* oblicza się ze wzoru

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

gdzie ν oznacza lepkość kinematyczną wody, równą $0,0131 \text{ cm}^2/\text{s}$ dla temperatury wody równej 10°C . Wynika z tego, że współczynnik tarcia λ jest funkcją parametrów ν , k , D , przy czym nie jest niestety znana ogólna postać tej funkcji. Istnieje w literaturze kilkanaście różnych zależności do obliczania λ , wyznaczonych w sposób doświadczalny i wybieranych w zależności od sytuacji i arbitralnego wyboru użytkownika. Jedną z nich zaproponował *Nikuradse* i ma ona postać

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \log \frac{D}{k} + 1,14\right)^2} \quad (17.12)$$

Przyjmuje się przy tym, że wzór (17.12) jest spełniony dla całego przedziału wartości liczby *Reynoldsa* i dlatego nie występuje w nim prędkość wody v . Wartości współczynnika szorstkości k są stabilizowane i można je znaleźć w odpowiedniej literaturze.

- **Problemy obliczeniowe modelu hydraulicznego**

Przy rozwiązywaniu równań modelu hydraulicznego napotyka się na dwa problemy obliczeniowe: pierwszy jest związany z *wyborem kombinacji pierścieni* w sieci do formułowania równań (17.2) oraz drugi jest związany z *wyborem algorytmu rozwiązywania układu równań* (17.1), (17.2), (17.11).

Wybór kombinacji pierścieni do obliczeń istotnie wpływa na otrzymywane wyniki, przy czym liczba możliwych kombinacji rośnie wykładniczo z liczbą pierścieni (*liczba kombinacji* = $f(n^n)$ dla n oznaczającego liczbę pierścieni). Jedną z możliwości uniknięcia błędów obliczeniowych wynikających z wyboru niewłaściwej kombinacji pierścieni jest formułowanie układu równań modelu uwzględniającego wszystkie kombinacje, jednak jest to sposób ogromnie wydłużający czas obliczeń. Wspomniane błędy obliczeniowe są wynikiem quasi-osobliwości macierzy tworzonej w formułowanym układzie równań. Oznacza to, że część kolumn tej macierzy jest bliska liniowej zależności, czyli macierz jest źle uwarunkowana (Björck, Dahlquist, 1979). Dla układów równań z takimi macierzami nawet bardzo małe różnice w wartościach pojedynczych elementów macierzy mają ogromny wpływ na wyniki rozwiązania tych układów (Engeln-Müllges i Reutter, 1985), co widać na poniższym przykładzie:

Przykład: Mamy dwa układy równań identyczne z dokładnością do jednego elementu macierzy układu, przy czym różnica w wartościach tego elementu jest znikoma na poziomie 0,3 %:

$$\text{Układ 1: } \begin{pmatrix} 3.3 & 1.2 \\ 6.9 & 2.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 2.7 \end{pmatrix}$$

$$\text{Układ 2: } \begin{pmatrix} 3.31 & 1.2 \\ 6.9 & 2.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 2.7 \end{pmatrix}$$

Mimo tego różnice w rozwiązaniach obu układów są już bardzo duże:

$$\text{Rozwiązanie układu 1: } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.3333333333 \\ -44 \end{pmatrix}$$

$$\text{Rozwiązanie układu 2: } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 98 \\ -269.4 \end{pmatrix}$$

Uniknięcie tej sytuacji jest możliwe poprzez wybór takiej kombinacji pierścieni przy formułowaniu układu równań, która minimalizuje liczbę składników w równaniach (17.2). Dla przykładu sieci z rys. 7.1 taką minimalną kombinację tworzą pierścienie (I, II, III), natomiast nie spełniają tego warunku kombinacje (I, II, II-III), (II, III, I-II), (I, III, I-II-III) itp.

Odnosnie wyboru algorytmu rozwiązywania układu równań modelu najprostszym sposobem jest jednoczesne rozwiązywanie wszystkich równań (17.1), (17.2), (17.11) traktowanych jako układ algebraicznych równań nieliniowych. Można do tego celu użyć na przykład metody *Newtona-Raphsona*. Ten sposób nie jest jednak korzystny ze względu na długie czasy obliczeń dla dużych sieci wodociągowych. Dlatego innym sposobem może być rozdzielenie równań przepływu (17.1), (17.2) od równań ciśnień (17.11) i niezależne obliczanie obu niewiadomych z dwóch niezależnych układów równań. Przy tym układ (17.1–17.2) jest nieliniowy względem przepływów a układ (17.11) jest liniowy względem ciśnień. W rezultacie otrzymuje się dwa mniejsze zadania obliczeniowe zamiast jednego dużego a do rozwiązania układu (17.1–17.2) można ponownie użyć metody *Newtona-Raphsona*. Modyfikacją tego sposobu postępowania jest rozbicie układu równań (17.1–17.2) na dwa oddzielne układy: liniowy (17.1) i nieliniowy (17.2), i rozwiązywanie ich w sposób relaksacyjny, to znaczy naprzemienne rozwiązywanie każdego układu przy ustalonych wartościach zmiennych z drugiego układu. Do rozwiązywania równań liniowych można stosować algorytmy *Gaussa* lub *Cholesky'ego*, natomiast równania nieliniowe można ponownie rozwiązywać algorytmem *Newtona-Raphsona*. Wadą tego sposobu postępowania i również jego mody-

fikacji są w dalszym ciągu długie czasy obliczeń algorytmu *Newtona-Raphsona* i również wolna zbieżność algorytmu relaksacji.

Dlatego do obliczania sieci wodociągowych stosuje się także algorytmy specjalizowane oparte na pomysłach rozdziału odcinków sieci (rur) na dwie grupy: należące do pierścieni oraz znajdujące się poza pierścieniami. Wtedy wszystkie przepływy w odcinkach pozapierścieniowych oblicza się z układu równań liniowych (17.1), natomiast przepływy pierścieniowe oblicza się z układu równań nieliniowych (17.2). W ten sposób obie grupy przepływów oblicza się oddzielnie, mając każdorazowo do czynienia ze stosunkowo małymi i prostymi zadaniami obliczeniowymi. Po obliczeniu przepływów wyznacza się ciśnienia w węzłach sieci, rozwiązując pojedynczo równania liniowe (17.11). Do rozwiązywania równań liniowych (17.1) można stosować wspomniane algorytmy *Gaussa* lub *Cholesky'ego*, natomiast do rozwiązania równań nieliniowych (17.2) stosuje się specjalne algorytmy iteracyjne, na przykład algorytm *Crossa*, charakteryzujący się dobrą zbieżnością i dużą szybkością. Zaletą tego sposobu postępowania jest podział dużego zadania początkowego na trzy mniejsze zadania rozwiązywane niezależnie, co znacznie upraszcza i przyspiesza obliczenia.

Reasumując, można wyróżnić następujące sposoby rozwiązywania modelu hydraulicznego sieci wodociągowej:

- Jednoczesne rozwiązywanie całego układu równań modelu traktowanego jako układ nieliniowych równań algebraicznych.
 - Oddzielne obliczanie przepływów i ciśnień w sieci, przy czym wszystkie przepływy oblicza się z jednego układu nieliniowych równań algebraicznych.
 - Oddzielne obliczanie przepływów i ciśnień w sieci, przy czym przepływy oblicza się relaksacyjnie z dwóch układów równań algebraicznych, liniowego i nieliniowego.
 - Oddzielne obliczanie przepływów i ciśnień w sieci, przy czym przepływy oblicza się z dwóch rozwiązywanych niezależnie układów równań algebraicznych, liniowego i nieliniowego.
- ***Algorytm numeryczny Crossa obliczania modelu hydraulicznego***

Algorytm *Crossa* jest elementem algorytmu obliczania modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, w którym wyjściowy układ równań dzieli się na trzy podukłady rozwiązywane niezależnie, przy czym w sposób specjalny rozwiązuje

się układ (17.2) równań nieliniowych względem przepływów. Na podstawie wzorów (17.3), (17.4) można spadek ciśnienia wody wzdłuż rury zapisać w postaci

$$h_i = \frac{8\lambda l}{\pi g D^5} q^2 = s q^2 \quad (17.13)$$

gdzie prędkość wody v zastąpiono przepływem q , natomiast pozostałe parametry zastąpiono funkcją pomocniczą s . Jeżeli przepływy wody w odcinkach pierścieniowych są określone poprawnie, to wtedy warunki (17.2) są spełnione, w przeciwnym przypadku należy zmienić wartości przepływów w każdym pierścieniu o pewną wartość Δq_i , gdzie $i=1, 2, 3$ dla przykładu sieci z rys. 17.1. Wtedy mamy z (17.13)

$$h_{ij} = s_{ij}(q_{ij}^2 + 2q_{ij}\Delta q_i + \Delta q_i^2) \quad (17.14)$$

przy czym składnik Δq_i^2 we wzorze (17.14) zwykle się pomija jako nie-istotny. Równania (17.13) dla każdego pierścienia można obecnie zapisać w postaci:

$$\sum_{j=1}^{R_i} h_{ij} = \sum_{j=1}^{R_i} s_{ij}(q_{ij}^2 + 2q_{ij}\Delta q_i) = 0 \quad (17.15)$$

gdzie R_i oznacza liczbę rur w pierścieniu i .

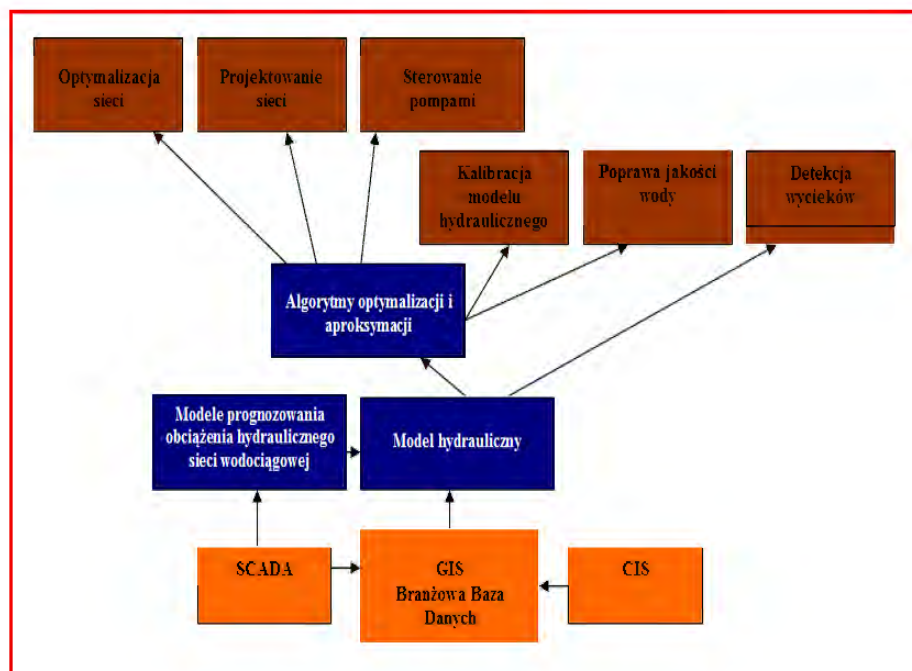
Z (17.15) wynikają następujące zależności do obliczania korekty przepływu Δq_i w każdym pierścieniu sieci

$$\Delta q_i = -\frac{\sum_j s_{ij} q_{ij}^2}{2 \sum_j s_{ij} q_{ij}} = -\frac{\sum_j h_{ij}}{2 \sum_j \frac{h_{ij}}{q_{ij}}} \quad (17.16)$$

Korekty przepływów według wzoru (17.16) oblicza się w algorytmie *Crossa* do momentu, aż zmiany przepływów w rurach staną się mniejsze od założonej dokładności obliczeń, przy czym algorytm zbiega zwykle do rozwiązania przy małej liczbie (kilku) iteracji.

17.3. Komputerowo wspomagane zintegrowane zarządzanie miejskimi systemami zaopatrzenia w wodę

Podstawowym narzędziem informatycznym umożliwiającym śledzenie na bieżąco stanu pracy sieci wodociągowej i podejmowanie działań zaradczych w przypadku występujących nieprawidłowości lub zagrożeń, na przykład awarii, jest model hydrauliczny sieci. Jest on źródłem informacji o ciśnieniach i przepływach w sieci i o zmianach tych parametrów sygnalizujących ewentualne niepożądane zdarzenia zakłócające pracę sieci wodociągowej. Kolejnymi ważnymi źródłami informacji o sieci jest system GIS generujący mapę numeryczną sieci wodociągowej, system SCADA monitorujący stan pracy sieci w wybranych punktach pomiarowych oraz system bilingowy (CIS – *Customers Information System*) zawierający informacje o użytkownikach sieci i realizowanych przez nich poborach wody. Wszystkie te programy mogą funkcjonować w ramach przedsiębiorstwa wodociągowego niezależnie, realizując pojedyncze odpowiadające im zadania, jednak w ten sposób nie wykorzystuje się możliwości wynikających z ich współpracy, która zwielokrotnia ich użyteczność w wyniku efektu synergii. Pożądaną sytuacją jest integracja tych programów do postaci jednolitego systemu informatycznego (systemu ICT), wspomagającego kompleksowe zarządzanie siecią wodociągową, istotnie zwiększając w ten sposób niezawodność jej funkcjonowania i bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę użytkowników sieci. Koncepcja takiego systemu została opracowana w Instytucie Badań Systemowych PAN i przedstawiona na rys. 17.2 (Studziński, 2012a, 2013c).

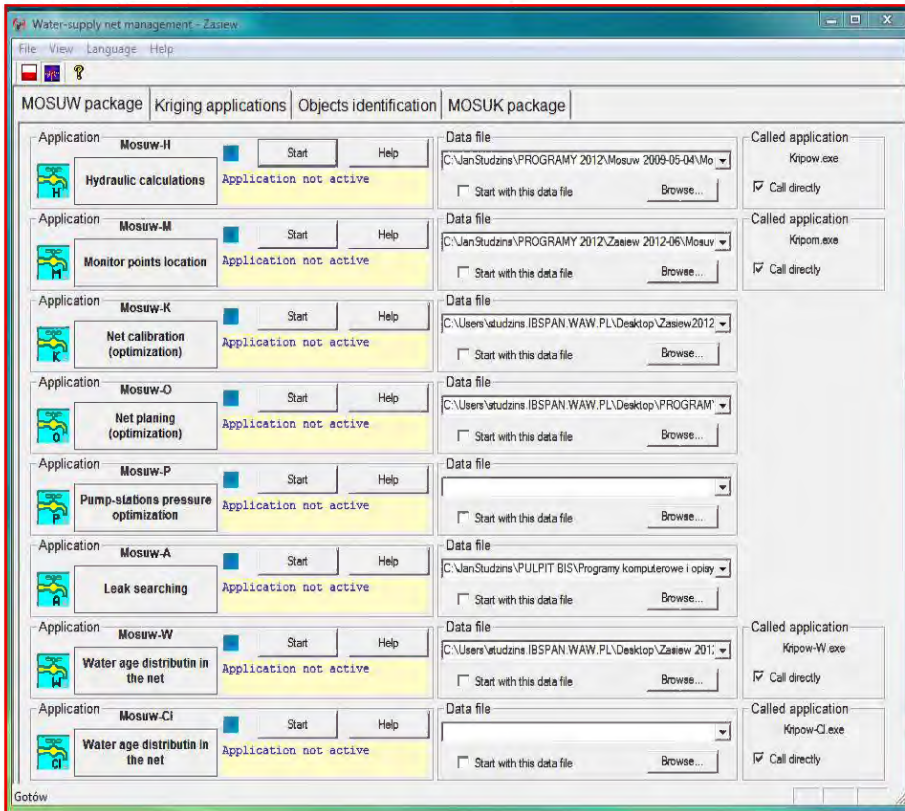


Rys. 17.2. Struktura zintegrowanego systemu informatycznego do zarządzania siecią wodociągową.

Proponowany system informatyczny składa się z licznych programów zgrupowanych na trzech poziomach. Na poziomie dolnym znajdują się programy GIS, SCADA i CIS dostarczające podstawowych danych technicznych o strukturze sieci wodociągowej (GIS), danych o rozbiorach wody (CIS) i bieżących danych o parametrach pracy sieci (SCADA). Na poziomie środkowym znajdują się programy realizujące zadania zarządzania siecią wodociągową, w tym w szczególności model hydrauliczny sieci, ale również programy modelowania matematycznego, optymalizacji i aproksymacji. Na poziomie górnym są pokazane funkcje realizowane przez system informatyczny za pomocą programów z poziomu środkowego i na podstawie danych z poziomu dolnego.

Programy zgromadzone na poziomie środkowym systemu informatycznego są podzielone na trzy grupy reprezentowane przez trzy moduły w strukturze systemu: MOSUW, 'Aplikacje kringowe' i 'Identyfikacja obiektów'. Moduł MOSUW (Modelowanie-Optimalizacja-Sterowanie Układów Wodociągowych) gromadzi 8 programów wykonujących takie zadania, jak planowanie systemu monitoringu, kalibracja modelu hydraulicznego, obliczenia hydrauliczne sieci wodociągowej,

optymalizacja i projektowanie sieci, sterowanie pompami w pompowniach i przepompowniach strefowych, wykrywanie i lokalizacja stanów awaryjnych oraz obliczanie wieku wody i stężenia chloru w sieci (rys. 17.2). Przy realizacji każdego z tych zadań używa się modelu hydraulicznego sieci wodociągowej.

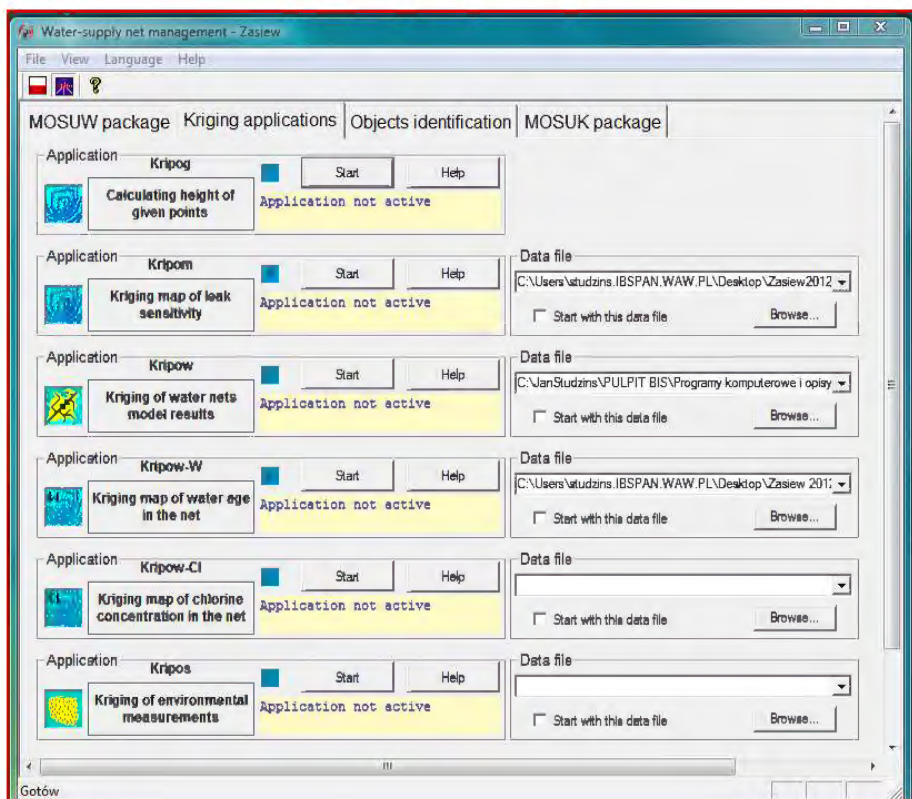


Rys. 17.3. Moduł MOSUW systemu informatycznego.

Programy z modułu ‘Aplikacje krigingowe’ służą do wykreślenia map warstwicznych wybranych parametrów charakteryzujących pracę sieci wodociągowej.

Moduł ‘Aplikacje krigingowe’ gromadzi 6 programów wykonujących takie zadania, jak wykreślenie map rozkładów przepływów i ciśnień w sieci wodociągowej, wykreślenie map wrażliwości sieci na punktowe zmiany ciśnienia i przepływu, wykreślenie map wieku wody i rozkładu stężenia chloru w sieci, obliczanie współrzędnej wysokościowej węzłów sieci oraz wykreślenie map rozkładu tempe-

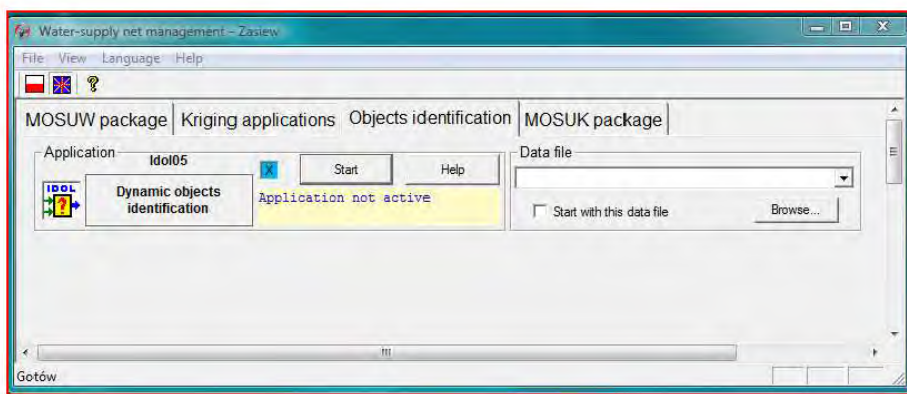
ratury w obszarze obejmującym sieć wodociągową (Bogdan, Studziński, 2007; Studzinski, 2013b) (rys. 17.4).



Rys. 17.4. Moduł ‘Aplikacje krigingowe’ systemu informatycznego.

W programach tego modułu stosuje się algorytm aproksymacji krigingowej, należące do grupy algorytmów aproksymacji przestrzennej i opracowane oryginalnie do szacowania jakości i wielkości złóż surowców naturalnych. Istnieje komunikacja między programami modułów MOSUW i ‘Aplikacje krigingowe’ polegająca na tym, że dane wynikowe z programów modułu pierwszego mogą być automatycznie eksportowane jako dane wejściowe do programów modułu drugiego za pomocą specjalnie do tego celu skonstruowanych plików buforowych.

W module ‘Identyfikacja obiektów’ znajdują się trzy programy wykonujące zadania modelowania i identyfikacji liniowych systemów dynamicznych za pomocą metod szeregów czasowych (*time series methods*) (rys. 17.5). Te metody, to metoda najmniejszej sumy kwadratów Kalmana, metoda najmniejszej uogólnionej sumy kwadratów Clarke’a oraz metoda największej wiarygodności (Hryniewicz, Studziński, 2002).



Rys. 17.5. Moduł ‘Identyfikacja obiektów’ systemu informatycznego.

Proponowany system informatyczny składa się obecnie z 20 współpracujących ze sobą programów, ma budowę modułową i jest otwarty, to znaczy przystosowany do łatwego dołączania do niego nowych programów w zależności od nowych zadań generowanych przez potencjalnego użytkownika. Elementem kluczowym systemu informatycznego jest branżowa baza danych systemu GIS, będąca podstawowym źródłem danych dla modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, który z kolei jest wykorzystywany w obliczeniach przez wszystkie programy zgromadzone w modułach MOSUW i ‘Aplikacje krigingowe’. Współpraca w różnych kombinacjach programów systemu informatycznego istotnie zwiększa jego funkcjonalność i użyteczność. Implementacja prezentowanego systemu w przedsiębiorstwie wodociągowym wspomaga rozwiązywanie złożonych problemów związanych z efektywnym zarządzaniem siecią wodociągową, w tym w szczególności z jej bieżącą eksploatacją, to znaczy z produkcją, transportem i dystrybucją wody o żądanej jakości i w żądanych ilościach. W rezultacie implementacja systemu informatycznego zwiększa niezawodność pracy sieci i bezpieczeństwo niezależnych dostaw wody do użytkowników sieci.

W dalszym ciągu zostaną omówione dokładniej poszczególne zadania realizowane przez system informatyczny i wykonujące je algorytmy obliczeniowe.

17.4. Algorytmy modelowanie, optymalizacji i sterowania zwiększające niezawodność i bezpieczeństwo sieci wodociągowych

Podstawowym źródłem danych dla wszelkich obliczeń związanych z zarządzaniem siecią wodociągową jest Branżowa Baza Danych systemu GIS, w której jest zdefiniowana struktura sieci, a podstawowym programem obliczeniowym jest model hydrauliczny sieci, z którego korzystają inne programy rozwiązujące specyficzne zadania zapewniające niezawodne i bezpieczne funkcjonowanie sieci. Wszystkie te programy zawarte w modułach MOSUW, ‘Aplikacje krigingowe’ i ‘Identyfikacja obiektów’ systemu informatycznego w swoich obliczeniach korzystają z algorytmów optymalizacji statycznej. Dlatego problem optymalizacji sieci wodociągowej jest drugim kluczowym zagadnieniem w komputerowo wspomaganym zarządzaniu siecią, obok problemu jej modelowania hydraulicznego.

W przypadku algorytmów optymalizacji statycznej mamy do czynienia z ich zasadniczym podziałem na algorytmy optymalizacji jednokryterialnej i wielokryterialnej. Optymalizacja jednokryterialna ma następujące własności:

- ocena wyników obliczeń odbywa się na podstawie jednego kryterium jakości (funkcji celu)
- pojedyncze kryterium jakości może mieć w przypadku optymalizacji sieci wodociągowej charakter kosztowy lub techniczny
- w sposób arbitralny ustala się ograniczenia dla obszaru poszukiwań rozwiązania zadania optymalizacji.

W wyniku obliczeń otrzymuje się pojedyncze optymalne rozwiązanie zadania w bardzo jednak ograniczonym obszarze poszukiwań.

Zupełnie inna sytuacja zachodzi w przypadku optymalizacji wielokryterialnej, która ma następujące własności:

- ocena wyników obliczeń odbywa się na podstawie kilku kryteriów jakości
- kryteria jakości mogą mieć charakter kosztowy, techniczny i technologiczny.

W wyniku obliczeń otrzymuje się zbiór wielu quasi-optimalnych rozwiązań, z których już w sposób arbitralny dokonuje się wyboru najlepszego rozwiązania.

Poniżej pokazano poglądowy przykład zadania optymalizacji wielokryterialnej i dla porównania to samo zadanie rozwiązane za pomocą optymalizacji jednokryterialnej (Straubel i Holznagel, 1998).

Założenia do zadania:

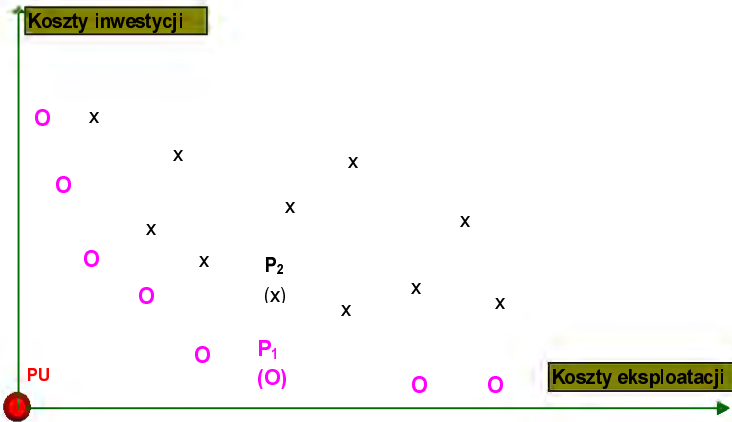
- dokonuje się rekonstrukcji sieci wodociągowej
- przyjmuje się dwa kryteria jakości: kryterium opisujące koszty inwestycji rekonstrukcji sieci (Z_1) oraz kryterium opisujące koszty późniejszej eksploatacji sieci (Z_2)
- przyjęte kryteria jakości są przeciwstawne, to znaczy gdy koszty inwestycji Z_1 są odpowiednio wysokie, to późniejsze koszty eksploatacji sieci Z_2 maleją, i odwrotnie.

W wyniku wykonanych obliczeń (rys. 17.6) otrzymuje się rozwiązania oznaczone symbolami x , O , przy czym rozwiązania oznaczone symbolami x są zdominowane przez rozwiązania lepsze O : na przykład, rozwiązanie P_2 jest zdominowane przez rozwiązanie P_1 , które dla mniejszych kosztów inwestycyjnych oferuje identyczne koszty eksploatacyjne. Rozwiązania zdominowane x są automatycznie eliminowane przez algorytm optymalizacji, w wyniku czego otrzymuje się ostatecznie zbiór *Pareto-optimalnych* rozwiązań O . Z tego zbioru projektant sieci wodociągowej wybiera najlepsze rozwiązania już według własnego uznania. PU na rys. 17.6 oznacza tak zwany punkt utopijny, czyli rozwiązanie nierealizowalne w praktyce przy tak sformułowanych przeciwstawnych kryteriach jakości.

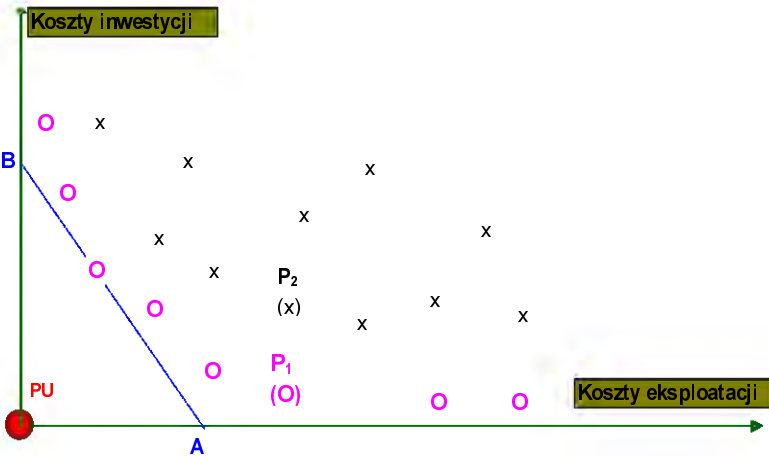
Jeżeli do sformułowanego powyżej zadania zastosuje się metodę optymalizacji jednokryterialnej, to dla dwóch przyjętych wcześniej kryteriów jakości należy zdefiniować nową pojedynczą funkcję kryterialną postaci

$$Z = w_1 Z_1 + w_2 Z_2$$

gdzie w_1 , w_2 oznaczają współczynniki wagowe. Ta funkcja jest opisana prostą AB na rys. 17.7. Wynik obliczeń będzie obecnie punktem na tej prostej.



Rys. 17.6. Obszar znajdowanych rozwiązań w optymalizacji wielokryterialnej.



Rys. 17.7. Obszary znajdowanych rozwiązań w optymalizacji jednokryterialnej i wielokryterialnej.

Porównanie obu metod optymalizacji pokazuje, że w przypadku optymalizacji jednokryterialnej uzyskuje się bardzo ograniczony zakres podejmowanych decyzji a także pojawiają się trudności z doбором wartości dla współczynników wagowych.

Poniżej pokazano rzeczywisty przykład optymalizacji wielokryterialnej, dotyczący optymalizacji sieci wodociągowej w Königs-Wusterhausen w Niemczech (Straubel, Studziński, 2000) za pomocą programu REH opracowanego przez Straubela (Straubel, 2005). Zadanie dotyczy projektowania sieci i aby je rozwiązać, należy dysponować następującymi danymi niezbędnymi w obliczeniach optymalizacji:

- struktura sieci wodociągowej (lokalizacja węzłów i odcinków)
- ceny przewodów wodociągowych w zależności od ich typu i średnicy
- ceny wykopów ziemnych w zależności od średnicy instalowanego przewodu
- ceny instalacji zbiorników i pompowni
- charakterystyki pracy pomp w zależności od typu pompy
- dopuszczalny dzienny czas pracy pompy w zależności od jej typu
- cena energii elektrycznej
- liczba pracowników zatrudnionych do obsługi sieci wodociągowej
- roczne koszty pracownika
- liczba użytkowników sieci
- roczne zużycie wody przez 1 użytkownika
- zadane ciśnienia w węzłach końcowych.

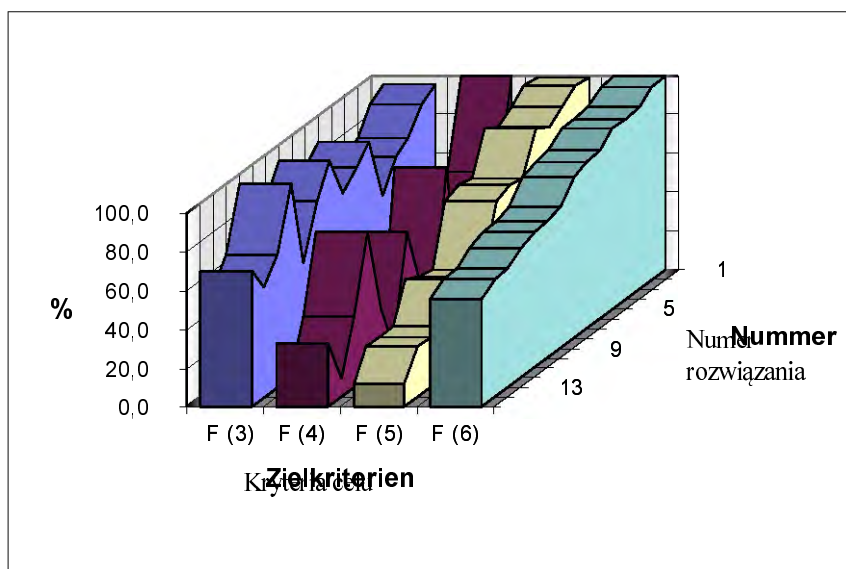
Projektując sieć wodociągową uwzględnia się w omawianym przykładzie następujące możliwe działania:

- instalacja przewodów wodociągowych o różnych średnicach
- instalacja nowych lub zmiana parametrów starych pompowni
- instalacja nowych lub zmiana parametrów starych zbiorników.

Ostatnia czynność przed wykonaniem obliczeń, to sformułowanie kryteriów jakości zapewniających optymalne funkcjonowanie badanej sieci. W prezentowanych badaniach ustalono następujące kryteria:

- $F(1)$ (min): maksymalna różnica między zadaniem i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych

- $F(2)$ (min): suma strat ciśnienia we wszystkich przewodach sieci
- $F(3)$ (min): maksymalne ciśnienie pompowania ustalone dla pompy
- $F(4)$ (max): minimalna prędkość przepływu wody w przewodach
- $F(5)$ (min): łączne koszty inwestycyjne
- $F(6)$ (min): cena 1 m^3 wody



Rys. 17.8. Wyniki obliczeń optymalizacji wielokryterialnej w zadaniu projektowania sieci wodociągowej.

Wyniki optymalizacji są pokazane na rys. 17.8. Zbiór otrzymanych rozwiązań *Pareto-optimalnych* zawiera 15 punktów, przy czym na wykresie pominięto zmiany kryteriów $F(1)$ i $F(2)$, ponieważ we wszystkich punktach $F(1)=0$ a zmiany $F(2)$ są pomijalnie małe. W zależności od stosowanych preferencji projektant z otrzymanego zbioru powinien obecnie wybrać najbardziej satysfakcjonujące rozwiązanie.

Jak wynika z powyższych rozważań, najbardziej wskazane w optymalizacji sieci wodociągowych jest użycie algorytmów optymalizacji wielokryterialnej.

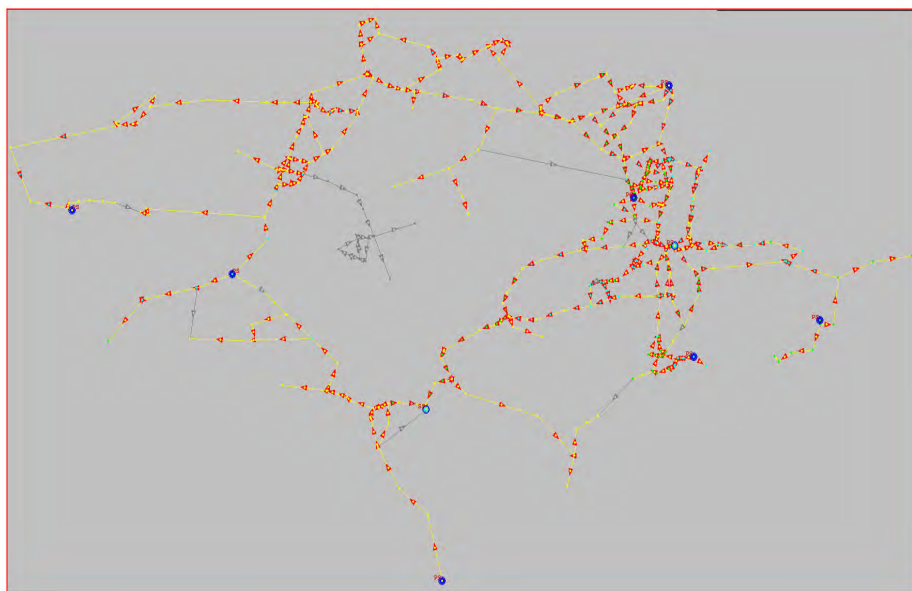
W wyniku otrzymuje się zbiór rozwiązań *Pareto- optymalnych*, z których każde jest wektorem o liczbie elementów równej liczbie uwzględnianych w obliczeniach funkcji celu. Wybór najbardziej korzystnego rozwiązania należy do projektanta sieci wodociągowej. Wadą optymalizacji wielokryterialnej jest duża czasochłonność obliczeń. Dlatego środkiem zaradczym jest tworzenie pojedynczego kryterium jakości w postaci sumy kilku funkcji celu z dołączonymi współczynnikami wagowymi. W ten sposób zadanie optymalizacji wielokryterialnej można sprowadzić do optymalizacji jednokryterialnej. Zaletą tego sposobu jest znaczne przyspieszenie obliczeń i otrzymywanie jednego rozwiązania zamiast zbioru rozwiązań, natomiast wadą jest zależność znajdowanego rozwiązania od przyjętych wartości współczynników wagowych, ustalanych zwykle w sposób arbitralny. Jak pokazano powyżej, znalezione rozwiązanie jest jedynie jednym punktem ze zbioru rozwiązań *Pareto- optymalnych* otrzymywanych z optymalizacji wielokryterialnej, co istotnie ogranicza wcześniejszą możliwość dokonania najbardziej korzystnego wyboru spośród wielu propozycji.

Z powyższej dyskusji wynika, że najbardziej wskazana metoda optymalizacji wielokryterialnej generuje duże problemy obliczeniowe, natomiast stosowanie metody optymalizacji jednokryterialnej z pojedynczą funkcją celu względnie kilkoma zsumowanymi funkcjami celu i arbitralnie dobieranymi współczynnikami wagowymi bardzo ogranicza praktyczną użyteczność optymalizacji, co należy mieć na względzie przy podejmowaniu decyzji o wyborze metody optymalizacji przy rozwiązywaniu zagadnień związanych z kompleksowym zarządzaniem siecią wodociągową.

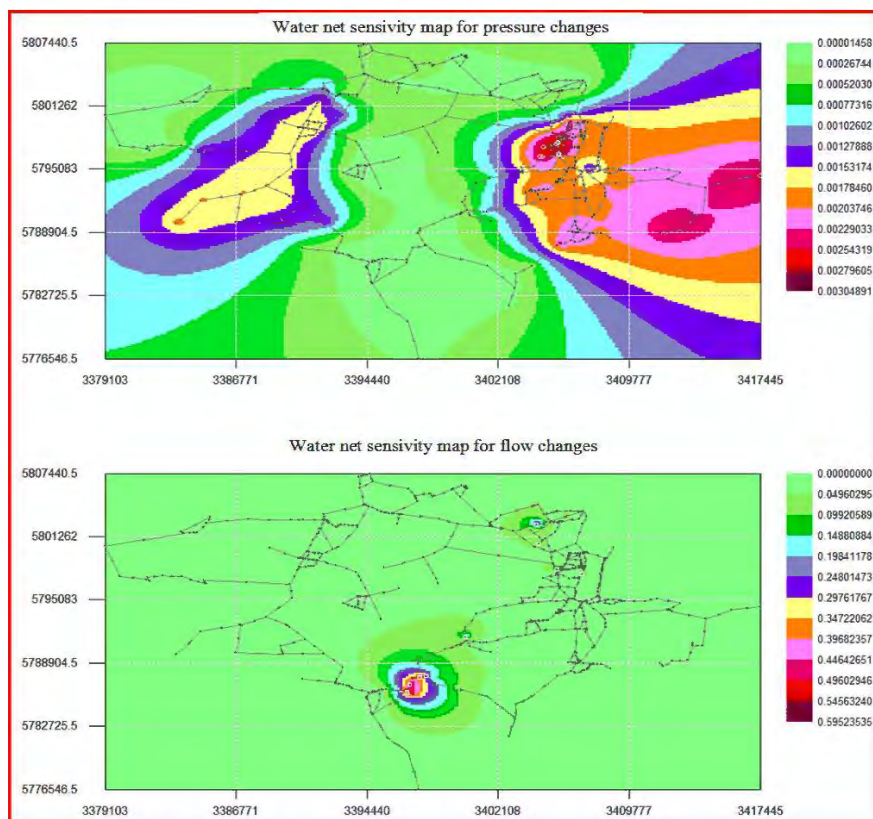
- ***Planowanie systemu monitoringu sieci wodociągowej***

System monitoringu (SCADA) informuje operatora sieci wodociągowej o bieżących przepływach i ciśnieniach wody w punktach pomiarowych zainstalowanych na sieci. Jeżeli tych punktów jest dostatecznie dużo, to uzyskuje się w ten sposób wiarygodną informację o stanie pracy sieci. Problem polega na tym, że instalacja odpowiednio gęstego systemu punktów pomiarowych jest bardzo droga i dlatego na ogół są one montowane jedynie w newralgicznych punktach sieci, takich jak pompownie, zbiorniki wyrównawcze i końcówki sieci. Taki system monitoringu nie daje pełnej informacji o stanie pracy sieci i jednocześnie jest bezużyteczny z punktu widzenia kompleksowego zarządzania siecią wodociągową. Jak już kilkakrotnie wspomiano, podstawowym programem obliczeniowym umożliwiającym rozwiązywanie różnorodnych zadań związanych z zarządzaniem siecią, w celu zwiększenia jej niezawodności i bezpieczeństwa pracy, jest model hydrauliczny. Aby mógł on właściwie wypełniać te zadania, musi być odpowiednio skali-

browany, i jest to możliwe dzięki właściwie zaplanowanemu systemowi monitoringu. Dlatego istotnym zadaniem w badaniach związanych z opracowaniem systemu informatycznego do zarządzania siecią wodociągową jest także zaplanowanie systemu monitoringu, aby oprócz swoich standardowych funkcji bieżącej rejestracji stanu pracy sieci, mógł on jednocześnie służyć do kalibracji i okresowej rekaliibracji jej modelu hydraulicznego. W tym celu należy dokonać odpowiedniego doboru punktów pomiarowych monitoringu w ten sposób, aby przy ich możliwie małej liczbie dostarczały one możliwie dużo informacji o stanie pracy sieci. Tak wybrane punkty nazywają się *punktami charakterystycznymi* sieci wodociągowej a ich właściwością jest duża wrażliwość na zmiany ciśnienia lub przepływu w sieci w stosunkowo dużym otoczeniu tych punktów.



Rys. 17.9. Badania sieć wodociągowa.



Rys. 17.10. Mapa krigingowa wrażliwości sieci wodociągowej.

Jednym z algorytmów wyznaczania punktów charakterystycznych sieci wodociągowej jest algorytm zaproponowany w pracy (Straubel, Holznel, 1999), który polega na symulacji wycieków kolejno w każdym węźle i każdym odcinku sieci i obliczaniu wrażliwości tych punktów za pomocą wzorów:

$$S_{pm} = \frac{\sum_{k \neq m} (\Delta p_m / p_m) L_{km}}{\sum_{k \neq m} L_{km}}$$

$$S_{qm} = \frac{\sum_{k \neq m} (\Delta q_m / q_m) L_{km}}{\sum_{k \neq m} L_{km}}$$

gdzie: k – węzeł lub odcinek sieci z symulowanym wyciekami, m – rozważany punkt pomiarowy, p – ciśnienie wody, q – przepływ wody, Δp_m i Δq_m – różnice w obliczonych wartościach ciśnienia i przepływu dla standardowego i awaryjnego stanu pracy sieci, L – odległość między punktami k i m .

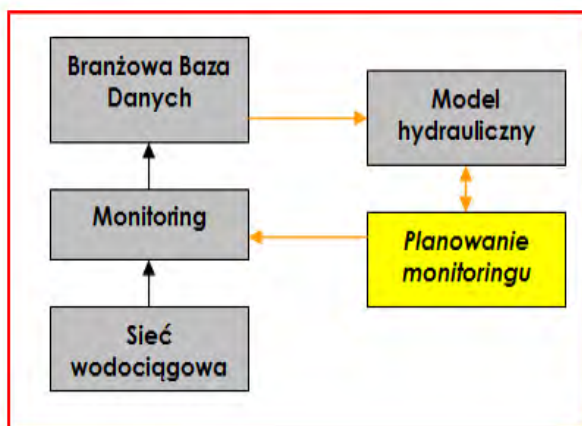
W rezultacie wykonanych obliczeń otrzymuje się listy węzłów i odcinków sieci posortowane według ich wrażliwości na zmiany ciśnienia i przepływu (Studziniński, 2012e). Korzystając z algorytmu aproksymacji krigingowej można na podstawie otrzymanych wyników wykreślić odpowiednie mapy wrażliwości sieci wodociągowej, pozwalające ocenić wrażliwość sieci w sposób jakościowy (rys. 17.9 i 17.10).

Na podstawie sporządzonych list punktów wrażliwych sieci można dokonać wyboru punktów pomiarowych systemu monitoringu w sposób ręczny, lub za pomocą algorytmu optymalizacji wielokryterialnej. W tym drugim przypadku można sformułować następujące kryteria jakości, uwzględniające ilość informacji pozyskiwanej z punktów pomiarowych, ich liczbę i koszty instalacji oraz rozmieszczenie przestrzenne:

- Min (liczba punktów pomiarowych),
- Max (łączna wrażliwość punktów pomiarowych),
- Min (koszty instalacji punktów pomiarowych),
- Max (odległość między poszczególnymi punktami pomiarowymi).

Na rys. 17.11 pokazano schemat współpracy programów systemu informatycznego przy planowaniu systemu monitoringu (Stachura i in., 2012a). Przy rozwiązywaniu tego zadania korzysta się z modelu hydraulicznego do symulacji wycieków w sieci wodociągowej. Aby obliczenia były poprawne, model musi być skalibrowany, dlatego jednocześnie planuje się system monitoringu do kalibracji modelu hydraulicznego i dokonuje się kalibracji modelu. W rezultacie proces planowania systemu SCADA jest iteracyjny, gdzie w pierwszym kroku dokonuje się kalibracji modelu w sposób ręczny, na podstawie pomiarów uzyskanych z szarzy pomiarowej przeprowadzonej na obiekcie, następnie wykonuje się obliczenia wrażliwości sieci wodociągowej i po instalacji

zaplanowanego systemu monitoringu, z uwzględnieniem punktów charakterystycznych sieci, dokonuje się rekalkibracji modelu hydraulicznego.



Rys. 17.11. Współpracujące programy systemu informatycznego przy planowaniu systemu monitoringu.

- **Prognozowanie obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej**

Znajomość obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej jako całości względnie w jej węzłach odbiorczych jest niezbędna do obliczeń modelu hydraulicznego i również do wyznaczenia scenariuszy sterowania pompami w pompowniach i zbiornikami wyrównawczymi zainstalowanymi na sieci. Modele matematyczne obciążenia hydraulicznego można wyznaczać za pomocą klasycznych metod szeregów czasowych lub również za pomocą sieci neuronowych i zbiorów rozmytych (Stachura i in., 2012b). W proponowanym systemie informatycznym stosuje się do realizacji tego zadania metody szeregów czasowych oparte o algorytmy najmniejszej sumy kwadratów Kalmana i Clarke'a oraz algorytm największej wiarygodności. Są to metody bardzo proste i szybkie a ich programy znajdują się w module 'Identyfikacja obiektów'.

W metodach szeregów czasowych badany proces i jego model są opisane prostymi liniowymi równaniami operatorowymi (Studziński, Bartkiewicz, 2009):

$$y_n = -A(z^{-1})y_n - \sum_{i=1}^M B(z^{-1})x_{in} + v_n$$

$$\hat{y}_n = -\hat{A}(z^{-1})y_n - \sum_{i=1}^M \hat{B}(z^{-1})x_{in}$$

lub w postaci macierzowej następująco:

$$y = \phi\gamma$$

$$\hat{y} = \phi c$$

gdzie: y_n i \hat{y}_n – sygnały wyjściowe procesu i modelu, A , B i \hat{A} , \hat{B} – operatory odpowiednio, procesu i modelu, zawierające parametry równania procesu i ich estymatory w równaniu modelu, x_m – sygnały wejściowe, v_n – zakłócenie, ϕ - macierz pomiarów wejść i wyjścia procesu, γ , c - wektory parametrów procesu i ich estymatorów.

Identyfikacji modelu dokonuje się na podstawie prostego średniokwadratowego kryterium jakości:

$$S_v(c) = \sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2 = \sum_{n=1}^N \hat{v}_n^2$$

gdzie N jest liczbą pomiarów sygnałów wejściowych i sygnału wyjściowego uwzględnionych w obliczeniach oraz \hat{v}_n jest estymatorem zakłócenia v_n .

Estymator parametrów procesu w metodzie Kalmana wyznacza się ze wzoru:

$$c = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T y$$

i jest on asymptotycznie obciążony dla sygnału zakłócającego v_n skorelowanego. Jeżeli zakłócenie jest nieskorelowane, to znaczy $v = \varepsilon$, to wyznaczony estymator jest asymptotycznie nieobciążony.

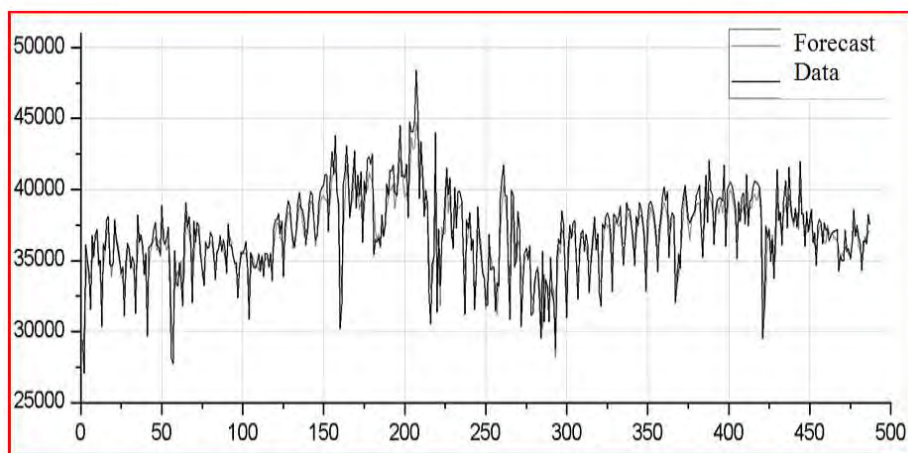
W metodzie Clarke'a uogólnionej sumy kwadratów wprowadza się w obliczeniach dodatkowy model skorelowania zakłóceń:

$$(1 + D(z^{-1}))v_n = \varepsilon_n$$

natomiast w metodzie największej wiarygodności modeluje się także zakłócenia, jednak za pomocą nieco innego operatora:

$$v_n = (1 + D(z^{-1}))\varepsilon_n$$

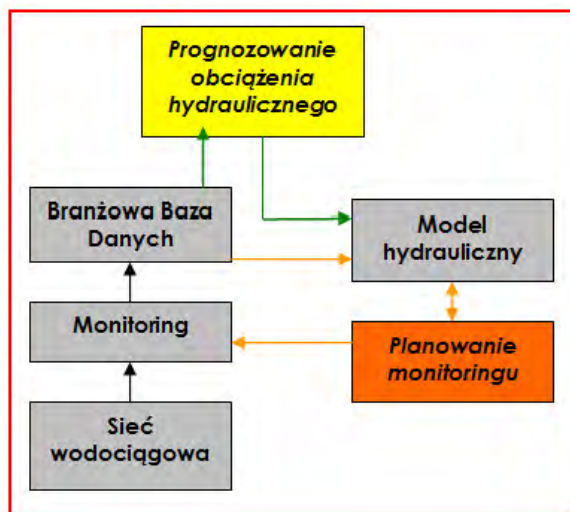
W rezultacie w obu przypadkach otrzymuje się w wyniku obliczeń estymatory parametrów procesu asymptotycznie nieobciążone.



Rys. 17.12. Przykładowe wyniki modelowania obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej za pomocą metody Clarke'a.

Na rys. 17.12 pokazano przykładowe obliczenia modelowania obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej wykonane za pomocą metody Clarke'a. Z prowadzonych obliczeń porównawczych wynika, że metody szeregów czasowych zastosowane do tego rodzaju modelowania są szybko zbieżne i dają wystar-

czająco dokładne wyniki, często dokładniejsze niż otrzymywane za pomocą sieci neuronowych i zbiorów rozmytych (Studziński, Bartkiewicz, 2009).



Rys. 17.13. Współpracujące programy systemu informatycznego przy modelowaniu obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej.

Na rys. 17.13 pokazano schemat współpracy programów systemu informatycznego przy modelowaniu obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej (Stachura i in., 2012a).

- ***Kalibracja modelu hydraulicznego na podstawie danych z monitoringu***

Kalibracja modelu oznacza dobór współczynników w równaniach modelu dokonywany w sposób ręczny, w odróżnieniu od klasycznej identyfikacji, gdy takie zadanie odbywa się automatycznie za pomocą metod optymalizacji i z zastosowaniem odpowiednio skonstruowanych funkcji celu (kryteriów jakości). Powszeczne wykonywanie kalibracji a nie identyfikacji w przypadku modeli hydraulicznych sieci wodociągowych jest spowodowane kilkoma przyczynami. Po pierwsze, modele te są zbudowane z ogromnej liczby równań, zależnej proporcjonalnie od liczby węzłów i odcinków sieci, a w przypadku miejskich sieci wodociągowych liczby tę sięgają kilku, kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu tysięcy węzłów i od-

cinków. To powoduje, że ogromna jest również liczba współczynników, dla których szuka się wartości, a klasyczne metody optymalizacji na ogół zawodzą w przypadku identyfikacji złożonych modeli o dużej liczbie parametrów. Problemy obliczeniowe zaczynają się pojawiać już wówczas, gdy mamy do czynienia z modelami o kilkudziesięciu czy nawet kilkunastu parametrach.

Dodatkowy problem pojawiający się w przypadku identyfikacji modeli matematycznych jest związany z postacią funkcji celu. Na ogół przyjmuje się w obliczeniach klasyczną kwadratową funkcję celu opartą na sumach resztowych, to znaczy na sumie kwadratów różnic między zmierzonym wyjściem badanego obiektu a obliczonym wyjściem liczonego modelu. Jednak w przypadku złożonych nieliniowych modeli, a z takim zagadnieniem mamy do czynienia w przypadku modeli hydraulicznych sieci wodociągowych, kwadrat sumy różnic między obydwoma sygnałami wyjściowymi daje w rezultacie funkcję silnie nieliniową i multimodalną, z wieloma optimumi lokalnymi, co powoduje, że dobrze znane i zwykle stosowane metody optymalizacji statycznej na ogół zbiegają do tych minimów i nie są w stanie znaleźć minimum globalnego.

Wreszcie podstawowy problem polega na tym, że do przeprowadzenia poprawnej identyfikacji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej należy dysponować dobrze zaplanowanym i dosyć gęstym systemem monitoringu zainstalowanym na sieci, o czym wspomniano wcześniej, co praktycznie nie ma miejsca w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych.

Wymienione problemy powodują, że zamiast identyfikacji stosuje się powszechnie kalibrację modeli hydraulicznych sieci wodociągowych. Polega ona na tym, że w równaniach modelu ręcznie ustala się wartości nieznanymi współczynników i następnie wykonując symulację modelu porównuje się obliczone wyjścia modelu z wartościami zmierzonymi na obiekcie. Te wyjścia, to zwykle ciśnienia i przepływy wody w monitorowanych węzłach i odcinkach sieci. Jeżeli nie ma zadowalającej zgodności między porównywanymi wartościami ciśnień i przepływów, to zmienia się szukane wartości współczynników i powtarza obliczenia symulacyjne do momentu, gdy uzyska się żądaną zgodność.

Jest to proces bardzo żmudny i czasochłonny, jednak kalibrację tego rodzaju ułatwia fakt, że szukane współczynniki mają na ogół interpretację fizyczną, dotyczy to przede wszystkim szorstkości k (chropowatości) przewodu wodociągowego (por. wzór 17.2), a więc ich wartości są dobierane z odpowiednich znanych przedziałów wartości. Dodatkowy parametr, który również może być szacowany, to średnica D przewodu wodociągowego. Na ogół zadaje się w obliczeniach wartości średnic nominalnych, które są stabilizowane, jednak w przypadku starych przewodów, w wyniku zarastania glonami, sedymentacji osadów lub rdzewienia, średnica

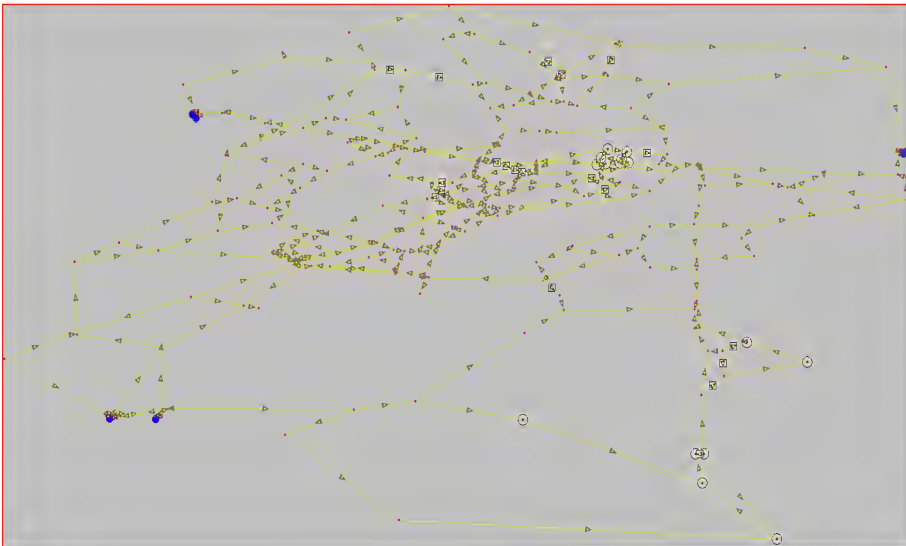
rzeczywista przewodu jest na ogół mniejsza od nominalnej i dlatego może być ona dodatkowym szukanym parametrem modelu.

Istotnym problemem przy kalibracji modelu hydraulicznego jest ograniczona liczba punktów pomiarowych w systemie monitoringu, które służą jako punkty odniesienia dla obliczanych wartości wyjścia modelu. Przypadek idealny to taki, gdy można porównywać wszystkie wartości obliczone z odpowiednimi wartościami zmierzonymi, co oznacza posiadanie urządzeń pomiarowych we wszystkich węzłach i odcinkach sieci wodociągowej. Jest to możliwe jedynie w przypadku badań laboratoryjnych i nie jest możliwe do zrealizowania ze względów kosztowych w przypadku dużych miejskich sieci wodociągowych. Dlatego w takich przypadkach stosuje się przy kalibracji modelu hydraulicznego przenośne urządzenia pomiarowe do czasowych a nie stacjonarnych pomiarów w wybranych punktach sieci wodociągowej. Wymaga to opracowania specjalnego planu eksperymentu i przeprowadzenia szarzy pomiarowej na sieci dla zebrania odpowiedniej liczby danych pomiarowych dla celów kalibracji.

Ponieważ model hydrauliczny jest podstawowym narzędziem przy komputerowo wspomaganym zarządzaniu siecią wodociągową, jako źródło danych dla wszystkich programów z modułów MOSUW i 'Aplikacje krigingowe' przedstawianego systemu informatycznego, dlatego jego kalibracja musi być wykonana wyjątkowo dokładnie. Jednocześnie należy się liczyć z tym, że musi być ona powtarzana okresowo po każdej zmianie wprowadzonej do sieci wodociągowej, ponieważ każda zmiana obiektu wymaga nowego procesu identyfikacji jego modelu. Również starzenie się sieci wodociągowej oznacza konieczność uaktualnienia jej modelu hydraulicznego. Powtarzanie kalibracji ręcznej i wymaganej przy tym szarzy pomiarowej jest drogie i bardzo czasochłonne, dlatego najlepszym rozwiązaniem jest jednak kalibracja automatyczna, czyli identyfikacja modelu z wykorzystaniem metod optymalizacji statycznej (Studziński, Straubel, 2007).

W proponowanym systemie informatycznym dokonuje się identyfikacji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej za pomocą heurystycznej metody optymalizacji wielokryterialnej, opracowanej przez Straubela (Straubel, 2005), definiując w tym celu dwa następujące kryteria jakości (rys. 17.4 i 17.5):

- Min (maksymalny błąd między ciśnieniem zmierzonym i obliczonym w punktach pomiarowych systemu monitoringu),
- Min (maksymalny błąd między przepływem zmierzonym i obliczonym w punktach pomiarowych systemu monitoringu).



Rys. 17.14. Badana sieć wodociągowa z zaznaczonymi punktami pomiarowymi systemu monitoringu zainstalowanymi na odcinkach i w węzłach sieci.

Input data | Net | ● REH optimization | Results

Optimization task
 Utopic
 Pareto

Subtask of Pareto opt.
 Objectives with ranges
 Comp. set with objective limits
 Compromise set

Automatization of calculations
 Manual
 Automatic
 Max. iteration number: 3600
 Max. idle iterations: 1440

Steering variable values

	Actual	Best up to now
1:	1.20000E+002	1.20000E+002
2:	1.50000E+002	1.50000E+002
3:	1.19431E+002	1.20000E+002
4:	1.19320E+002	1.19018E+002
5:	1.12658E+002	1.02432E+002
6:	1.18973E+002	1.20000E+002
7:	1.20000E+002	1.20000E+002
8:	1.20000E+002	1.20000E+002

Please wait!
 It is looking for the optimal solution to the problem.

Incidental remarks

Total number of model calls	:	172
Last successful model call	:	148

Actual "best" values of the objectives

min: SUM [deviation of pressure measurement] [m WC]	0.2525875068E+01
min: SUM [deviation of flow measurement] [l/s]	0.3086872333E+02

Rys. 17.15. Ekran programu do kalibracji modelu hydraulicznego za pomocą optymalizacji wielokryterialnej z dwoma kryteriami jakości.

Minimalizacja zadanych funkcji celu odbywa się ze względu na chropowatość odcinków sieci. Należy zaznaczyć, że proces optymalizacji jest efektywny jedynie wtedy, gdy system monitoringu zainstalowany na sieci wodociągowej jest odpowiednio gęsty a punkty pomiarowe tego systemu są punktami charakterystycznymi sieci.

- **Optymalizacja i projektowanie sieci wodociągowej**

Niezawodność pracy sieci wodociągowej zależy w ogromnym stopniu od tego, jak sieć została zaprojektowana i w jakim stanie znajduje się jej infrastruktura. Można umownie podzielić problemy związane z projektowaniem sieci wodociągowej na trzy zadania: *optymalizacji*, *rewitalizacji* i *rozbudowy*.

Przez *optymalizację* sieci rozumie się tutaj zmianę parametrów sieci już eksploatowanej w przypadku, gdy jej funkcjonowanie jest nieprawidłowe, na przykład ciśnienia w węzłach odbiorczych sieci są zbyt małe, powodując dyskomfort użytkowników, ciśnienia w węzłach pośrednich są zbyt duże, grożąc awariami, prędkości przepływu wody w niektórych odcinkach sieci są zbyt małe, wywołując proces pogarszania się jakości wody itp. Zmiana parametrów sieci oznacza na ogół zmianę średnicy jakiegoś jej odcinka, zmianę parametrów wybranego zbiornika wyrównawczego lub zmianę pomp w wybranej pompowni, względnie, w bardziej zaawansowanych przypadkach, oznacza wstawienie do sieci nowego zbiornika lub nowej przepompowni strefowej.

Z kolei *rewitalizacja* sieci wodociągowej oznacza zmianę stanu wybranych obiektów sieci, przy zachowaniu istniejących parametrów eksploatacyjnych. Wykonuje się to wówczas, gdy eksploatowana sieć pracuje wprawdzie poprawnie ze względu na uzyskiwane ciśnienia i przepływy, jednak stan techniczny jej pewnych obiektów jest na tyle zły, że grozi awarią. W przypadku niesprawnych odcinków sieci dokonuje się wówczas ich wymiany względnie remontu lub czyszczenia. Awaryjność sieci wodociągowych, zakłócająca ich działanie i powodująca czasami duże straty finansowe spowodowane utratą wody, jest szczególnie duża w przypadku starych sieci miejskich o bardzo zróżnicowanej strukturze wiekowej i materiałowej. W niektórych krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych straty wody, liczone jako różnica między wodą wyprodukowaną i sprzedaną, dochodzą nawet do 30%, chociaż rzadko przedsiębiorstwa te są w stanie ocenić, jaka część wody została utracona w wyniku awarii, kradzieży, lub zużyta na cele techniczne, na przykład do czyszczenia sieci. Niemniej awaryjność sieci wodociągowej, w tym tak zwane *ukryte wycieki* wody, są istotnym czynnikiem decydującym o stratach przedsiębiorstwa wodociągowego, i zapobieganie awaryjności poprzez planową

rewitalizację sieci może te straty w poważnym stopniu zredukować, nawet o 50% (Saegrov, 2004). W ten sposób poprawnie przeprowadzona rewitalizacja sieci wodociągowej wpływa pozytywnie na jej niezawodność i bezpieczeństwo pracy.

Wreszcie *rozbudowa* sieci wodociągowej oznacza, że do istniejącej struktury sieci wodociągowej zostanie dodany nowy fragment, na przykład pojedyncze przyłącze lub cała sieć nowej dzielnicy rozbudowującego się miasta. Istotne jest wówczas, aby nowy fragment sieci nie pogorszył warunków pracy starej sieci, i wówczas może się okazać, że rozbudowując sieć należy dokonać optymalizacji sieci już istniejącej.

Do prac projektowych związanych z optymalizacją, rewitalizacją i rozbudową sieci wodociągowych można i powinno się stosować metody optymalizacji statycznej, co jednak nie jest obecnie stosowaną zasadą. Istnieją dwie metody projektowania automatycznego sieci wodociągowej, z wykorzystaniem *symulacji* i *optymalizacji* sieci, przy czym w przypadku optymalizacji można stosować metody *optymalizacji jednokryterialnej* i *optymalizacji wielokryterialnej*. W każdym przypadku należy dysponować modelem hydraulicznym sieci.

Projektowanie sieci za pomocą *symulacji komputerowej* charakteryzuje się następującymi własnościami:

- dobór zmienianych parametrów sieci jest dokonywany arbitralnie
- obliczenia symulacyjne sieci są wykonywane za pomocą modelu hydraulicznego
- ocena wyników symulacji odbywa się również arbitralnie
- obliczenia symulacyjne sieci powtarza się dla różnych wybieranych arbitralnie wariantów zmian parametrów
- projektant dokonuje wyboru najlepszego rozwiązania spośród wielu wyników symulacji komputerowej.

Oceniając metodę projektowania za pomocą symulacji komputerowej można stwierdzić, że jest ona pracochłonna, czasochłonna i niepewna, ponieważ w bardzo dużym stopniu zależy od arbitralnych decyzji projektanta.

Z kolei projektowanie sieci wodociągowej za pomocą *metod optymalizacji* charakteryzuje się następującymi własnościami:

- dobór zmienianych parametrów sieci odbywa się w sposób automatyczny

- w sposób arbitralny dokonuje się doboru ograniczeń dla zmienianych parametrów sieci
- ocena i wybór najlepszego rozwiązania są dokonywane automatycznie.

Oceniając sposób projektowania za pomocą metod optymalizacji można stwierdzić, że jest on wygodny, szybki i pewny, ponieważ w małym stopniu zależy od decyzji projektanta a jedynie od obiektywnych, wcześniej ustalonych kryteriów jakości. Przy tym istnieją istotne różnice w jakości otrzymywanych rozwiązań w zależności od tego, czy stosuje się w obliczeniach metody optymalizacji jednokryterialnej czy wielokryterialnej, o czym wspomniano już wcześniej: algorytmy optymalizacji wielokryterialnej są bardziej złożone i również trudniejsze w interpretacji otrzymywanych wyników. Aby obejść te niedogodności, można spróbować zastosować metodę optymalizacji jednokryterialnej w kilku kolejnych krokach uwzględniających różne kryteria jakości, przybliżając w taki pośredni sposób zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej.

Propozycję takiego specjalizowanego algorytmu przy optymalizacji sieci wodociągowej przedstawiono poniżej. Składa on się z następujących kroków (Bar-ski i in., 2008):

- Krok 1:* Lokalizacja węzłów odbiorczych z nieprawidłowym ciśnieniem wody na podstawie obliczeń symulacyjnych modelu hydraulicznego sieci wodociągowej.
- Krok 2:* Wyznaczenie ścieżek z największymi spadkami ciśnień (o największej oporności) między zlokalizowanymi węzłami odbiorczymi z nieprawidłowym ciśnieniem i węzłami zasilającymi (źródłami).
- Krok 3:* Zmniejszanie wartości współczynników tarcia λ (por. wzory 17.3 i 17.12) do wartości nominalnej w rurach znajdujących się na wyznaczonych ścieżkach.

Jeżeli krok 3 nie przynosi satysfakcjonującego rezultatu, to powtórzenie kroków 1 i 2 i przejście do kroku 4:

- Krok 4:* Wymiana rur znajdujących się na wyznaczonych ścieżkach na rury o większej średnicy.

Koncepcja tego algorytmu jest następująca: Redukcja współczynnika tarcia w rurach w kroku 3 odpowiada stosowanemu w praktyce czyszczeniu przewodów wodociągowych. Z kolei wymiana rur realizowana w kroku 4 oznacza remont sieci

wodociągowej. Obie te czynności są związane z różnymi kosztami, przy czym wymiana rur na większe kosztuje znacznie więcej, niż ich czyszczenie.

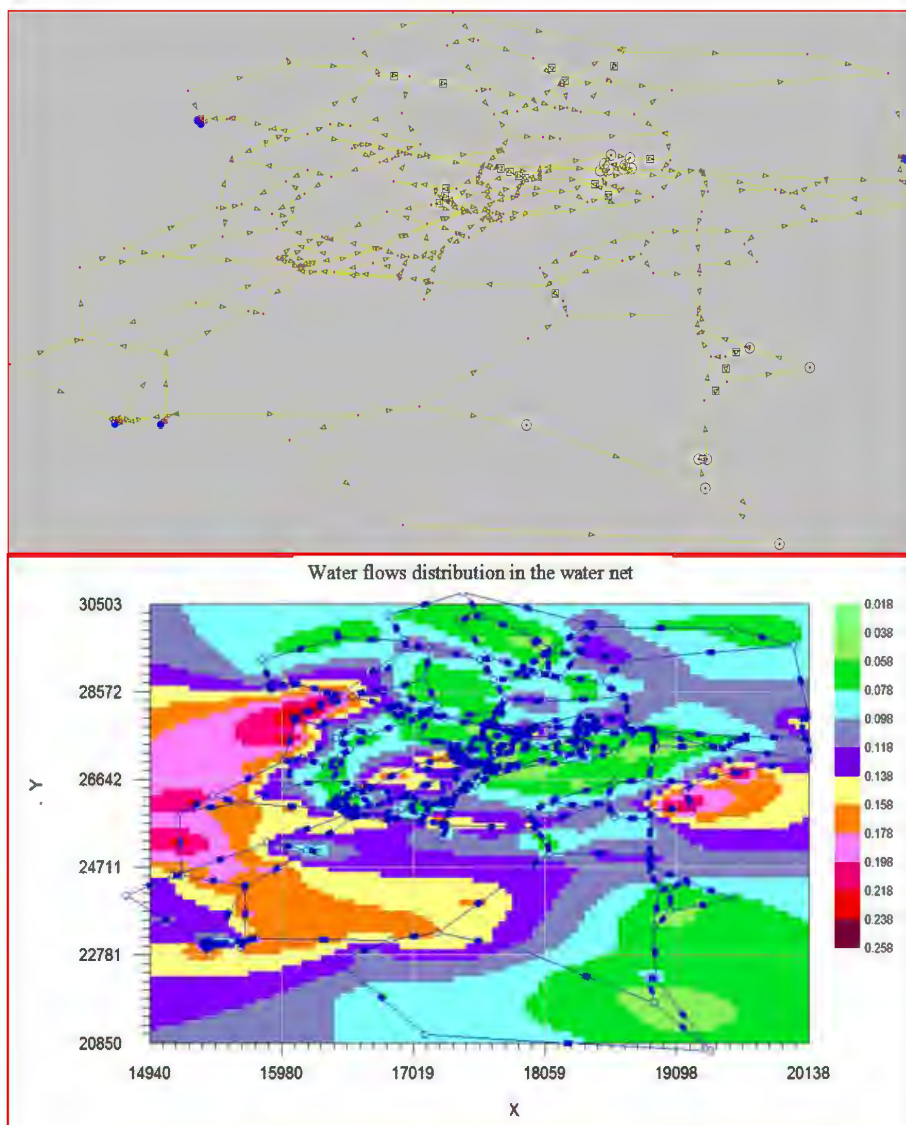
W ten sposób w algorytmie uwzględnia się pośrednio także koszty optymalizacji sieci i w rezultacie stosowana tutaj dwuetapowa optymalizacja jednokryterialna (etap 1 z krokami 1, 2, 3 oraz etap 2 z krokami 1, 2, 4) odpowiada optymalizacji wielokryterialnej z dwiema funkcjami celu.

W proponowanym systemie informatycznym projektowanie, w tym w szczególności optymalizację i rozbudowę sieci wodociągowej, zapewniające jej niezawodność, realizuje się za pomocą algorytmu optymalizacji wielokryterialnej. Optymalizacja sieci polega w tym przypadku na zmianie jej takich parametrów technicznych, jak średnica odcinka, wysokość zbiornika retencyjnego, charakterystyki pomp w pompowniach oraz stan pracy zaworów zwrotnych zainstalowanych na sieci. Poprawna kompleksowa realizacja zadania optymalizacji wymaga posiadania skalibrowanego modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, co z kolei wymaga właściwie zaplanowanego systemu monitoringu zainstalowanego na sieci.

Za pomocą systemu monitoringu i modelu hydraulicznego dokonuje się oceny stanu pracy sieci i w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości jej funkcjonowania przeprowadza się proces optymalizacji. Jakościowa ocena stanu pracy sieci wodociągowej może być dokonana na podstawie krigingowej mapy rozkładów ciśnień i przepływów w sieci (rys. 17.16).

Dla zadania optymalizacji definiuje się następujące kryteria jakości (rys. 17.17):

- $F(1)$ (Min: suma różnic między zadaniem i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych sieci wodociągowej)
- $F(2)$ (Max: sprawność energetyczna pompowni)
- $F(3)$ (Min: suma ciśnień wyjściowych we wszystkich pompowniach sieci wodociągowej)
- $F(4)$ (Max: minimalna prędkość przepływu wody w odcinakach sieci)
- $F(5)$ (Min: łączne koszty inwestycyjne optymalizacji)
- $F(6)$ (Min: cena 1 m^3 wody)



Rys. 17.16. Badana sieć wodociągowa i mapa krigingowa rozkładu przepływów w sieci wyznaczona na podstawie obliczeń hydraulicznych.

Network planning

Planning parameters

Efficiency of pumps [%]: Save parameters

Current year:

Desired pressure [mWC] for customer nodes

Pressure: Save for all customer nodes

Pressure: Save for node:

Pressure value can also be changed in nodes data table

List of steering variables					
Object type	Object id...	Type of variability	Lower bound	Upper bound	
Node	'73'	Pump pressure [mWC]	85	92	Add for node
Node	'44'	Height ab. sea level [m]	227	236	Add for pipe
Pipe	'514'	Diameter [mm]	350	600	Read from file
Pipe	'1017'	Additional pressure [mWC]	0	20	Check validity (structural)
Pipe	'47'	Valve	-1	1	Edit item
					Delete item

Economic parameters

Credit interest rate [%]: <input type="text" value="7.5"/>	Count of personel per km of pipe: <input type="text" value="0.2"/>	Cost of pump-house [zł]: <input type="text" value="500000.0"/>
Credit term (duration) [years]: <input type="text" value="15"/>	Cost of employee per year [1000 zł]: <input type="text" value="35.0"/>	Pipe cost per thickness length [zł/mm/m]: <input type="text" value="0.5"/>
Planning horizon [years]: <input type="text" value="3"/>	Extra charge of personal costs [%]: <input type="text" value="25.0"/>	Number of households (population): <input type="text" value="700"/>
Share of other financial sources [%]: <input type="text" value="20.0"/>	Energy costs for pumps per kWh [zł/kWh]: <input type="text" value="0.3"/>	Drinkwater consumption per head and year: <input type="text" value="350.0"/>

Objective functions Close

Optimization details

Steering variables						
Object type	Object ident.	Type of variability	Lower bound	Upper bound	Referenced value	Calculated value
Node	'73'	Pump pressure [mWC]	85	92	90	
Node	'44'	Height ab. sea level [m]	227	236	233.1999969	
Pipe	'514'	Diameter [mm]	350	600	400	
Pipe	'1017'	Additional pressure [mWC]	0	20	0	
Pipe	'47'	Valve	-1	1	0	

Export to Excel with column headers

Criterion type	Criterion value
MIN { FUN (1) = SUM [deviation of target pressure] [m WC] }	
MAX { FUN (2) = energy efficiency [%] }	
MIN { FUN (3) = SUM [output pressure of pumpstations] [m WC] }	
MAX { FUN (4) = MIN [streaming velocity] [m/s] }	
MIN { FUN (5) = total investment cost [zł] }	
MIN { FUN (6) = price of drinking water [zł/m3] }	

Rys. 17.17. Przygotowanie danych (rysunek górny), definicja funkcji celu oraz wyniki obliczeń (rysunek dolny) na ekranach programu optymalizacji sieci wodociągowej.

Są to kryteria średniokwadratowe ($F(1)$) i również minimaksowe ($F(4)$), co powoduje, że obliczenia optymalizacji są bardzo długie i wymagają często wielotyśięcznych obliczeń funkcji celu, a więc również obliczeń modelu hydraulicznego.

Po zdefiniowaniu kryteriów jakości należy określić wartości parametrów występujących w kryteriach (na przykład koszt 1 kWh pracy pompy) oraz dokonać wyboru obiektów sieci wodociągowej, których parametry będą zmieniane (rys. 17.17). Ten ostatni wybór jest arbitralny i musi być dokonany na podstawie oceny pracy sieci wynikającej z wcześniejszych obliczeń modelu hydraulicznego.

- **Detekcja i lokalizacja wycieków wody**

Jednym z podstawowych czynników decydujących o niezawodności pracy sieci wodociągowej i bezpieczeństwie dostaw wody do odbiorców jest jej awaryjność. O stopniu awaryjności rozstrzyga stan techniczny sieci wodociągowej i sposób jej eksploatacji. W szczególności dotyczy to przewodów wodociągowych, które z powodu rdzewienia, naprężeń gruntowych lub niewłaściwych ciśnień ulegają awariom. Taka sytuacja dotyczy przede wszystkim starych miejskich sieci wodociągowych, w których niekorzystna struktura wiekowa i materiałowa powoduje zmniejszenie wytrzymałości przewodów, i jeżeli dodatkowo wystąpią takie czynniki, jak niskie temperatury zimą powodujące głębokie zamarzanie gruntu lub zbyt wysokie ciśnienia w sieci, to awaryjność sieci gwałtownie wzrasta i często głównym zadaniem eksploatacyjnym staje się wówczas usuwanie licznych awarii. Awarie sieci wodociągowej prowadzą wtedy do dużych strat wody, dochodzących niekiedy nawet do 30% całej produkcji wody, co staje się istotnym problemem ekonomicznym dla przedsiębiorstwa wodociągowego z powodu rosnących kosztów eksploatacyjnych sieci, skutkujących między innymi wzrostem ceny wody dla indywidualnych użytkowników sieci.

Aby przeciwdziałać takim sytuacjom, należy przede wszystkim odpowiednio planować i przeprowadzać prace rewitalizacyjne na sieci wodociągowej, polegające na wymianie awaryjnych przewodów na nowe, oraz odpowiednio uregulować ciśnienie pompowania w stacjach pomp zlokalizowanych na sieci, biorąc pod uwagę również ewentualną konieczność instalacji nowej przepompowni strefowej lub nowego zbiornika wyrównawczego, czyli dokonania optymalizacji sieci. Jednak rewitalizacja sieci wodociągowej i jej optymalizacja nie są działaniami związanymi z bieżącą eksploatacją, czyli *zarządzaniem operacyjnym*, natomiast wchodzi w zakres planowania długookresowego, czyli *zarządzania strategicznego*.

Działaniem doraźnym w przypadku już zachodzących stanów awaryjnych jest natomiast szybkie rozpoznawanie i lokalizacja awarii, w tym w szczególności

detekcja wycieków ukrytych w sieci wodociągowej, niewidocznych na powierzchni gruntu.

Straty wody w sieci, mierzone różnicą między produkcją i sprzedażą wody, można podzielić na cztery rodzaje: straty spowodowane zużyciem wody na cele techniczne, w tym czyszczenie przewodów wodociągowych, straty spowodowane kradzieżami oraz straty spowodowane awariami, które dzieli się z kolei na straty spowodowane awariami odkrytymi, gdy woda z pękniętego przewodu wylewa się na powierzchnię gruntu, i straty spowodowane wyciekami ukrytymi, gdy woda nawet przez dłuższy czas przedostaje się do gruntu i wyciek nie jest widoczny na powierzchni. Jest dosyć trudno zidentyfikować udział każdego z tych czterech czynników w globalnych stratach wody i na ogół nie ma takiej wiedzy w przedsiębiorstwach wodociągowych, jednak można przyjąć, że większość strat jest spowodowana awariami sieci wodociągowej. Dlatego wczesne wykrycie i zlokalizowanie awarii, która wystąpiła na sieci wodociągowej, jest ważnym zadaniem zwiększającym niezawodność i bezpieczeństwo pracy sieci.

Zagadnieniom wykrywania stanów awaryjnych w systemach sieciowych, w tym w szczególności wodociągowych, z zastosowaniem metod modelowania matematycznego, poświęcono już wiele prac (Malinowski, 2012; Turkowski i in., 2007; Wyczolkowski, Moczulski, 2005), jednak są to dotychczas jedynie prace teoretyczne i ich wyniki nie są wdrażane w praktyce. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest fakt, że implementacja opracowanych algorytmów wymaga gęstego opomiarowania obiektu, co wiąże się z dużymi kosztami inwestycyjnymi, przekraczającymi na ogół finansowe możliwości krajowych komunalnych przedsiębiorstw wodociągowych.

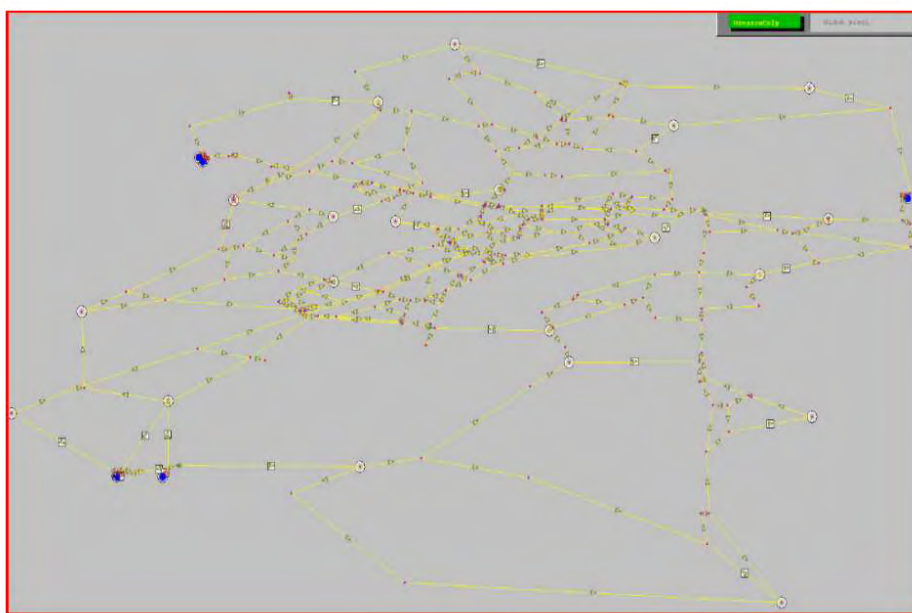
W proponowanym systemie informatycznym jest zaimplementowanych kilka algorytmów wykrywania i lokalizacji awarii na sieci wodociągowej, przy czym jeden z nich był testowany na sieci wodociągowej w Koenigs Wusterhausen w Niemczech (Studziński, Straubel, 2000 i 2007).

Zasada działania tych algorytmów jest następująca: W przypadku normalnego, bezawaryjnego funkcjonowania sieci wodociągowej, w punktach pomiarowych systemu monitoringu zainstalowanego na sieci ustala się określony rozkład ciśnień i przepływów. Jeżeli w sieci nastąpi awaria powodująca wyciek wody, to spowoduje on zmianę rozkładów ciśnienia i przepływów rejestrowanych w punktach pomiarowych.

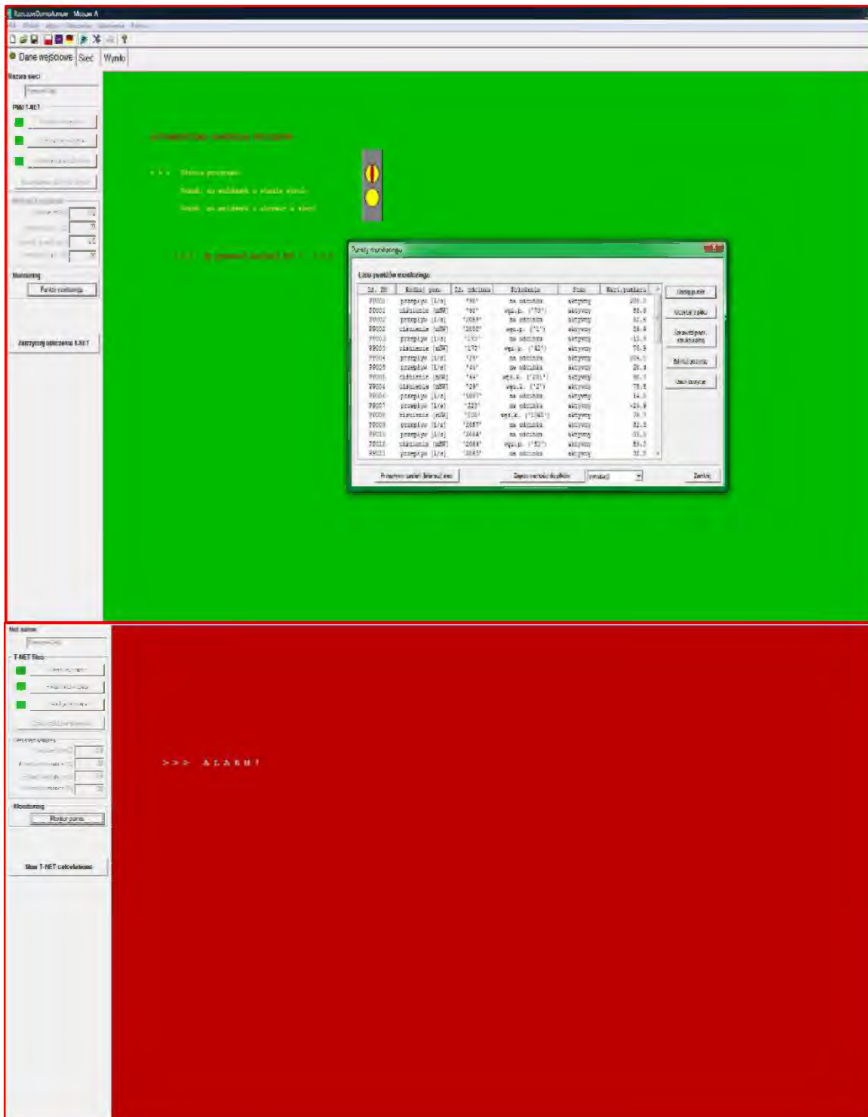
Dlatego rejestrując nietypową zmianę tych rozkładów można stwierdzić nietypowe obciążenie sieci i wnioskować o wystąpieniu awarii. Jeżeli dla każdego węzła i przewodu sieci wodociągowej dokona się symulowanego wycieku z uży-

ciem modelu hydraulicznego sieci i zapamięta się odpowiadające tym wyciekom rozkłady ciśnienia i przepływu w punktach systemu monitoringu, to porównując aktualne zarejestrowane nietypowe rozkłady z rozkładami otrzymanymi z symulacji i znajdując rozkłady wzajemnie do siebie pasujące będzie można zlokalizować przypuszczalne miejsce wystąpienia potencjalnej awarii.

Widać przy tym, że do realizacji takiego algorytmu jest wymagany odpowiednio zaplanowany system monitoringu na sieci wodociągowej i dobrze skalibrowany jej model hydrauliczny.

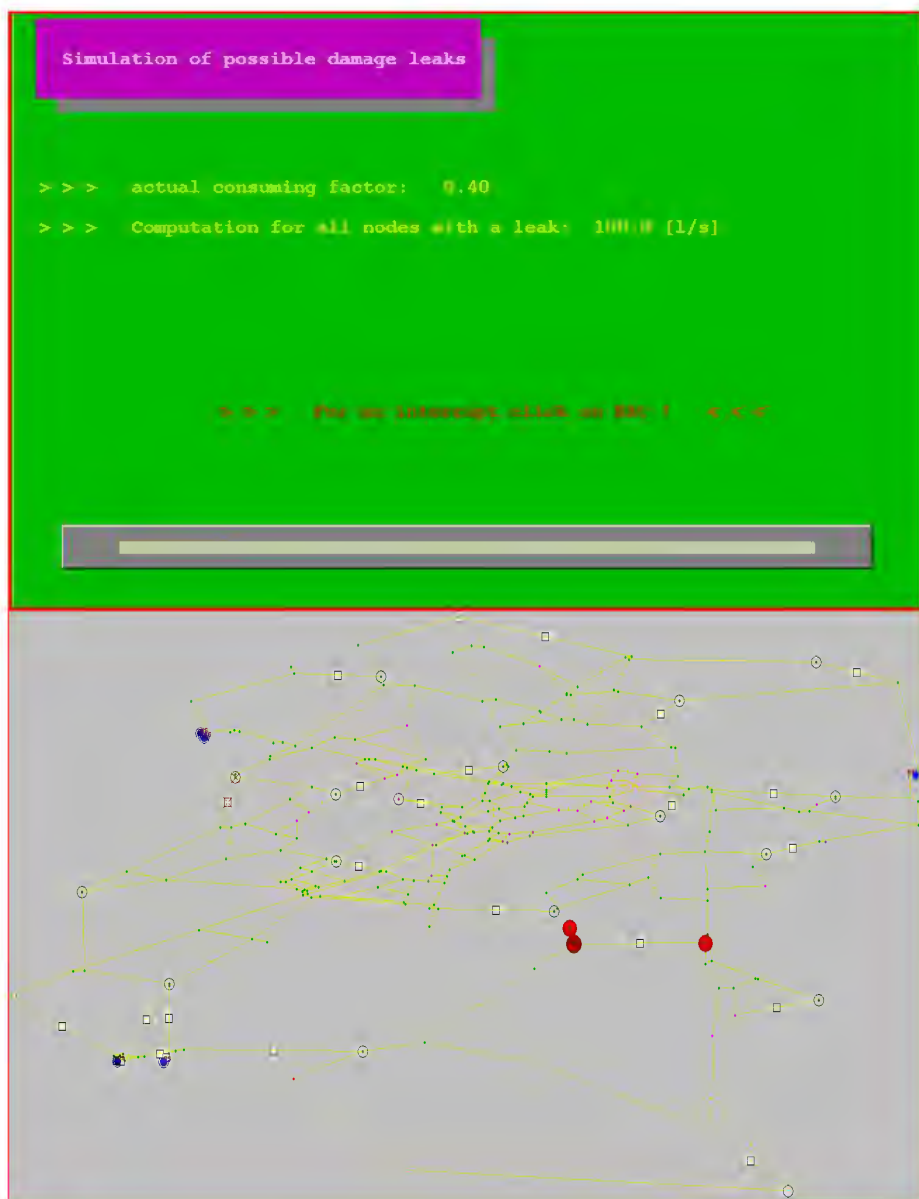


Rys. 17.18. Widok monitorowanej sieci wodociągowej z zaznaczonymi punktami pomiarowymi w węzłach (oznaczonymi kółkiem) i odcinkach (oznaczonymi kwadratem) sieci.



Rys. 17.19. Sygnalizacja normalnej pracy sieci wodociągowej (lewy ekran) i sygnalizacja stanu awaryjnego (prawy ekran).

Pierwszy z proponowanych algorytmów (algorytm 1) składa się z następujących kroków (Studziński, 2012b):



Rys. 17.20. Symulacja wycieków w węzłach i odcinkach sieci wodociągowej za pomocą modelu hydraulicznego (ekran lewy) i lokalizacja miejsc z podejrzeniem wystąpienia awarii (ekran prawy).

1. Bieżąca rejestracja stanu pracy sieci wodociągowej za pomocą systemu monitoringu sprzęgniętego z programem detekcji awarii (rys. 17.18 i 17.19); stan oczekiwania systemu informatycznego.
2. Sygnalizacja stanu awaryjnego na sieci w przypadku, gdy zarejestrowane bieżące wartości ciśnienia i przepływu w punktach pomiarowych odbiegają od wcześniej ustalonych wartości standardowych (rys. 17.19); przejście w stan aktywny systemu informatycznego.
3. Symulacja wycieków kolejno w każdym węźle i każdym odcinku sieci wodociągowej za pomocą modelu hydraulicznego i rejestracja obliczonych rozkładów ciśnienia i przepływu w punktach sieci odpowiadających punktom pomiarowym systemu monitoringu (rys. 17.20).
4. Porównywanie aktualnych rozkładów ciśnienia i przepływu z punktów monitoringu z rozkładami obliczonymi z symulowanych wycieków; znalezienie rozkładów najbardziej do siebie pasujących i wskazanie jednego lub kilku punktów na sieci podejrzanych o wystąpienie w nich awarii (rys. 17.20).

Przedstawiony algorytm był testowany w przedsiębiorstwie wodociągowym w Koenigs Wusterhausen.

Kolejny algorytm detekcji wycieków zaimplementowany w systemie informatycznym (algorytm 2) jest oparty o model sieci neuronowej (Studziński, Rojek, 2012; Wyczolkowski, Wysogład, 2007). W tym algorytmie pierwsze trzy kroki poprzedniego algorytmu są identyczne, natomiast kolejne kroki są następujące:

1. Na podstawie wartości ciśnień i przepływów obliczonych w punktach monitoringu dla wycieków symulowanych, zdefiniowanie plików danych wejściowych dla modeli neuronowych; dane definiujące węzeł lub przewód sieci wodociągowej z symulowaną awarią są wartościami sygnału wyjściowego obliczanej sieci neuronowej, natomiast odpowiadające tym danym rozkłady ciśnienia i przepływu z punktów monitoringu są sygnałami wejściowymi podawanymi na neurony warstwy wejściowej sieci.
2. Wyznaczenie modelu neuronowego lokalizującego wycieki w sieci wodociągowej na podstawie obliczeń symulacyjnych stanów awaryjnych.
3. Lokalizacja wycieku za pomocą wyznaczonego modelu neuronowego na podstawie aktualnych pomiarów z systemu monitoringu, sygnalizujących stan awarii.

W przedstawionym algorytmie do lokalizacji awarii zastosowano sieci neuronowe typu MLP (*Multi Layer Perceptron*), w których na etapie uczenia używa się algorytmu BFGS (*Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*), minimalizującego funkcję celu w postaci sumy kwadratów błędów modelowania.

Tablica 17.1. Wyznaczone modele neuronowe do detekcji wycieków w sieci wodociągowej; obliczenia wykonane dla 10 punktów pomiarowych zainstalowanych na badanej sieci.

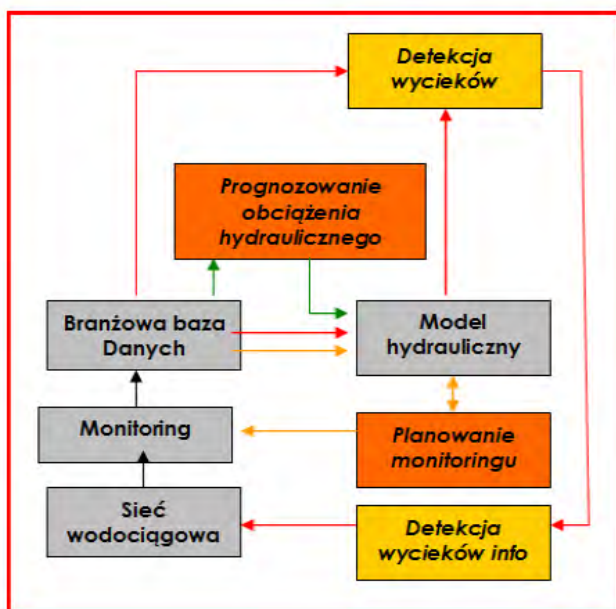
No.	Neural network name	Learning quality	Testing quality	Validation quality
1	MLP-36-8-11	88,31776	95,55556	88,88889
2	MLP-36-15-11	97,66355	97,77778	95,55556
3	MLP-36-22-11	94,39252	97,77778	93,33333
4	MLP-36-19-11	97,66355	97,77778	95,55556
5	MLP-36-21-11	94,39252	97,77778	93,33333
6	MLP-36-24-11	97,19626	97,77778	97,77778
7	MLP-36-23-11	97,66355	97,77778	95,55556

Tablica 17.2. Wyznaczone modele neuronowe do detekcji wycieków w sieci wodociągowej; obliczenia wykonane dla 20 punktów pomiarowych zainstalowanych na badanej sieci.

No.	Neural network name	Learning quality	Testing quality	Validation quality
1	MLP-44-25-21	97,2222	100,0000	98,1481
2	MLP-44-18-21	100,0000	100,0000	100,0000
3	MLP-44-21-21	98,0159	96,2963	98,1481
4	MLP-44-18-21	87,6984	85,1852	83,3333
5	MLP-44-19-21	90,0794	88,8889	83,3333
6	MLP-44-24-21	80,5556	75,9259	81,4815
7	MLP-44-8-21	93,6508	90,7407	94,4444

W poprzednim algorytmie detekcji wycieków dokonuje się jedynie za pomocą modelu hydraulicznego, odzwierciedlającego badany obiekt, a samo wskazanie możliwego miejsca awarii jest opcjonalne i dokonywane zasadniczo ręcznie, na

podstawie utworzonej listy rankingowej takich miejsc z zastosowaniem miary największego podobieństwa między rozkładem mierzonych parametrów zarejestrowanym aktualnie przez system monitoringu i rozkładami tych parametrów otrzymanymi z obliczeń symulacyjnych (krok 4 algorytmu 1).



Rys. 17.21. Współpracujące programy systemu informatycznego przy modelowaniu lokalizacji awarii w sieci wodociągowej.

W algorytmie drugim model hydrauliczny sieci wodociągowej jest traktowany jako obiekt, który jest modelowany przy użyciu sieci neuronowej, i wskazanie miejsca wycieku odbywa się już automatycznie za pomocą wyznaczonego modelu neuronowego (krok 6 algorytmu 2). Wykonane obliczenia testujące z zastosowaniem trójwarstwowej sieci neuronowej są bardzo obiecujące i wskazują na dużą dokładność i niezawodność wskazań. Jednocześnie pokazują one, jak istotną rzeczą jest dysponowanie odpowiednio gęstym systemem punktów pomiarowych zainstalowanych na sieci wodociągowej; zwiększając liczbę punktów pomiarowych istotnie zwiększa się dokładność lokalizacji wycieków (tablice 1 i 2).

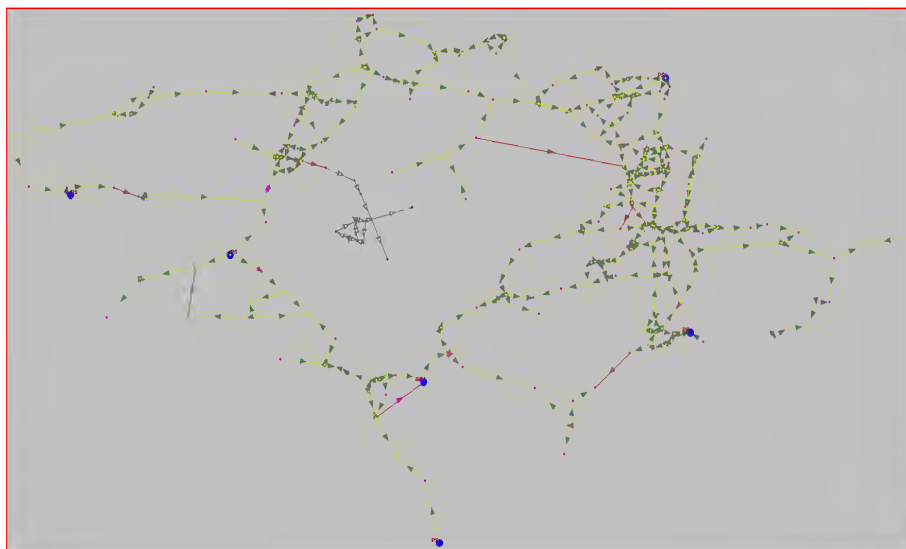
Na rys. 17.21 pokazano schemat współpracy programów systemu informatycznego przy detekcji stanów awaryjnych w sieci wodociągowej (Stachura i in., 2012a).

- ***Sterowanie pracą pomp***

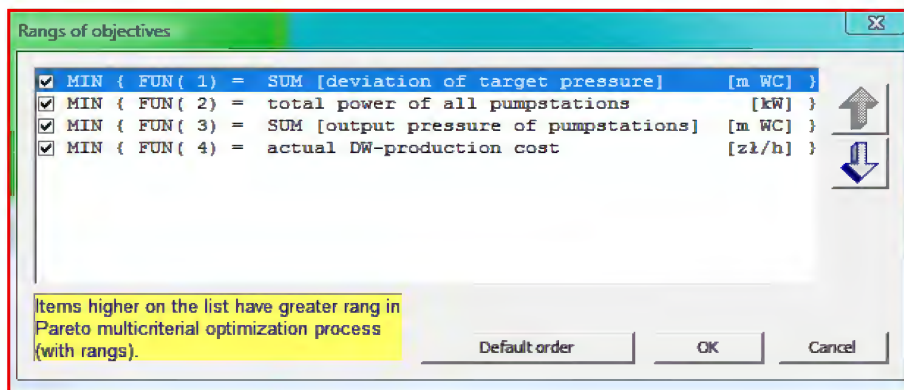
Podstawowym urządzeniem wykonawczym na sieci wodociągowej są pompy zainstalowane w pompowniach źródłowych i w przepompowniach strefowych. Ich zadaniem jest utrzymywanie ciśnienia w sieci na takim poziomie, aby jej użytkownicy mogli w sposób niezakłócony pobierać wodę i jednocześnie, aby to ciśnienie nie było źródłem awarii w sieci. Pompy są urządzeniami bardzo energochłonnymi i w dużym stopniu decydują o kosztach eksploatacyjnych sieci wodociągowej. Pracują one w zestawach pompowych złożonych z kilku urządzeń, często różnych typów. Zdarzające się awarie pomp, wynikające z ich zużycia lub przeciążenia, negatywnie wpływają na niezawodność pracy sieci wodociągowej i bezpieczeństwo dostaw wody do użytkowników sieci.

Dlatego rozwiązując problem sterowania pompami sieci wodociągowej należy uwzględnić następujące kluczowe zagadnienia: zapewnienie właściwych ciśnień w sieci, minimalizację zużycia energii elektrycznej oraz minimalizację zużycia samych urządzeń pompowych. Problem ten w prezentowanym systemie informatycznym można rozwiązywać na dwa sposoby, w każdym z nich opracowując takie scenariusze pracy pomp, aby zapewnić zadane rozbiory wody w węzłach odbiorczych sieci wodociągowej przy minimalnych kosztach eksploatacyjnych i prawidłowych parametrach pracy sieci.

W pierwszym przypadku (zadanie 1) nie indywidualizuje się poszczególnych pomp i badaną stację pomp traktuje się jako pompę uogólnioną o określonym ciśnieniu wyjściowym. Jednocześnie zadanie ma charakter statyczny, to znaczy nie uwzględnia ono zmian obciążenia sieci wodociągowej zachodzących w czasie i obliczenia wykonuje się dla zadanych uśrednionych rozbiorów wody. Zadanie sterowania rozwiązuje się za pomocą algorytmu optymalizacji wielokryterialnej, definiując w tym celu na następujące kryteria jakości (rys. 17.22 i 17.23):



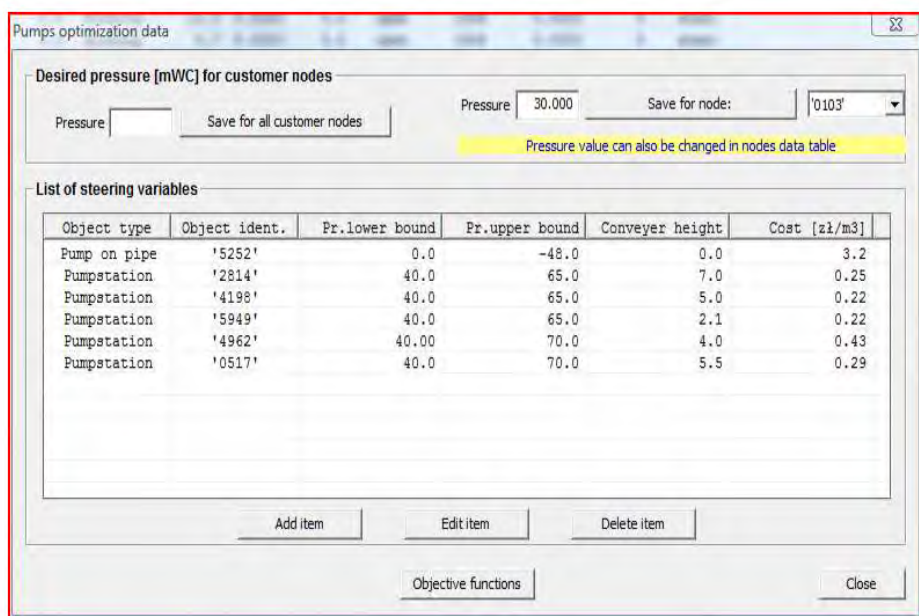
Rys. 17.22. Widok badanej sieci wodociągowej z sześcioma zainstalowanymi na niej stacjami pomp.



Rys. 17.23. Kryteria jakości zdefiniowane dla zadania 1 sterowania.

- $F(1)$ (Min: suma różnic między zadanyim i obliczonym ciśnieniem w węzłach odbiorczych sieci wodociągowej)
- $F(2)$ (Min: łączna moc wszystkich pompowni zainstalowanych na sieci)

- $F(3)$ (Min: suma ciśnień wyjściowych we wszystkich pompowniach sieci wodociągowej)
- $F(4)$ (Min: koszty produkowanej wody).



Desired pressure [mWC] for customer nodes

Pressure: Save for node:

Pressure value can also be changed in nodes data table

List of steering variables

Object type	Object ident.	Pr.lower bound	Pr.upper bound	Conveyer height	Cost [zł/m3]
Pump on pipe	'5252'	0.0	-48.0	0.0	3.2
Pumpstation	'2814'	40.0	65.0	7.0	0.25
Pumpstation	'4198'	40.0	65.0	5.0	0.22
Pumpstation	'5949'	40.0	65.0	2.1	0.22
Pumpstation	'4962'	40.00	70.0	4.0	0.43
Pumpstation	'0517'	40.0	70.0	5.5	0.29

Add item Edit item Delete item

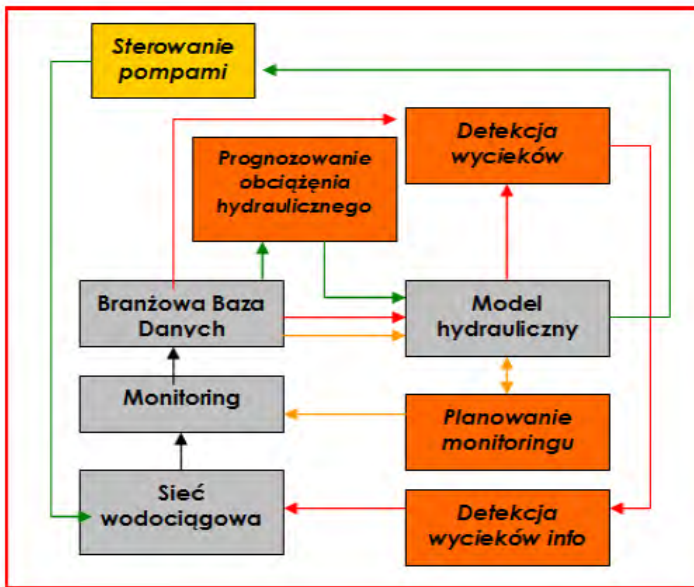
Objective functions Close

Rys. 17.24. Dane wejściowe i wyniki obliczeń algorytmu sterowania dla sześciu stacji pomp zainstalowanych na sieci wodociągowej dla zadania 1 sterowania.

W wyniku obliczeń otrzymuje się zbiór scenariuszy pracy pomp, z których operator sieci wybierze najlepszy do realizacji, kierując się przy tym własnymi już arbitralnymi preferencjami (rys. 17.24).

W drugim przypadku (zadanie 2) pompy w pompowniach traktuje się jako oddzielne urządzenia o zadanych zindywidualizowanych charakterystykach pracy. Dzięki temu w zadaniu sterowania można uwzględnić pracę pojedynczych urządzeń pompowych względnie pracę kombinacji różnych pomp w ramach jednej pompowni. Jednocześnie zadanie ma charakter dynamiczny, to znaczy uwzględnia się w nim zmiany obciążenia sieci wodociągowej zachodzące w czasie i obliczenia wykonuje się dla rozbiorów wody zmieniających się według zadanej funkcji. Dzięki takiemu podejściu można, w odróżnieniu od zadania 1, zająć się tutaj zagadnie-

niem zużycia energii przez poszczególne pompy lub ich odpowiednie zestawy a także zagadnieniem zużywania się pomp w wyniku ich włączania i wyłączenia. W pracy (Waterworth, 2002) autor podaje, że odpowiednie sterowanie pracą pojedynczych pomp w pompowniach może w istotny sposób zwiększyć ich czas życia i jednocześnie zmniejszyć zużycie energii elektrycznej o kilka procent. Zadanie 2 sterowania rozwiązuje się również za pomocą algorytmu optymalizacji wielokryterialnej, przy czym jego rozwiązanie wymaga znajomości rozkładów godzinowych rozborów wody w węzłach końcowych sieci w okresie 1 doby oraz podania charakterystyk pracy dla wszystkich pomp zainstalowanych na sieci.



Rys. 17.25. Współpracujące programy systemu informatycznego przy modelowaniu lokalizacji awarii w sieci wodociągowej.

Definiowane dla celów optymalizacji kryteria jakości mogą być następujące:

- $F(1)$ (Min: maksymalna różnica między zadanim i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych sieci wodociągowej)
- $F(2)$ (Min: suma dobowego zużycia energii przez wszystkie pompy)
- $F(3)$ (Min: maksymalna liczba włączeń/wyłączeń pojedynczej pompy)

- $F(4)$ (Min: maksymalne ciśnienie pompowania ustalone dla pojedynczej pompy)
- $F(5)$ (Max: minimalna prędkość przepływu wody w przewodach sieci)
- $F(6)$ (Max: łączna wymiana wody w zbiornikach wyrównawczych zainstalowanych na sieci wodociągowej).

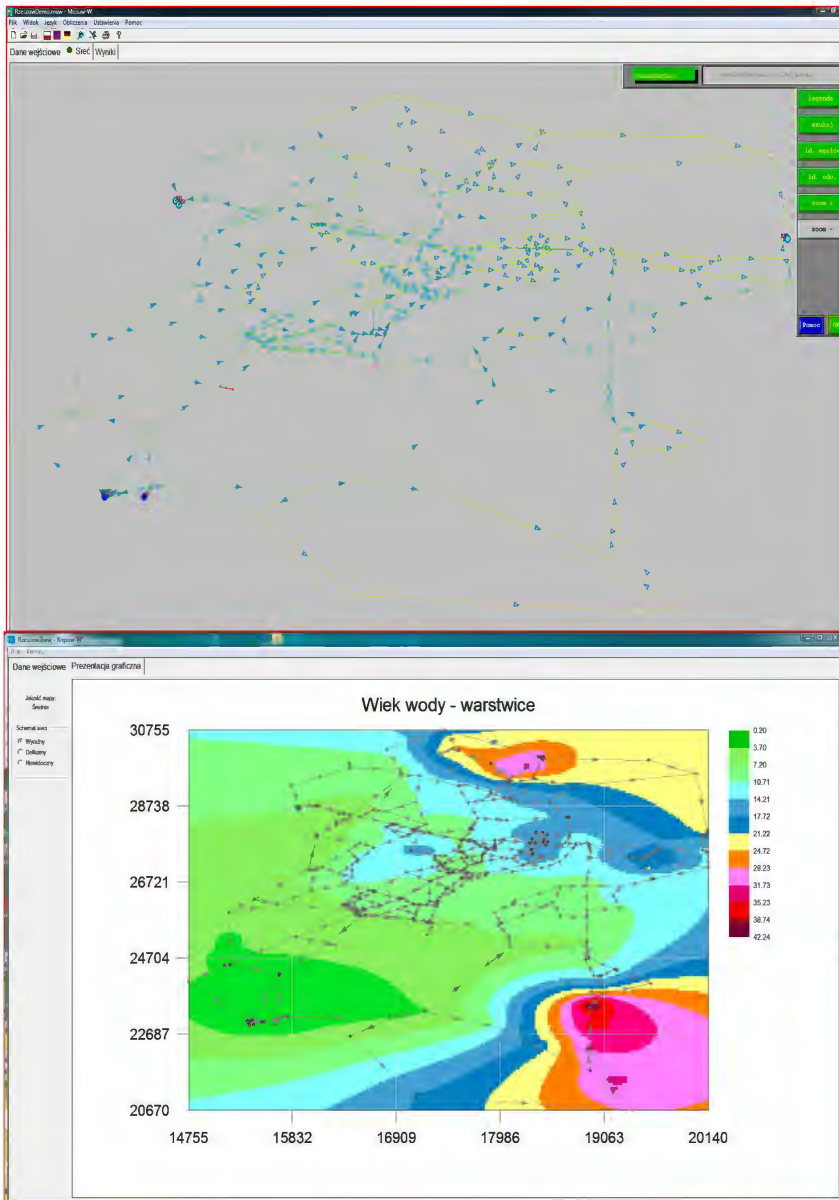
W wyniku obliczeń otrzymuje się zbiór 24-godzinnych harmonogramów pracy pomp, z których operator sieci wybiera już w sposób arbitralny najlepszy harmonogram.

Na rys. 17.25 pokazano schemat współpracy programów systemu informatycznego przy rozwiązywaniu zadania sterowania pompami w sieci wodociągowej (Stachura i in., 2012a).

- ***Kontrola stabilności jakości wody wodociągowej***

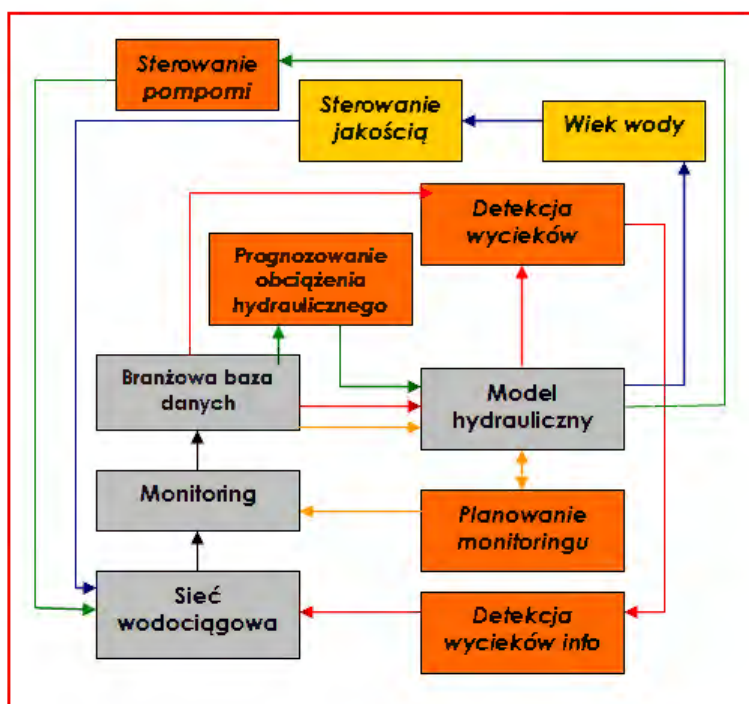
O dobrze pracującej sieci wodociągowej decydują nie tylko właściwe ciśnienia w węzłach odbiorczych, niska awaryjność sieci i jej niskie koszty eksploatacyjne, ale również dobra jakość wody dostarczanej do użytkowników sieci. Często zdarza się, że uzdatniona woda o doskonałej jakości, która jest pompowana do sieci, ma już złą jakość w jej oddalonych węzłach końcowych. Przyczyną jest zwykle zły stan techniczny sieci wodociągowej i niewłaściwe sterowanie siecią, powodujące, że wiek wody przebywającej w sieci jest wysoki. Dotyczy to przede wszystkim starych miejskich sieci wodociągowych o niekorzystnej strukturze materiałowej i wiekowej. Jeżeli woda przebywa zbyt długo w takich sieciach lub jej prędkość przepływu jest mała, to wtedy pogarsza się jej jakość poprzez niekorzystne zmiany smaku i zapachu (Rossman, Boulos, 1996).

Postępowań zaradczych w takich sytuacjach może być kilka, przy czym jedne mają charakter inwestycyjny i wiążą się z modernizacją infrastruktury sieci, natomiast inne polegają na zmianie sterowania operacyjnego siecią. W każdym przypadku należy najpierw obliczyć wiek wody w badanej sieci wodociągowej, aby stwierdzić, czy rzeczywiście zastana sytuacja wymaga poprawy (rys. 17.26).



Rys. 17.26. Obliczanie wieku wody za pomocą modelu hydraulicznego (ekran lewy) i mapa rozkładu wieku wody w sieci wodociągowej wykreślona za pomocą algorytmu aproksymacji krigingowej (ekran prawy).

Przedsięwzięcia modernizacyjne polegają przede wszystkim na zaplanowaniu i wykonaniu rewitalizacji sieci wodociągowej, czyli wymianie starych i zużytych przewodów wodociągowych na nowe, lub na takiej optymalizacji sieci, w której uwzględnia się kryterium jakości związane z maksymalizacją prędkości przepływu wody w przewodach sieci. W tym drugim przypadku wprowadzie wiek wody przebywającej w całej sieci wodociągowej nie ulegnie zmianie, jednak zmniejszy się jej czas przebywania w poszczególnych odcinkach sieci. Innym rozwiązaniem inwestycyjnym może być instalacja w punktach wewnętrznych sieci wodociągowej dodatkowych stacji uzdatniania wody (Drewa, 2006).



Rys. 17.27. Współpracujące programy systemu informatycznego przy obliczaniu wieku wody i sterowaniu jakością wody w sieci wodociągowej.

Przedsięwzięcia związane z opracowaniem odpowiednich algorytmów sterowania mogą dotyczyć albo opracowania odpowiedniego harmonogramu sterowania pompami, ponownie z uwzględnieniem kryterium jakości maksymalizującego prędkości przepływu wody w przewodach sieci, albo zastosowania algorytmu

sterowania zasuwami zainstalowanymi w przewodach sieci wodociągowej: poprzez odpowiednie zamykanie i otwieranie zasuw można tak zmieniać rozpiętość wody w odcinkach sieci, że jej czasy przebywania w nich ulegają istotnemu skróceniu, wpływając w konsekwencji na poprawę jakości wody (Stachura i in., 2012a, 2012b).

Algorytmy dotyczące planowania działań rewitalizacyjnych i optymalizacyjnych na sieci wodociągowej oraz algorytmy sterowania operacyjnego pompami i zasuwami są zaimplementowane w proponowanym systemie informatycznym zarządzania siecią (Studziński, 2013b).

Na rys. 17.27 pokazano schemat współpracy programów systemu informatycznego przy rozwiązywaniu zadania sterowania jakością wody w sieci wodociągowej (Stachura i in., 2012a).

17.5. Podsumowanie

Reasumując powyższe rozważania można podkreślić, że o niezawodności pracy sieci wodociągowej i bezpieczeństwie dostaw wody do użytkowników sieci decydują przede wszystkim stan techniczny infrastruktury sieciowej oraz rodzaj sterowania operacyjnego siecią. W pierwszym przypadku należy dbać o dobry stan obiektów wodociągowych, w tym w szczególności przewodów sieci i zespołów pompowych w pompowniach i przepompowniach, w drugim przypadku należy stosować energooszczędne algorytmy sterowania pompami, minimalizując ich zużycie i zapewniając właściwe ciśnienia w węzłach użytkowników sieci. Jeżeli te wskazania nie są przestrzegane, to wzrasta awaryjność sieci, generując straty wody i straty finansowe przedsiębiorstwa wodociągowego, rosną koszty eksploatacyjne sieci wodociągowej, powodując wzrost cen wody u indywidualnych użytkowników sieci, psuje się jakość wody i pogarszają się warunki jej dostawy do odbiorców.

Zasadniczo jedynym właściwym i rozsądnym rozwiązaniem zapewniającym prawidłowe, ekonomiczne i niezakłócone funkcjonowanie miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę jest wdrożenie w przedsiębiorstwie wodociągowym zintegrowanego systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania siecią wodociągową, którego ogólną koncepcję funkcjonalną przedstawiono w tym rozdziale. System taki, bazujący na systemie GIS, systemie monitoringu, programie bilingowym (CIS) i modelu hydraulicznym sieci jako źródłach danych, oraz na algorytmach modelowania matematycznego i optymalizacji jako podstawowych narzędziach obliczeniowych, jest w stanie nadzorować na bieżąco stan pracy sieci wo-

dociągowej, wspomagać operatora sieci w jej sterowaniu operacyjnym i rozwiązywać w sposób quasi-optimalny wszelkie problemy związane z jej taktycznym (krótkofalowym) i strategicznym (długofalowym) zarządzaniem.

Należy zauważyć, że prezentowany w tym rozdziale system informatyczny uwzględnia w realizowanych przez siebie zadaniach takie, które mają charakter ściśle techniczny lub technologiczny, takie jak:

- planowanie systemu monitoringu,
- kalibracja modelu hydraulicznego sieci wodociągowej,
- modelowanie obciążenia hydraulicznego sieci,
- detekcja i lokalizacja stanów awaryjnych,
- optymalizacja sieci wodociągowej,
- sterowanie pompami,
- obliczanie wieku wody i sterowanie jakością wody,

oraz, dzięki zastosowanym algorytmom optymalizacji wielokryterialnej, może uwzględniać zadania o charakterze administracyjno-organizacyjnym, takie jak:

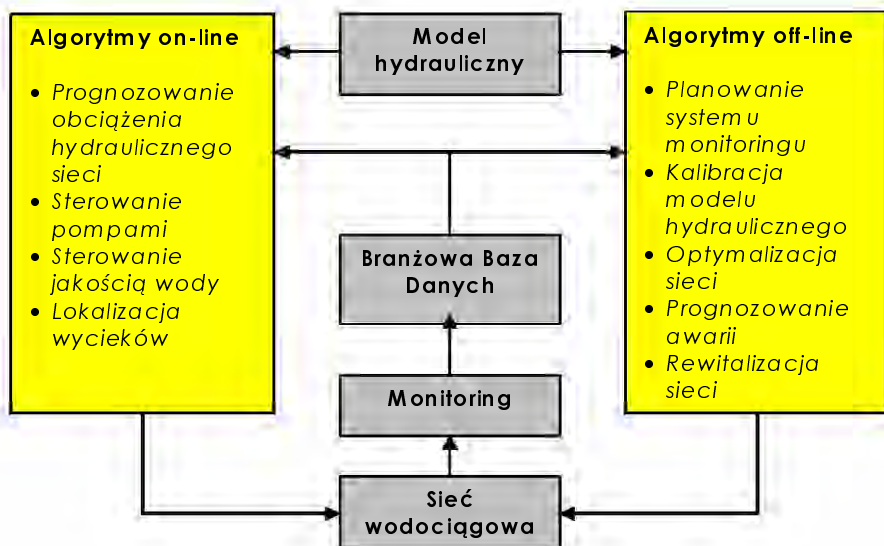
- planowanie cen wody z uwzględnieniem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych sieci wodociągowej,
- prognozowanie awaryjności sieci wodociągowej,
- planowanie rewitalizacji sieci.

Można przyjąć umowną kwalifikację, że zadania o charakterze technicznym należą do zarządzania ‘twardego’ (*hard management*) a zadania o charakterze organizacyjnym należą do zarządzania ‘miękkiego’ (*soft management*) siecią wodociągową. Ich integracja w ramach jednego systemu informatycznego powoduje, że mamy do czynienia z zarządzaniem kompleksowym siecią wodociągową.

Dodatkowo można dokonać podziału algorytmów funkcjonujących w ramach prezentowanego systemu informatycznego na algorytmy działające *on-line* i *off-line*, odnosząc ten podział do bieżącego zarządzania siecią wodociągową (rys. 17.28).

Algorytmy służące do prognozowania obciążenia hydraulicznego sieci, detekcji wycieków, sterowania operacyjnego pompami czy sterowania jakością wody decydują o aktualnym stanie pracy sieci wodociągowej i muszą być stosowane w praktyce eksploatacyjnej równoległe do bieżącego zarządzania siecią. Inne algo-

rytmy, jak te służące do planowania systemu monitoringu, planowania prac rewitalizacyjnych czy prognozowania awaryjności sieci decydują w sposób ogólny o niezawodności sieci wodociągowej i mogą być wykonywane niezależnie od bieżącego funkcjonowania sieci.



Rys. 17.28. Współpracujące programy systemu informatycznego przy obliczaniu wieku wody i sterowaniu jakością wody w sieci wodociągowej.

Problem z realizacją i implementacją przedstawionego systemu informatycznego w przedsiębiorstwie wodociągowym jest taki, że opracowanie takiego systemu wymaga od samego początku podejścia systemowego, to znaczy system powinien być tworzony jako kompletna struktura programowa, uwzględniająca funkcjonowanie dużej liczby programów, możliwość współpracy różnych algorytmów i posiadająca jednolity interfejs. Realizacja takiego przedsięwzięcia jest niestety kosztowna, czasochłonna i złożona pod względem organizacyjnym i logistycznym i dlatego nie jest częstym zdarzeniem w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych. Jednak rozwój tego typu zintegrowanych systemów informatycznych o kompleksowym działaniu jest obecnie trendem światowym i należy mieć nadzieję, że również w Polsce wzrost świadomości informatycznej zarządów przedsiębiorstw wodociągowych doprowadzi do rozwijania i wdrażania podobnych rozwiązań w miejskich systemach zaopatrzenia w wodę.

IBS PAN *Serw*

47323

Bibl. podręczna

ISSN 0208-8029
ISBN 83-894-7549-9

**INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

tel.: (+48) 22 3810246 / 22 3810277 / 22 3810241 / 22 3810273

e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl