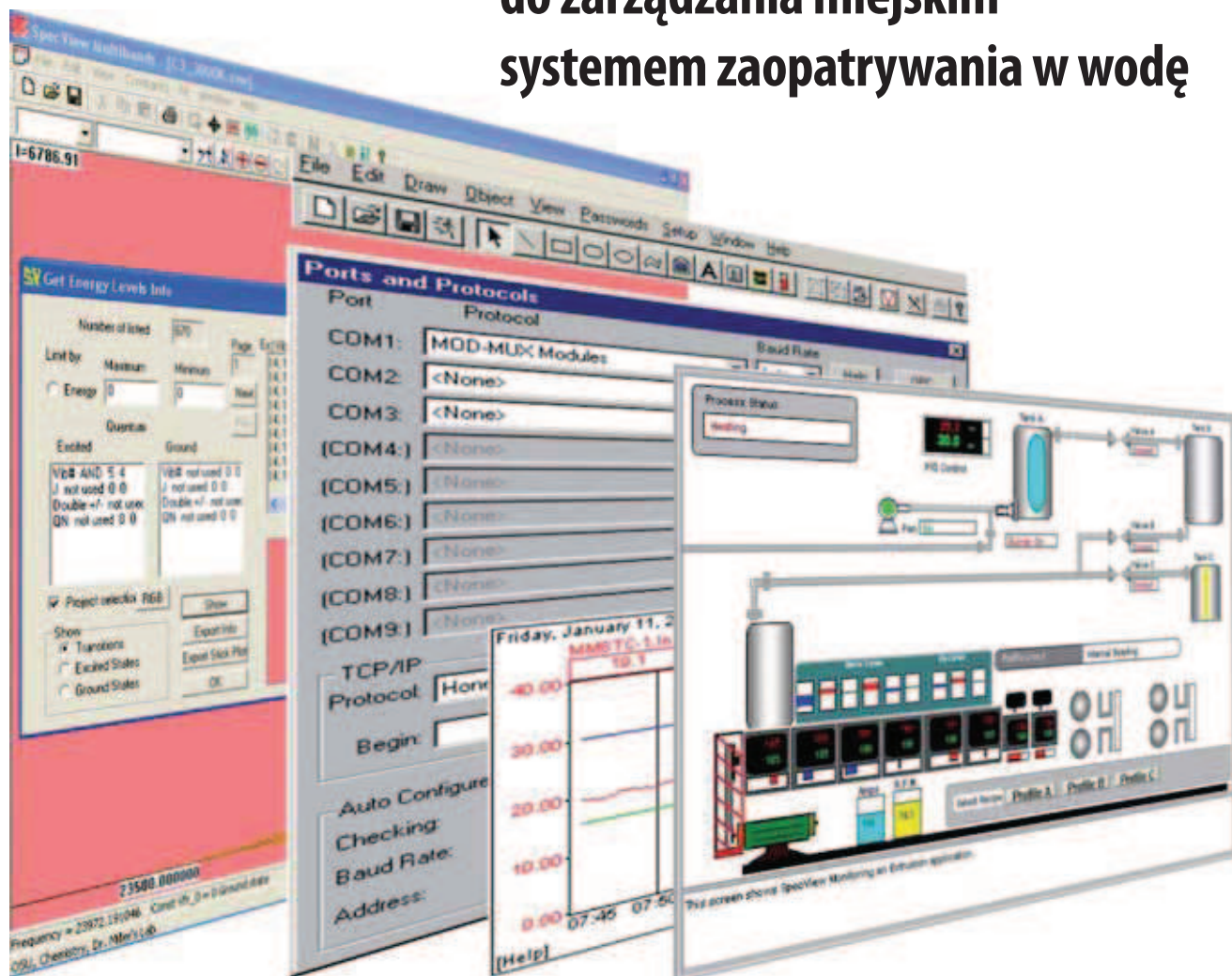


SCADA

do zarządzania miejskim
systemem zaopatrzenia w wodę



Fot.: www.cascade.net

Jan Studziński

Instytut Badań Systemowych PAN

Kluczowe znaczenie dla poprawnej realizacji zadań statutowych miejskiego przedsiębiorstwa wodociągowego ma prawidłowa eksploatacja podstawowych obiektów przedsiębiorstwa. Przy tym działanie sieci wodociągowej wpływa na jakość pracy pozostałych obiektów połączonych z nią szeregowo. Znaczne usprawnienie eksploatacji sieci można osiągnąć przez zastosowanie komputerowego wspomaganie jej zarządzania, w którym podstawowe role pełni system SCADA.

Zarządzanie miejskim systemem zaopatrzenia w wodę jest złożonym procesem decyzyjnym, który, dla poprawnej realizacji, powinien być wspomagany komputerowo. Zarządzanie opiera się na posiadanej wiedzy i doświadczeniu, będących wynikiem przetwarzania informacji zdobytych na podstawie posiadanych danych o sieci wodociągowej. Należą do nich dane pomiarowe pozyskiwane z automatycznych systemów monitoringu – SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), które już od kilkudziesięciu lat są instalowane w przedsiębiorstwach wodociągowych [1]. Pozyskiwane dane są używane do bieżącej kontroli i sterowania obiektami sieci wodociągowej, jednak powszechnie, po ich archiwizacji, nie są już wykorzystywane. W rezultacie użyteczna wiedza ukryta w danych nie zostaje z nich wydobyta i ulega zmarnowaniu.

Systemy monitoringu w systemach zaopatrzenia w wodę

Chociaż potrzeba stosowania systemów monitoringu do nadzorowania pracy sieci wodociągowej jest w przedsiębiorstwach wodociągowych rozumiana, to ich wdrażanie następuje bardzo powoli i na ogół w sposób mało efektywny. Zwykle instaluje się urządzenia pomiarowe w stacjach poboru i uzdatniania wody, w przepompowniach strefowych i na końcówkach sieci, traktując systemy monitoringu w sposób autonomiczny. Nie uwzględnia się podejścia systemowego, w którym system monitoringu jest elementem zintegrowanego systemu informatycznego, wspomagającego kompleksowe zarządzanie siecią wodociągową, a więc nie tylko bieżący nadzór jej pracy, ale również sterowanie siecią, projektowanie sieci, wykrywanie i lokalizację awarii, obliczanie wieku wody, kalibrację modelu hydraulicznego itp.

W koncepcji takiego systemu dominującą rolę odgrywają cztery moduły: system GIS generujący mapę numeryczną sieci, system monitoringu SCADA, modele matematyczne sieci do obliczeń hydraulicznych i prognozytycznych oraz algorytmy optymalizacji i aproksymacji służące do sterowania i projektowania sieci. Jednocześnie szczególna rola przypada w takim przypadku systemowi monitoringu, gromadzącemu bieżące i historyczne dane pomiarowe, umożliwiające tworzenie odpowiednich modeli matematycznych i algorytmów sterowania [2]. Aby za pomocą systemu monitoringu można było realizować te zadania, musi być on odpowiednio zaprojektowany i obejmować swoim działaniem cały obszar sieci wodociągowej, co wymaga z kolei podejścia systemowego, umożliwiającego stworzenie systemu monitoringu pomyślanego od początku jako integralny element złożonego systemu informatycznego. Wymaga to odpowiedniego zaangażowania organizacyjnego ze strony przedsiębiorstwa i jest przedsięwzięciem bardzo kosztownym, co powoduje, że nie ma obecnie w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych właściwie zaprojektowanych systemów monitoringu, a te systemy, które funkcjonują, nie umożliwiają realizacji zadań usprawniających kompleksowe zarządzanie przedsiębiorstwem.

Podstawową wadą instalowanych i eksploatowanych obecnie systemów monitoringu jest tworzenie ich jako lokalnych programów, a nie elementów jednolitego systemu informatycznego, co powoduje, że punkty pomiarowe są lokalizowane na ogół w miejscach niewłaściwych z punktu widzenia zarządzania siecią wodociągową. Dane zbierane z takich punktów umożliwiają wprawdzie kontrolę pracy sieci i jej kluczowych obiektów, natomiast nie pozwalają na opracowywanie modeli matematycznych i algorytmów sterowania usprawniających zarządzanie tymi obiektami. W rezultacie rejestrowane i archiwizowane dane pomiarowe, po bieżącym ich wykorzystaniu do celów kontrolnych, nie znajdują już dalszego zastosowania.

SYSTEMY MONITORINGU, instalowane obecnie w przedsiębiorstwach wodociągowych jako systemy lokalne, powinny być projektowane jako systemy obejmujące całą sieć wodociągową i zintegrowane z innymi programami wspomagającymi zarządzanie siecią.

Punkty pomiarowe dla systemów monitoringu powinny być ustalane w ten sposób, aby zebrane z nich dane pomiarowe umożliwiały nie tylko bieżący nadzór i kontrolę monitorowanych obiektów, ale aby również umożliwiały opracowanie niezbędnych modeli matematycznych oraz algorytmów sterowania i zarządzania obiektami.

Dane pomiarowe zbierane z systemów monitoringu powinny być nie tylko przechowywane, jak dzieje się to dotychczas, ale również wykorzystywane do zdobywania na ich podstawie odpowiedniej wiedzy o przedsiębiorstwie, jego obiektach i realizowanych w nich procesach, przy zastosowaniu odpowiednich metod eksploracji danych (data mining) [2].

Zadania zarządzania a dane z systemów

Istnieje cały szereg zadań związanych z zarządzaniem miejskim systemem zaopatrzenia w wodę, które są możliwe do realizacji dzięki zainstalowanemu w przedsiębiorstwie systemowi monitoringu, traktowanemu jako integralny element złożonego systemu informatycznego [4]. Nie jest właściwe projektowanie i wdrażanie jedynie wybranych modułów systemu informatycznego, natomiast w celu uzyskania spodziewanych efektów powinno się planować od razu cały system, uwzględniając współpracę wszystkich jego modułów, to znaczy systemu GIS mapy numerycznej, systemu monitoringu SCADA, modeli matematycznych obiektów oraz algorytmów optymalizacji i aproksymacji [6]. Jest to uzasadnione względami merytorycznymi oraz ekonomicznymi i organizacyjnymi. Cząstkowe podejścia do wykonania systemu informatycznego wydłużają proces uzyskania końcowego produktu, podrażają go i uniemożliwiają uzyskiwanie wszystkich założonych celów związanych z zarządzaniem siecią wodociągową.

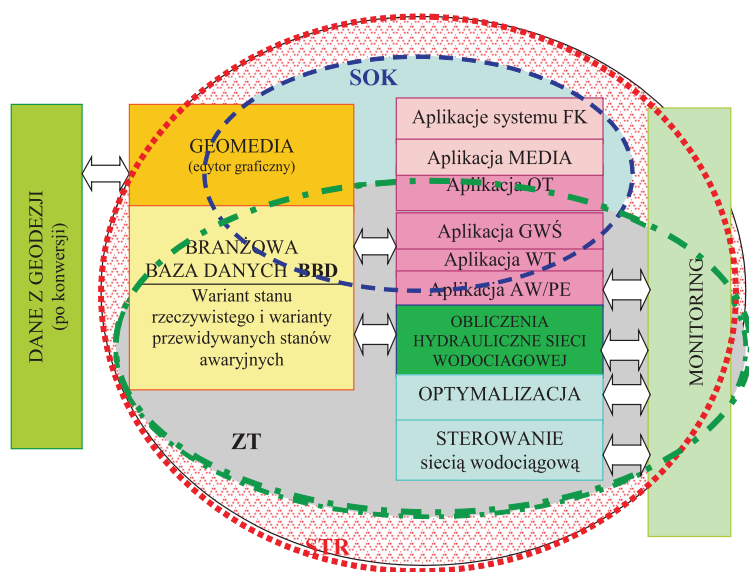
Podstawowe zadania związane z kompleksowym zarządzaniem siecią wodociągową, realizowane przez zintegrowany system informatyczny, są następujące:

- Komputerowa wizualizacja sieci wodociągowej w postaci mapy numerycznej.
- Wyznaczanie aktualnego stanu pracy sieci.
- Optymalizacja i projektowanie sieci wodociągowej [3].

- Sterowanie operacyjne siecią wodociagową [7].
- Lokalizacja awarii i ukrytych wycieków wody w sieci wodociagowej.
- Planowanie i obsługa planowanych przeglądów eksploatacyjnych sieci wodociagowej.
- Planowanie krótko- i długoterminowych prac rewitalizacyjnych i inwestycyjnych na sieci.
- Rejestracja i nadzór wydawanych warunków technicznych dla prac remontowych, modernizacyjnych i rozbudowy sieci.
- Rejestracja odbiorów technicznych na sieci wodociagowej.
- Rejestracja awarii występujących na sieci.
- Obliczanie wieku wody w sieci wodociagowej.
- Wykonywanie tematycznych i przestrzennych analiz związanych z siecią wodociagową.

Szczególnie istotne jest zadanie związane z planowaniem systemu monitoringu. Aby ten system mógł efektywnie wspomagać pozostałe moduły systemu informatycznego w zarządzaniu siecią wodociagową, musi dostarczać możliwie dużo informacji o stanie pracy monitorowanej sieci przy możliwie małej liczbie punktów pomiarowych, ze względu na duże koszty ich instalacji. Idealny przypadek to taki, gdy w każdym węźle i na każdym odcinku sieci wodociagowej jest zainstalowany punkt pomiarowy, co praktycznie nie jest możliwe. Z kolei przypadek najczęściej spotykany w praktyce to taki, gdy punkty pomiarowe instaluje się w źródle wody i w przepompowniach strefowych oraz na końcówkach sieci wodociagowej. Dane pomiarowe z takich punktów nie dają jednak informacji o pracy sieci wewnątrz jej stref ciśnieniowych. To powoduje, że nie jest możliwa automatyczna kalibracja modeli hydraulicznych sieci, ich rekalkulacja, a także lokalizacja awarii i ukrytych wycieków wody. Aby system monitoringu dla sieci wodociagowej został właściwie zaprojektowany, należy część punktów pomiarowych zlokalizować w tak zwanych punktach wrażliwych sieci, to znaczy w punktach, w których rejestruje się zmiany ciśnienia lub przepływu spowodowane zmianami tych parametrów zaistniałymi nie tylko w bezpośrednim sąsiedztwie danego punktu, ale również w dalszej odległości od niego. Takie punkty znajdują się, korzystając ze skalibrowanego modelu hydraulicznego sieci wodociagowej i z wykonanych przy jego użyciu obliczeń symulacyjnych, kiedy symuluje się pozorowane wycieki kolejno w każdym węźle sieci. Dla tych wycieków wyznacza się tak zwane stopnie wrażliwości wszystkich węzłów sieci i na podstawie sporządzonego wykazu węzłów według ich stopnia wrażliwości wybiera się miejsca lokalizacji punktów pomiarowych w węzłach o największej wrażliwości. Liczba ostatecznie wybranych punktów pomiarowych jest kompromisem między koniecznością efektywnego opomiarowania sieci wodociagowej i ilością dostępnych w przedsiębiorstwie środków finansowych na tę inwestycję.

Złożonym problemem jest również kalibracja modelu hydraulicznego sieci wodociagowej. Można jej dokonać, korzystając z dobrze zaprojektowanego systemu monitoringu i z algorytmu optymalizacji wielokryterialnej [3]. W takim algorytmie, dla potrzeb kalibracji, definiuje się dwa kryteria celu, określone na uchybach między obliczonym z modelu i zmierzonym ciśnieniem, i przepływem, przy czym wartości obliczane są porównywane z danymi pozyskiwanymi z punktów pomiarowych systemu monitoringu. Aby wykonać takie zadanie, należy już jednak dysponować poprawnie zaprojektowanym systemem monitoringu, co zależy z kolei od posiadania dobrze skalibrowanego modelu hydraulicznego. Dlatego zadanie kalibracji wykonuje się metodą kolejnych przybliżeń, realizując je w trzech krokach: najpierw dokonuje się kalibracji modelu w sposób ręczny, korzystając z pomiarów uzyskanych w wyniku szarży pomiarowej przeprowadzonej na sieci wodociagowej; następnie projektuje się system monitoringu, wyznaczając właściwie usytuowane punkty pomiarowe na podstawie obliczeń symulacyjnych wykona-



Koncepcja systemu informatycznego wspomagania decyzji operatora sieci wodociagowej

(Karczmarska D.: Koncepcja systemu komputerowego do zarządzania siecią wodociagową w Rzeszowie. Raport 02/2004, IBS PAN Warszawa – MPWiK Rzeszów, 2004)

Część wymienionych zadań może być realizowana przez pojedyncze moduły systemu informatycznego, jednak większość tych zadań jest możliwa do realizacji jedynie w wyniku współdziałania różnych modułów, w tym modułu systemu monitoringu. Ponadto system monitoringu jest niezbędny również do wykonania pewnych zadań pomocniczych, umożliwiających tworzenie innych modułów zintegrowanego systemu informatycznego. Podstawowe zadania wykonywane przez system monitoringu, względnie możliwe do wykonania dzięki jego zastosowaniu, to:

1. Nadzór i kontrola bieżącego stanu pracy sieci wodociagowej.
2. Kalibracja i okresowa rekalkulacja modelu hydraulicznego sieci.
3. Wyznaczanie modeli parametrycznych sieci wodociagowej dla celów prognostycznych.
4. Wykrywanie i lokalizacja ukrytych wycieków wody w sieci wodociagowej.
5. Planowanie lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu instalowanego na sieci wodociagowej.

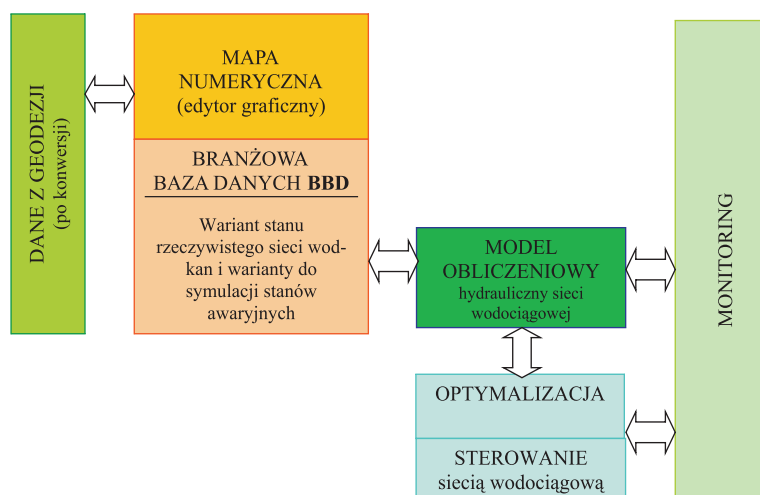
nych za pomocą skalibrowanego modelu hydraulicznego; wreszcie, mając wstępnie skalibrowany model i wykonany z jego pomocą system monitoringu, można dokonać rekalkibracji modelu, stosując do tego celu algorytm optymalizacji dwukryterialnej. Ostatnie dwa kroki należy powtarzać, rozbudowując system monitoringu i dokonując rekalkibracji modelu hydraulicznego po każdym remoncie, modernizacji lub rozbudowie sieci wodociągowej.

Moduły systemu informatycznego

Realizacja wymienionych wyżej zadań doprowadza do utworzenia dwóch podstawowych modułów systemu informatycznego: modelu hydraulicznego i systemu monitoringu. Umożliwiają one realizację zadania związanego z lokalizacją awarii i ukrytych wycieków w sieci wodociągowej. Można to zadanie wykonać w prosty sposób, korzystając jedynie z systemu monitoringu, śledząc poprawność pracy sieci poprzez porównywanie aktualnych przebiegów przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych z charakterystykami wzorcowymi tych parametrów [8]. Charakterystyki wzorcowe tworzy się jako przebiegi uśrednione odpowiednich sygnałów zarejestrowanych w tych punktach w kilku poprzednich analogicznych dniach tygodnia. Analizując wykres przepływu wody z danego węzła pomiarowego można wychwycić rozbieżności przepływów w stosunku do ostatnich tygodni, dzięki czemu w łatwy sposób zostanie zlokalizowana anomalia świadcząca na przykład o pękniętym rurociągu.

Przedstawiony wyżej prosty algorytm lokalizacji awarii, a właściwie sygnalizacji stanów nietypowych pracy sieci wodociągowej, może być realizowany za pomocą jedynie systemu monitoringu, bez konieczności stosowania innych modułów systemu informatycznego. Korzystając jednak z dodatkowych modułów systemu, można zaproponować bardziej wyrafinowany algorytm lokalizacji awarii i ukrytych wycieków wody. Jest on podobny do algorytmu optymalnego doboru punktów pomiarowych dla planowanego systemu monitoringu i składa się z czterech następujących kroków. Krok pierwszy polega na wyznaczeniu, dla standardowych obciążeń sieci wodociągowej, rozkładów ciśnień i przepływów w sieci za pomocą obliczeń wykonanych modelem hydraulicznym. W rezultacie, dla każdego standardowego obciążenia, otrzymuje się dwie powierzchnie rozkładów. Kolejny krok to wykonanie obliczeń hydraulicznych również dla standardowych obciążeń sieci wodociągowej, z symulowanymi wyciekami awaryjnymi w każdym węźle sieci. W rezultacie otrzymuje się dla pojedynczego standardowego obciążenia sieci liczbę powierzchni rozkładów ciśnień i przepływów równą podwójnej liczbie jej węzłów. Krok trzeci polega na bieżącym śledzeniu stanu pracy sieci wodociągowej poprzez obserwacje pomiarów w punktach monitoringu i porównywanie ich z wartościami charakterystyk wzorcowych wyznaczonych dla tych punktów. Wreszcie etap krok, to reakcja w przypadku stwierdzenia anomalii w wartości ciśnienia lub przepływu dla jakiegoś punktu pomiarowego. Uwzględniając wartości ciśnień i przepływów zarejestrowanych w danym momencie we

wszystkich punktach pomiarowych systemu monitoringu, porównuje się je z odpowiednimi wartościami ciśnień i przepływów na wyznaczonych wcześniej powierzchniach rozkładów dla symulowanych stanów awaryjnych i dla aktualnego, wynikającego z pory i dnia tygodnia, stopnia obciążenia sieci wodociągowej. Znajdując, według określonej normy, powierzchnie najbardziej zbliżone do aktualnych rozkładów ciśnień i przepływów, wskazuje się na potencjalne miejsce awarii, której wcześniejsza symulacja doprowadziła do wyznaczenia tych powierzchni. Przedstawiony algorytm generuje ogromną liczbę danych, w postaci powierzchni rozkładów ciśnień i przepływów



Schemat systemu wspomagania decyzji operatora miejskiej sieci wodociągowej

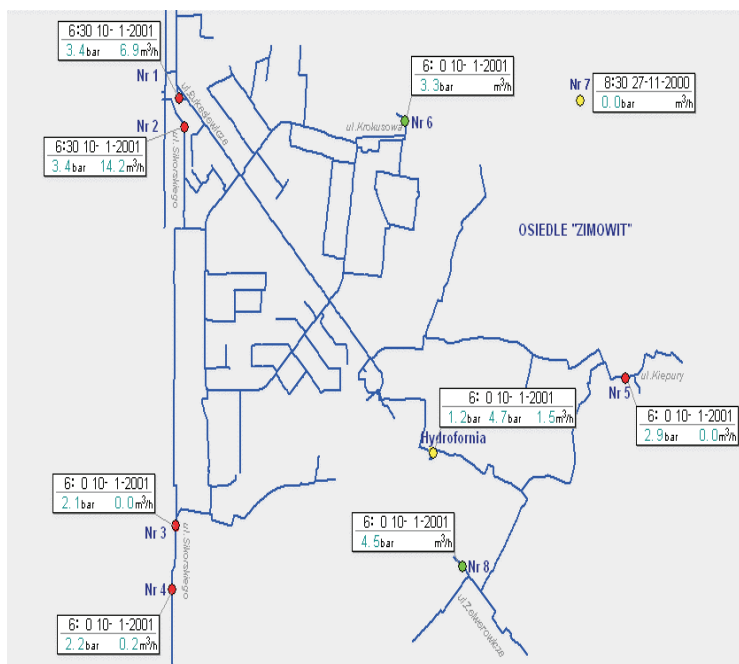
wyznaczonych dla wszystkich węzłów sieci wodociągowej i dla różnych standardowych obciążeń sieci. Powoduje to pewne trudności i niedogodności w przechowywaniu tych danych i w operowaniu na wielkich zbiorach liczb. Dlatego istnieje również inna, prostsza wersja tego algorytmu, w której śledzi się pod kątem potencjalnej awarii jedynie zmiany obciążenia w pompowni źródłowej sieci wodociągowej względnie w przepompowniach strefowych. Stwierdzenie anomalii w wartościach przepływu w którymś z tych punktów sieci, polegającej na istotnym zwiększeniu przepływu w stosunku do wyznaczonej wcześniej charakterystyki wzorcowej obciążenia, sugeruje wystąpienie stanu awaryjnego w sieci lub w jakimś jej obszarze. Dopiero wówczas przystępuje się do wykonania obliczeń hydraulicznych dla zadanego standardowego obciążenia sieci wodociągowej, z pozorowanymi stanami awaryjnymi w każdym węźle sieci. Otrzymane powierzchnie rozkładów awaryjnych porównuje się w punktach pomiarowych systemu monitoringu z zarejestrowanymi bieżącymi wartościami ciśnienia i przepływu i, stosując odpowiednią normę, znajduje się powierzchnie, w których występuje największa zgodność między wartościami zmierzonymi i obliczonymi. Powierzchnie te, wyznaczone dla określonego symulowanego przypadku awaryjnego, wskazują, w którym węźle sieci mógł wystąpić potencjalny wyciek. Algorytm ten wymaga znacznie mniejszej liczby generowanych i zapamiętywanych danych liczbowych, jednocześnie może być mniej dokładny w przypadku dużych

miejskich sieci wodociagowych, w których lokalna awaria lub wyciek mogą być praktycznie niezauważalne z punktu widzenia zmiany obciążenia przepompowni strefowej lub pompowni źródłowej.

Powyższe zastosowania systemu monitoringu do zarządzania siecią wodociagową w prosty sposób mogą być przeniesione również na ciśnieniowe sieci kanalizacyjne, które działają w podobny sposób i są opisywane podobnymi modelami fizykalnymi.

* * *

Przedstawiono możliwości wykorzystania informacji, pozyskiwanych z systemu monitoringu, do wspomaganie zarządzania siecią wodociagową. Jest to możliwe poprzez zintegrowanie pracy systemów monitoringu, map numerycznej, modeli hydraulicznych i algorytmów optymalizacji i aproksymacji w ramach jednolitego, kompleksowego systemu informatycznego wspomaganie decyzji. Taka integracja pozwala na lepsze wykorzystanie informacji dostarczanych z systemu monitoringu i lepsze wykorzystanie wiedzy o przedsiębiorstwie i jego obiektach zgromadzonej w bazie systemu GIS.



- z firmą rozwijającą profesjonalne systemy GIS;
- z firmą rozwijającą profesjonalne systemy monitoringu SCADA;
- z firmami informatycznymi tworzącymi profesjonalne oprogramowanie na podstawie dostarczanych im algorytmów obliczeniowych;
- z przedsiębiorstwem wodociagowym.

Prace badawczo-rozwojowe związane z tworzeniem wspomnianego systemu informatycznego są ciągle prowadzone, powstające algorytmy i programy są modyfikowane i uzupełniane, a same prace są jeszcze dalekie od zakończenia.

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

Bibliografia

1. Bogdan L., Karczmarzka D., Studziński J., *Computerization of waterworks in Poland – current state and perspectives*. In: Applications of Informatics in Environment Engineering and Medicine (Studziński J., Drelichowski L., Hryniewicz O., Eds.) PAS SRI, Series Systems Research, Vol. 42, Warsaw 2005, pp. 157-169.
2. Łomotowski J., Siwoń Z., *Metodyka analizy danych pochodzących z monitoringu systemów wodociagowych i kanalizacyjnych*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 3'2010, 16-20.
3. Straubel R., Holznel B., *Meßkriteriale Optimierung für Planung und Steuerung von Trink- und Abwasser-Verbundsystemen*. Wasser, Abwasser, 140, Nr. 3, 1999, 191-196.
4. Studziński J., *Zastosowanie danych z monitoringu w systemie zarządzania miejską siecią wodociagową*. Studia i Materiały PSZW (W. Bojar, red.) tom 9, PSZW Bydgoszcz 2007, 154-164.
5. Studziński J., *Kompleksowe zarządzanie miejską siecią wodociagową w oparciu o systemy GIS, SCADA i modele matematyczne*. Wodociagi i Kanalizacja, 12(94)/2011, 36-39.
6. Studziński J., *Application of kriging algorithms for solving some water nets management tasks*. In: Innovations in Sharing Environmental Observations and Information (W. Pillmann, S. Schade, P. Smitts, Eds.), Part 1: Environmental Informatics, Proceedings of EnviroInfo Ispra 2011, Shaker Verlag, Aachen 2011, 493-488.
7. Studziński J., Straubel R., *Optymalizacja i sterowanie miejskiej sieci wodociagowej na podstawie modeli matematycznych*. Studia i Materiały PSZW (W. Bojar, red.) tom 10, PSZW Bydgoszcz 2007, 181-191.
8. Żyła A., *Opracowanie algorytmów obliczeniowych do wykrywania stanów awaryjnych i nieszczelności sieci wodociagowej*. Raport badawczy IBS PAN nr 4B/2007, Warszawa 2007.

Przykładowy schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych systemu monitoringu dla dzielnicy miejskiej

(Żyła A., Opracowanie algorytmów obliczeniowych do wykrywania stanów awaryjnych i nieszczelności sieci wodociagowej. Raport badawczy IBS PAN nr 4B/2007, Warszawa 2007).

Koncepcję takiego systemu informatycznego opracowano w Instytucie Badań Systemowych PAN [5]. Należy przy tym zaznaczyć, że realizacja takiego systemu wymaga ścisłej współpracy jednostki badawczej z profesjonalnymi firmami komputerowymi, tworzącymi standardowe oprogramowanie dla potrzeb branżowych. Nie ma bowiem potrzeby ani sensu, aby wszystkie programy, w tym również takie, które obecne na rynku firmy komputerowe produkują w sposób seryjny już od wielu lat, rozwijać w instytucie badawczym. W omawianym przypadku opracowywania zintegrowanego systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania siecią wodociagową Instytut Badań Systemowych PAN współpracował: