85/2008

Raport Badawczy
Research Report

RB/24/2008

Problemy modelowania i optymalizacji miejskich systemów wodociągowych

J. Studziński

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences

POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:
Dr hab. inż. Jan Studziński

Warszawa 2008

Problemy modelowania i optymalizacji miejskich systemów wodociągowych

Jan Studziński

Spis treści

1. Wprowadzenie

Miejskie systemy wodno-ściekowe składają się zwykle z czterech podsystemów: ujęcia wody, sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków, przy czym sieć wodociągowa wydaje się w tym systemie elementem kluczowym. Zmieniające się obciążenie sieci wodociągowej wpływa na pracę pompowni w stacjach ujęcia wody, decyduje o obciążeniu hydraulicznym sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków, a poprawne zarządzanie siecią wodociągową decyduje o właściwej jakości i ilości wody dostarczanej do odbiorców. Dlatego jednym z podstawowych zadań w przedsiębiorstwie wodociągowym jest efektywne zarządzanie tą siecią. W ramach tego zadania należy realizować szereg podzadań, takich jak: pełne pokrycie potrzeb odbiorów na wodę pitną; dostarczanie do odbiorców wody o odpowiedniej jakości; dostarczanie wody pod odpowiednim ciśnieniem; zapobieganie awariom sieci wodociągowej; w przypadku wystąpienia awarii, szybka jej lokalizacja i usunięcie; planowanie i wykonywanie remontów sieci; modernizacja i rozbudowa sieci; zapobieganie stratom wody; planowanie ceny wody na kolejny rok kalendarzowy itp. Wszystkie te zadania realizuje się w każdym przedsiębiorstwie wodociągowym, jednak traktuje się je zwykle w sposób niezależny i są wykonywane przez różne działy przedsiębiorstwa. Natomiast w rzeczywistości zadania te są ze sobą związane i powinny być realizowane z uwzględnieniem tej współzależności. Ponadto ich właściwa realizacja zależy od pewnego wspólnego zbioru informacji, które można pozyskać instalując na sieci wodociągowej odpowiedni system monitoringu (system SCADA = Supervisory Control And Data Acquisition).

W raporcie zostanie między innymi omówione, w jaki sposób dane pozyskiwane z monitoringu sieci wodociągowej ułatwiają rozwiązywanie problemów związanych z jej zarządzaniem, jak bardzo jest celowym tworzenie całych złożonych systemów informatycznych do zarządzania sieciami wodociągowymi, w których monitoring jest jednym z kluczowych elementów systemu, oraz jak ściśle problematyka właściwego zarządzania, czyli działanie o charakterze jakościowym, jest związana z pewnymi obszarami wiedzy technicznej, czyli działaniami o charakterze ilościowym.

Ostatnie spostrzeżenie świadczy o tym, że zarządzanie w ogólności, w tym zarządzanie siecią wodociągową, lub szerzej: systemem zaopatrzenia w wodę (system SZW), jest działaniem interdyscyplinarnym, łączącym w sobie techniki ilościowe i jakościowe, i nie można spodziewać się skutecznego zarządzania opartego tylko na intuicji i doświadczeniu, jak również nie można w zarządzaniu ograniczać się jedynie do stosowania algorytmów obliczeniowych. Jednak połączenie obu rodzajów działania, jakościowego i ilościowego, chociaż wskazane, jest bardzo trudne, ponieważ jest związane z dużymi trudnościami organizacyjnymi, z ponoszeniem wysokich kosztów a przede wszystkim z przełamaniem pewnych nawyków myślowych i przyzwyczajeń, co wydaje się najtrudniejsze. Stąd potrzeba wskazywania ośrodkom decyzyjnym na zalety działań integracyjnych i celowość kompleksowej informatyzacji przedsiębiorstw wodociągowych. W koncepcji autora takiemu celowi służy niniejsza praca.

Systemy informatyczne stosowane do kompleksowego zarządzania przedsiębiorstwami wodociągowymi, to w Polsce jeszcze rzadkość. Przy czym przez zarządzanie kompleksowe rozumiemy tutaj jako wykonywanie przez system zarówno zadań organizacyjno-finansowych (gospodarka magazynowa, księgowość, obsługa klientów przedsiębiorstwa itp.), jak i techniczno-technologicznych (symulacja komputerowa realizowanego procesu, optymalizacja i sterowanie procesem itp.). Wykonujący takie zadania system informatyczny powinien składać się ze współpracujących ze sobą modułów odpowiedzialnych za funkcje

administracyjne i techniczne. Jednak powszechną praktyką w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych jest obecnie albo wdrażanie systemów odpowiedzialnych jedynie za sferę działań administracyjnych lub tylko technicznych, albo najczęściej eksploatacja programów wykonujących pojedyncze zadania związane z zarządzaniem przedsiębiorstwem i nie zintegrowanych w formie jednolitego systemu. Dlatego zastaje się zwykle taką sytuację, że w poszczególnych działach przedsiębiorstwa wodociągowego funkcjonują programy do obliczania płac, do rejestracji sprzedawanej wody, monitorujące przepływy i ciśnienia na sieci wodociągowej czy systemy mapy numerycznej, natomiast nie ma między nimi komunikacji i również zwykle nie planuje się ich integracji a jedynie kupowanie nowych programów do nowych zadań.

Sytuacja taka spowodowana jest na ogół dwiema przyczynami: po pierwsze, takich zintegrowanych systemów informatycznych nie ma na rynku i trzeba je tworzyć, co jest sprawą trudną od strony organizacyjnej i kosztowną, ponadto z braku odpowiednich doświadczeń również niepewną pod względem spodziewanych rezultatów; brak takich doświadczeń powoduje również, że decydenci nie bardzo orientują się w tym, czego mogą się spodziewać po wdrożeniu takiego systemu, stąd ich na ogół niechęć do rozpoczynania takich prac i finansowania ich ze środków własnych przedsiębiorstwa; po drugie, wdrażanie takiego systemu w przedsiębiorstwie na ogół dezorganizuje jego pracę w znacznym obszarze, co nie jest dobrze przyjmowane przez załogę i kierownictwo; wdrażanie takiego systemu często pociąga za sobą również konieczność wprowadzenia zmian organizacyjnych w przedsiębiorstwie, co także napotyka na czysto psychologiczne opory przed zmianą dotychczasowego *status quo*. Znacznie łatwiej, taniej i bezpieczniej jest kupić pojedynczy, sprawdzony już gdzie indziej program i wdrażać go w wybranym i wydzielonym dziale przedsiębiorstwa i postępować tak sukcesywnie, dokupując kolejno nowe programy dla innych działów i nowych zadań.

Taka polityka informatyzacji przedsiębiorstwa, podyktowana niewiedzą o możliwościach oferowanych przez zintegrowane systemy informatyczne, wysokimi kosztami ich opracowania, niepewnością powodzenia całego złożonego przedsięwzięcia i dużymi spodziewanymi perturbacjami organizacyjnymi jest zrozumiała, niemniej niewłaściwa, co najmniej z jednego powodu: rosnąca liczba różnych niezależnych programów obsługujących różne działy przedsiębiorstwa prowadzi do jego stopniowej dezintegracji i po przekroczeniu pewnej liczby tych programów uniemożliwia ich późniejszą integracje; w rezultacie takie postępowanie prowadzi w dalszej perspektywie do skomplikowania zarządzania przedsiębiorstwem a nie jego ułatwienia, co zwykle jest przecież głównym powodem jego informatyzacji.

Jednak ta niekorzystna sytuacja zaczyna powoli i stopniowo się zmieniać, ponieważ po wstąpieniu Polski do UE przedsiębiorstwa wodociągowe uzyskały możliwość pozyskiwania dużych środków finansowych na informatyzację z licznych europejskich programów pomocowych (fundusze strukturalne, programy spójności itp.) a także uzyskały dostęp do doświadczeń, firm oraz technik i technologii informatycznych zachodnioeuropejskich i światowych, znacznie bardziej rozwiniętych w tym zakresie, niż opracowania krajowe.

W raporcie przedstawiono kolejno: obecny stan informatyzacji krajowych przedsiębiorstw wodociągowych w zakresie zadań technicznych; strukturę i funkcje systemu zarządzania siecią wodociągową rozwijanego w IBS PAN i wdrażanego w wodociągach rzeszowskich; elementy tego systemu, to znaczy: mapę numeryczną, system monitoringu, model hydrauliczny a także algorytmy optymalizacji i sterowania; proces tworzenia systemu i odniesienia tego procesu do prezentowanej w literaturze metodologii rozwijania informatycznych systemów wspomagania decyzji; wpływ wdrażanego systemu na infrastrukturę informatyczną i organizację całego przedsiębiorstwa wodociągowego;

wynikające z dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych plany rozbudowy systemu rzeszowskiego o kolejne moduły i funkcje zwiększające jego funkcjonalność i efektywność.

2. Komputeryzacja miejskich sieci wodociągowych

Informatyzacja krajowych przedsiębiorstw wodociągowych zaczęła się na większą skalę dopiero po transformacji ustrojowej w Polsce, tzn. po roku 1989, natomiast znacznie przyspieszyła dopiero po wstąpieniu polski do UE, czyli od 3 lat. Umożliwiły to znaczne środki finansowe, jakie można na ten cel pozyskiwać z Unii Europejskiej, oraz napływ do Polski w wyniku tych wydarzeń nowoczesnych światowych technik i technologii informatycznych. Jednak mimo tych korzystnych obecnie uwarunkowań sytuacja w krajowych wodociągach w tym zakresie nie jest dobra, ponieważ trudno szybko nadrobić wieloletnie opóźnienia w obszarze badawczym i zmienić nabyte niewłaściwe przyzwyczajenia w sferze psychicznej. Opóźnienia badawcze, to przede wszystkim brak własnych sprawdzonych rozwiązań w zakresie narzędziowych aplikacji branżowych, takich jak systemy map numerycznych, systemy monitoringu czy komputerowe modele hydrauliczne sieci wodociągowych. W rezultacie większość programów wdrażanych w przedsiębiorstwach wodociągowych pochodzi z zagranicy, co często oznacza, że nie są one dopasowane do polskich uwarunkowań. Z kolei niewłaściwe przyzwyczajenia dotyczą braku ścisłej współpracy między sferą gospodarczą a naukowo-badawczą w Polsce oraz także braku współpracy i wymiany doświadczeń między samymi przedsiębiorstwami. Brakuje tu nie tylko przyzwyczajeń, ale także formalnych mechanizmów, które taką współpracę mogłyby ułatwić.

Rezultat jest taki, że różne przedsiębiorstwa samodzielnie zakupują różne aplikacje narzędziowe do zarządzania siecią wodociągową i ta różnorodność uniemożliwia potem integrację programów w ramach jednego przedsiębiorstwa i wymianę doświadczeń między przedsiębiorstwami. Stosunkowo najlepsza sytuacja jest w zakresie wdrażania map numerycznych i systemów monitoringu sieci wodociągowych, najgorsza dotyczy stosowania modeli hydraulicznych oraz programów optymalizacji do projektowania i sterowania sieciami a także integrowania różnych programów do postaci informatycznych systemów wspomagania decyzji.

Zarządzanie miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym jest złożonym procesem decyzyjno-operacyjnym, który dla prawidłowej realizacji wymaga wspomagania komputerowego. Dlatego od co najmniej kilkunastu lat przedsiębiorstwa wodociągowe zaopatrują się w różne programy obliczeniowe automatyzujące prace poszczególnych działów, przy czym jest regułą, że programy te działają niezależnie od siebie, nie komunikują się ze sobą i nie wymieniają się danymi. W ten sposób wspomagają one prace odnośnych działów przedsiębiorstwa, natomiast nie można mówić o kompleksowym wspomaganiu decyzyjnym i operacyjnym przedsiębiorstwa jako całości. Oprócz przywiązania wdrażanych programów komputerowych do poszczególnych działów, należy również zauważyć klasyczny podział tych programów na dwie rozłączne grupy: programy realizujące zadania techniczne oraz programy realizujące zadania administracyjne, tzn. organizacyjne i finansowe. Do tych pierwszych można zaliczyć programy związane z generowaniem mapy numerycznej, z obliczeniami hydraulicznymi i optymalizacyjnymi oraz z monitorowaniem parametrów różnych procesów realizowanych w przedsiębiorstwie wodociągowym, do tych drugich można zaliczyć programy związane z gospodarką magazynową, z płacami, z rejestracją wykonywanych zadań czy sprzedawanych produktów i usług itp. Przy tym na ogół z programów o charakterze technicznym korzystają pracownicy techniczni i kadra inżynierska przedsiębiorstwa, natomiast z programów o charterze administracyjnym korzystają pracownicy administracji.

Realizowana od kilku lat w Instytucie Badań Systemowych PAN koncepcja informatyzacji przedsiębiorstwa wodociągowego polega na stworzeniu systemu komputerowego integrującego wszystkie programy eksploatowane w przedsiębiorstwie i w konsekwencji również na wymuszeniu ściślejszej współpracy między poszczególnymi działami przedsiębiorstwa.

Miejskie przedsiębiorstwo wodociągowe o klasycznej strukturze składa się z czterech obiektów działających w sposób w dużym stopniu autonomiczny, tzn. składa się ze stacji ujęcia i uzdatniania wody, z sieci wodociągowej, z sieci kanalizacyjnej i z oczyszczalni ścieków. Ponieważ obiekty te można traktować jako niezależne, więc również ich komputeryzacja przebiega zwykle w sposób indywidualny. Nasza koncepcja informatyzowania przedsiębiorstwa polega na opracowaniu systemów informatycznych do zarządzania każdym z tych obiektów a następnie na połączeniu ich w jeden zintegrowany system.

Ostatnie kilkanaście lat, to okres wdrażania w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych programów mapy numerycznej i systemów monitoringu. Zwykle są to programy pracujące niezależnie a generowane przez nie dane są wykorzystywane przez różne działy przedsiębiorstwa do realizacji różnych zadań. W wodociągach rzeszowskich podjęto w ostatnich latach próbę integracji tych programów do postaci jednolitego systemu informatycznego, którego zadaniem jest wspomaganie zarządzania przedsiębiorstwem. W szczególności celem jest efektywniejsza eksploatacja sieci wodociągowej i kanalizacyjnej, które stanowią kluczowe obszary działania przedsiębiorstwa wodociągowego.

Mimo postępującej informatyzacji krajowych przedsiębiorstw wodociągowych zarządzanie nimi w dalszym ciągu ma charakter działań opartych na zdobywanym stopniowo doświadczeniu i intuicji, natomiast w mniejszym stopniu opiera się korzystaniu z systemów informatycznych traktowanych jako narzędzia wspomagające procesy decyzyjne. Przedsiębiorstwa wodociągowe coraz chętnie kupują obecnie komputery i różnego rodzaju oprogramowanie, jednak są one wykorzystywane głownie do usprawniana pracy biurowej i administracyjnej, natomiast w małym stopniu są używane jako narzędzia komputerowego wspomagania decyzji w skomplikowanym procesie zarządzania przedsiębiorstwem. To kupowane oprogramowanie, to głownie programy dla działu finansowo-księgowego oraz związane z gospodarką magazynową. Ostatnie lata, to również wdrażanie systemów mapy numerycznej oraz systemów monitoringu. Jednak cechą charakterystyczną tych działań jest, że kupowane programy instalowane w różnych działach przedsiębiorstwa pracują niezależnie od siebie i usprawniają jedynie procesy obliczeniowe lub pomiarowe, a więc wspomagają rozwiązywanie zadań technicznych, które można nazwać operacyjnymi, natomiast nie wspomagają zarządzania, czyli procesów decyzyjnych o charakterze taktycznym i strategicznym. Oceniając stan komputeryzacji wodociągów krajowych w zakresie monitoringu, map numerycznych i obliczeń hydraulicznych można stwierdzić, że nawet w obszarze działań czysto technicznych nie ma prób integrowania programów wykonujących różne funkcje. Tym bardziej nie ma takich usiłowań w zakresie integrowania programów technicznych i administracyjnych i tworzenia z ich użyciem kompleksowych systemów wspomagania decyzji.

Można powiedzieć, że zarządzanie w przedsiębiorstwach wodociągowych przebiega obecnie w dwóch niezależnych obszarach: w obszarze działań technicznych, gdzie poszczególne działy samodzielnie wykonują swoje rutynowe zadania, oraz w obszarze działań administracyjnych, gdzie kadra decyzyjna zajmuje się organizacją, kierowaniem i planowaniem. Takie niezależnie wykonywane działania nie tylko nie są efektywne, ale są nawet szkodliwe dla rozwoju informatyzacji w przedsiębiorstwach wodociągowych. Przyczyny są dwie: organizacyjna i finansowa. Organizacyjna polega na tym, że w miarę

zakupu coraz większej liczby komputerów i niezależnych programów coraz trudniejsza staje się administracja sprzętem i oprogramowaniem, jeżeli nie tworzą one zintegrowanego systemu informatycznego. Przyczyna finansowa polega na tym, że tak zakup, jak i eksploatacja komputerów i programów wiążą się z coraz większymi kosztami przy braku jednocześnie możliwości wykazania się wyraźnymi wyliczalnymi korzyściami z ich użytkowania. Rodzi to niechęć kierownictwa do rozwoju informatyki w przedsiębiorstwie i często prowadzi do ograniczania tego rozwoju.

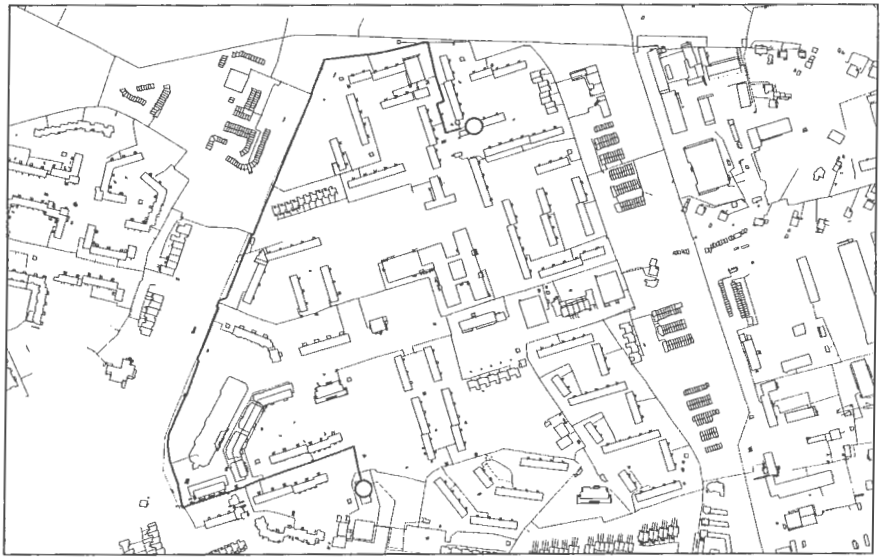
Wyjściem z niekorzystnej sytuacji jest, po pierwsze, integrowanie programów działających w obszarze działań technicznych, po drugie, integrowanie programów z obszaru działań technicznych i obszaru działań administracyjnych, po trzecie, tworzenie narzędzi wspomagania decyzji przeznaczonych dla kadry kierowniczej a nie, jak dotychczas, dla pracowników kadry technicznej i administracyjnej wykonujących czynności o charakterze operacyjnym, jak zbieranie pomiarów z sieci wodociągowej, drukowanie raportów o awariach, sporządzanie listy płac, wystawianie faktur użytkownikom sieci itp. Propozycja takiego narzędzia informatycznego zostanie przedstawiona w dalszym ciągu raportu. Przy tym kluczowym elementem takiego narzędzia jest baza danych z informacjami o sieci wodociągowej, wykorzystywanymi następnie przez odpowiednie modele matematyczne do prognozowania stanów sieci i generowania scenariuszy sterowania operacyjnego siecią. Z kolei źródłem potrzebnych danych jest odpowiednio zaprojektowany system monitoringu sieci wodociągowej.

3. Mapy numeryczne

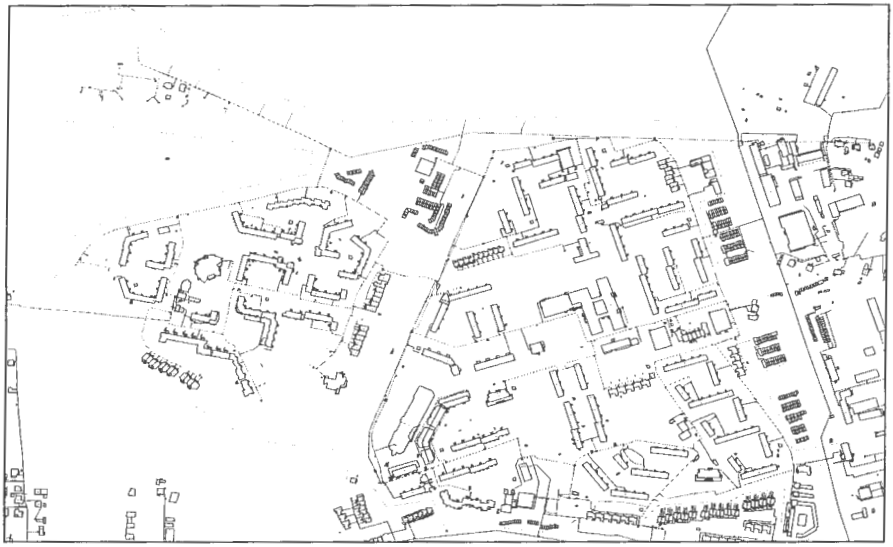
Mapy numeryczne sieci wodociągowych są obecnie stosunkowo najpopularniejszym i najczęściej wdrażanym względnie stosowanym narzędziem informatycznym w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych. W wodociągach rzeszowskich, tworząc system monitoringu sieci wodociągowej i także kanalizacyjnej, wdraża się także system GIS mapy numerycznej (GIS = Geographical Information System). Głównym celem tych prac jest stworzenie złożonego systemu komputerowego do wizualizacji, symulacji, optymalizacji, sterowania i projektowania miejskiej sieci wodociągowej w Rzeszowie.

Pierwszym systemem mapy numerycznej zainstalowanym w Rzeszowie w latach 2001-2003 był program GEOMEDIA firmy Intergraph. Ostatnio (lata 2005-2006) zakupiono i zainstalowano w Przedsiębiorstwie system G/Technology tej samej firmy, stanowiący branżowe rozwinięcie systemu GEOMEDIA.

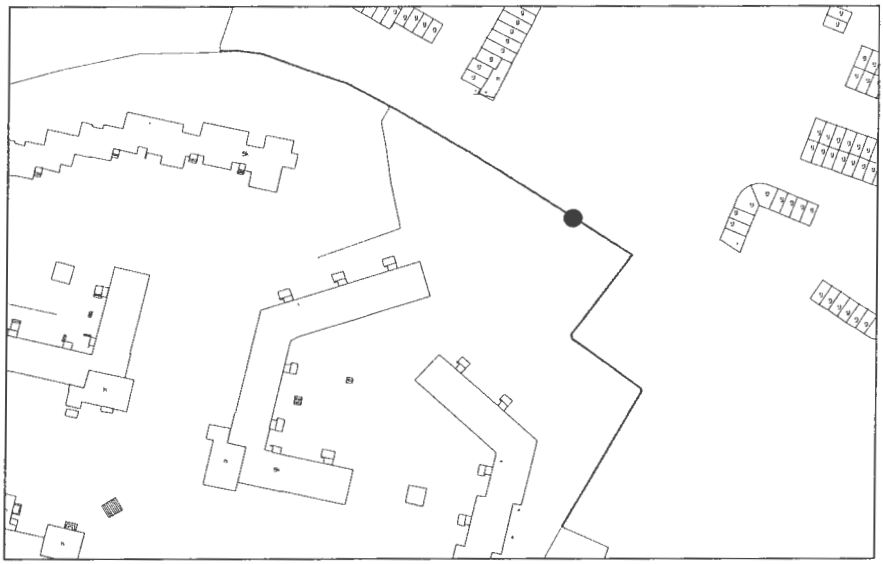
Zasada funkcjonowania wdrażanego systemu GIS jest następująca: Z Działu Geodezji Urzędu Miasta pozyskuje się w formie cyfrowej mapę geodezyjną sieci wodociągowej. Jest ona wprowadzana do systemu G/Technology, generującego mapę numeryczną sieci. Kluczowym elementem systemu jest Branżowa Baza Danych, zawierająca wszystkie umieszczone na mapie geodezyjnej informacje o sieci wodociągowej, uzupełnione w Przedsiębiorstwie o dodatkowe dane archiwalne o sieci. W rezultacie system G/Technology jest w stanie generować graf geodezyjny sieci wodociągowej, będący cyfrowym odzwierciedleniem mapy geodezyjnej. Jednak ten graf ma szereg wad uniemożliwiających jego wykorzystanie w obliczeniach i analizach operacyjnych. Między innymi ma on szereg nieciągłości wynikających z tego, że takie nieciągłości znajdują się na rysunku sieci tworzonym przez geodetę. Dlatego pierwszą czynnością realizowaną przez system G/Technology jest transformacja grafu geodezyjnego do postaci tzw. grafu topologicznego o poprawionej strukturze. Na podstawie tego grafu można wykonywać różnorodne analizy przestrzenno-tematyczne dotyczące sieci.



Rys. 1. Śledzenie najkrótszej drogi w sieci wodociągowej między dwoma punktami, w systemie G/Technology.



Rys. 2. Śledzenie ciągłości topologicznej sieci wodociągowej ograniczone do zdefiniowanego obszaru sieci, w systemie G/Technology.



Rys. 3. Śledzenie obszaru sieci wodociągowej z miejsca wystąpienia awarii do najbliższych zasuw odcinających, w systemie G/Technology.

Rys. 4. Lokalizacja hydrantów zapewniających ochronę przeciwpożarową w wybranym osiedlu, w systemie G/Technology.

Te analizy, to między innymi: śledzenie ciągłości sieci wodociągowej w wybranym jej obszarze, znajdowanie najkrótszej drogi w sieci między dwoma zadanymi punktami, lokalizacja zasuw odcinających fragment sieci, w którym nastąpiła awaria, wyznaczanie obszarów niezabezpieczonych hydrantami na wypadek pożaru itp.

Graf topologiczny sieci wodociągowej umożliwia wprawdzie wykonywanie różnorodnych analiz sieci, nie umożliwia jednak wykonywania obliczeń hydraulicznych, ponieważ nie zawiera węzłów, które nie występują również na mapie geodezyjnej. Dlatego kolejną czynnością realizowaną przez system G/Technology jest transformacja grafu topologicznego do postaci tzw. grafu hydraulicznego, w którym na wszystkich przecięciach i końcówkach rur wodociągowych wprowadza się węzły: montażowe (punkty przecięcia rur wewnątrz sieci), zasilające (źródła wody), odbiorcze (użytkownicy sieci) i pomiarowe (punkty pomiarowe systemu monitoringu).

Każdy obiekt grafu sieci na mapie numerycznej ma swój opis w Branżowej Bazie Danych, stanowiącej integralną część systemu G/Technology. Opisy węzłów pomiarowych są aktualizowane na bieżąco danymi przekazywanymi z punktów pomiarowych systemu monitoringu zainstalowanego na sieci wodociągowej.

4. Systemy monitoringu

W ostatnich dwóch dziesięcioleciach w coraz większym stopniu wdraża się w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych systemy monitoringu na sieciach wodociągowych, będące źródłem bieżących informacji o stanie sieci. Systemy monitoringu służą zwykle jako autonomiczne programy do zbierania informacji o produkcji wody i ciśnieniach w hydroforniach strefowych, gdy jednocześnie mogą i powinny być wykorzystywane jako elementy systemów zarządzania siecią, w tym do realizacji takich zadań, jak optymalizacja i sterowanie operacyjne sieciami.

Opracowując system monitoringu dla sieci wodociągowej, należy rozwiązać następujące zadania:

- dokonać wyboru punktów pomiarowych
- dokonać wyboru urządzeń pomiarowych (przepływomierzy i ciśnieniomierzy)
- wykonać instalację urządzeń pomiarowych
- dokonać wyboru rodzaju transmisji danych (możliwe opcje, to: telemetria kablowa, telefonia komórkowa, transmisja radiowa)
- ustalić zasady transmisji danych (w sposób ciągły lub okresowo z doborem czasów transmisji)
- dokonać wyboru programu archiwizacji i wizualizacji.

Na początku prac związanych z zaprojektowaniem i wdrożeniem systemu nigdy dokładnie nie wiadomo, gdzie zlokalizować na sieci wodociągowej punkty pomiarowe. Istotnym zagadnieniem staje się wówczas taki wybór liczby i lokalizacji tych punktów, aby były spełnione co najmniej dwa kryteria celu:

- minimalizacja kosztów wdrażanego systemu
- maksymalizacja informacji pozyskiwanej z zainstalowanych punktów pomiarowych.

Jest to zadanie optymalizacji wielokryterialnej. Może ono jednak być realizowane jedynie metodą kolejnych przybliżeń, ponieważ wymaga dysponowania modelem hydraulicznym sieci wodociągowej do wykonywania odpowiednich obliczeń symulacyjnych. Z kolei opracowanie modelu hydraulicznego danej sieci wymaga dysponowania odpowiednio efektywnym systemem monitoringu umożliwiającym poprawną kalibrację modelu. Dlatego prawidłowy proces postępowania przy opracowywaniu systemu monitoringu na ogół wygląda w ten sposób, że najpierw instaluje się w przedsiębiorstwie wodociągowym system ze stosunkową małą liczbą punktów pomiarowych umiejscowionych w najbardziej newralgicznych punktach sieci, takich jak ujęcia wody i przepompownie strefowe, następnie zaś za jego pomocą wyznacza się niezbyt dokładny model hydrauliczny sieci wodociągowej, wykorzystywany z kolei do już ukierunkowanej rozbudowy systemu monitoringu. Tak modyfikowany system umożliwia następnie dokładniejszą kalibrację modelu sieci.

Przy rozwiązywania problemu właściwej lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu za pomocą metody optymalizacji wielokryterialnej uwzględnia się wrażliwość poszczególnych punktów na lokalne awarie w sieci. Każda awaria powoduje zmianę rozkładu ciśnień i zmianę rozkładu przepływów w sieci wodociągowej w stosunku do pewnego stanu ustalonego. Problem stanowią przy tym awarie z wyciekiem wody do gruntu. Są one trudne do zlokalizowania w tradycyjny optyczny sposób i jednocześnie są częstą przyczyną dużych strat wody. W sieci wodociągowej są tzw. punkty martwe, gdzie rejestrowana zmiana ciśnienia lub przepływu oznacza zmianę wartości tych sygnałów jedynie w tych punktach, i są punkty wrażliwe, w których następują zmiany mierzonych wartości ciśnień lub przepływów także w przypadkach, gdy źródłowe zmiany tych parametrów zdarzają się nawet w dużej odległości od punktu pomiarowego. Właśnie takie punkty wrażliwe powinny być uwzględniane w systemach monitoringu.

Z powyższego opisu wynika, że instalacja systemu monitoringu na sieci wodociągowej jest zadaniem złożonym, kosztownym i trudnym pod względem organizacyjnym, co jest powodem, że systemy monitoringu istniejące w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych są na ogół ubogie i w konsekwencji również w niewystarczający sposób wykorzystywane. Dlatego poniżej pokazano szerokie możliwości zastosowania danych z monitoringu do zarządzania sieciami wodociągowymi, co powinno skutkować przykładaniem większej wagi do ich rozwoju.

Przez monitoring sieci wodociągowej rozumie się w ogólności system komputerowy złożony z trzech elementów: urządzeń pomiarowych do mierzenia ciśnień i przepływu wody, systemu transmisji danych z punktów pomiarowych do komputera zbierającego i archiwizującego dane pomiarowe, oraz programu wizualizacji sieci wodociągowej ze zlokalizowanymi na niej punktami pomiarowymi. Każdy z tych elementów ma wiele możliwości realizacji i powinien być analizowany niezależnie.

Odnośnie urządzeń pomiarowych, idealny przypadek monitoringu oznacza, że w każdym węźle sieci jest zainstalowany ciśnieniomierz i w każdym odcinku sieci jest zainstalowany przepływomierz, w wyniku czego operator sieci ma na bieżąco informację o wszystkich przepływach i ciśnieniach. Ponieważ przepływy i ciśnienia określają stan sieci, więc informacje o wartościach tych parametrów pozwalają zorientować się, czy sieć pracuje właściwie, tzn. czy są poprawne ciśnienia w węzłach odbioru wody i czy odbierane ilości wody są zgodne z oczekiwaniami odbiorców. Jednak taki przypadek monitoringu jest praktycznie nierealizowalny ze względu na koszty, ponieważ koszt instalacji takiego monitoringu byłby większy od kosztów budowy całej sieci wodociągowej. Dlatego projektując system monitoringu należy dokonać ograniczonego wyboru punktów pomiarowych, kierując się przy tym dwoma kryterium celu: łącznymi kosztami montażu tych punktów i ilością informacji, które z tych punktów można pozyskać. Jest to, jak było już

powiedziane, problem optymalizacji wielokryterialnej, przy czym pierwsze kryterium podlega minimalizacji a drugie – maksymalizacji.

W przypadku szacowania kosztów montażu punktów pomiarowych uwzględnia się nie tylko koszt aparatury pomiarowej w punkcie, czyli przepływomierza i ciśnieniomierza, ale również koszt budowy studni pomiarowej w węźle lub na odcinku sieci a także koszt montażu tzw. szafki pomiarowej zawierającej urządzenia zapisu i transmisji danych oraz koszt montażu tzw. szafki energetycznej zawierającej źródło zasilania elektrycznego urządzeń pomiarowych i transmisyjnych. Przy tym, gdy koszt jednostkowy szafki pomiarowej, szafki energetycznej, studni pomiarowej i ciśnieniomierza jest na ogół niezależny od wyboru punktu pomiarowego, to koszt przepływomierza zależy w sposób istotny od średnicy rury, na której jest zamontowany. Stąd wynika, że w przypadku rur o bardzo zróżnicowanych średnicach koszt montażu pojedynczego punktu pomiarowego na rurze o dużej średnicy może być większy od kosztu montażu dwóch punktów pomiarowych na rurach o małej średnicy. Z powyższego wynika, że aby zminimalizować koszty montażu punktów pomiarowych należy w ogólności możliwie ograniczać ich liczbę, chociaż widać też, że minimalizacja kosztów montażu niekoniecznie oznacza minimalizację liczby punktów pomiarowych.

Z kolei w przypadku maksymalizacji ilości informacji przekazywanych przez punkty pomiarowe, powinny on być tak wybrane, aby przekazywały wiedzę o stanie sieci nie tylko z danego punktu, ale również z jego także dalszego otoczenia. Takie punkty charakteryzujące się duża wrażliwością na zmiany stanu sieci nazwiemy punktami charakterystycznymi. Maksymalizacja przekazywanej informacji oznacza zwykle zwiększanie liczby punktów pomiarowych, a więc działanie przeciwne do opisanego powyżej. Można jednak też zauważyć, że odpowiedni wybór stosunkowo niewielkiej liczby punktów charakterystycznych może być równoważny pod względem jakości przekazywanej wiedzy o sieci większej liczbie punktów zlokalizowanych w mniej wrażliwych miejscach sieci.

Wybór odpowiednich punktów pomiarowych do monitorowania sieci wodociągowej jest nietrywialnym zadaniem, do rozwiązania którego można stosować różne algorytmy obliczeniowe. Jednym z nich, niekoniecznie najlepszym, jest algorytm podany przez Reinharda Straubela. Składa się on z następujących czterech kroków:

1. Wykonanie obliczeń symulacyjnych przy użyciu modelu hydraulicznego sieci wodociągowej dla stanu standardowej eksploatacji sieci: Dla zadanego średniego obciążenia sieci wyznacza się ciśnienia węzłowe we wszystkich węzłach i przepływy we wszystkich odcinkach sieci.
2. Wykonanie obliczeń symulacyjnych dla stanów awaryjnych sieci: Przy symulowanych kolejno w każdym węźle sieci wyciekach awaryjnych, istotnie różnych od obciążenia średniego, wyznacza się nowe ciśnienia węzłowe we wszystkich węzłach i nowe przepływy we wszystkich odcinkach sieci.
3. Sortowanie potencjalnych punktów pomiarowych m według malejącej wrażliwości S_D na zmiany ciśnienia:

$$S_{Dm} = \frac{\sum\limits_{k \neq m} (\Delta p_{mk} / p_m) E_{km}}{\sum\limits_{k \neq m} E_{km}}$$

$$\Delta p_{mk} = | P_{mk} - p_m |$$

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

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

4. Optymalizacja wielokryterialna dla wyznaczenia liczby i lokalizacji punktów pomiarowych: Uwzględniając wszystkie możliwe kombinacje liczby i umiejscowienia punktów pomiarowych, wykonuje się obliczenia optymalizacji z następującymi kryteriami celu:
   - Minimum liczby punktów
   - Maksimum wrażliwości odnośnie lokalizacji wycieku
   - Minimum kosztów instalacji punktów pomiarowych.

Przy tym jako miarę wrażliwości lokalizacji wycieku można stosować na przykład sumę różnic między pomiarami ciśnień dla stanu standardowego pracy sieci i stanów awaryjnych dla przyjmowanych różnych kombinacji liczby i lokalizacji punktów pomiarowych.

Można zauważyć, że przy podanym algorytmie wyboru punktów pomiarowych mamy do czynienia z pewną niekonsekwencją: mianowicie w pierwszych dwóch krokach tego algorytmu używa się modelu hydraulicznego do wykonania obliczeń symulacyjnych, podczas gdy wyznaczenie poprawnego modelu wymaga posiadania wiarygodnych danych pomiarowych z działającego już monitoringu, o czym wspomniano już wcześniej. Oznacza to, że aby wyznaczyć model hydrauliczny sieci wodociągowej należy dysponować systemem monitoringu i aby zainstalować system monitoringu należy dysponować modelem hydraulicznym. Problem ten rozwiązuje się zwykle wspomnianą już metodą kolejnych przybliżeń, tzn. instaluje się na sieci wodociągowej system monitoringu w ograniczonym zakresie (z punktami pomiarowymi ustalonymi nie tyle w charakterystycznych, co w głównych punktach sieci, jak źródła i przepompownie), za pomocą którego wyznacza się zgrubny model hydrauliczny (opisujący jedynie główne magistrale sieci wodociągowej, tzn. uwzględniający odcinki sieci o największych średnicach), następnie za pomocą tego modelu rozszerza się system monitoringu o kolejne punkty, które służą z kolei do wyznaczenia bardziej szczegółowego modelu i takie postępowanie można kontynuować aż do momentu uzyskania dokładnego modelu i efektywnego systemu monitoringu.

Odnośnie systemu transmisji danych pomiarowych mamy do czynienia zasadniczo z trzema możliwościami: przesyłem danych za pomocą systemu telemetrii, czyli drogą kablową, za pomocą systemu telefonii komórkowej, czyli w systemie GSM, oraz za pomocą transmisji radiowej przy użyciu tzw. radiomodemów. Przy tym każda z tych technologii ma jeszcze różne warianty realizacji decydujące o jakości i kosztach transmisji. W przypadku łączności kablowej można korzystać z istniejącej sieci telefonii stacjonarnej lub ze specjalnie zainstalowanych światłowodów. W przypadku telefonii komórkowej przesył danych może się odbywać za pomocą standardowych komunikatów SMS lub za pomocą tzw. pakietowego przesyłu danych GPRS. Z kolei w przypadku transmisji radiowej, dla której należy w punktach pomiarowych instalować maszty antenowe, można wybrać wariant stosunkowo niewielkiej liczby wysokich masztów widzących centralną antenę odbiorczą zlokalizowaną w miejscu komputera zbierającego i archiwizującego dane pomiarowe lub wariant większej liczby niższych masztów, z których część stanowiłyby maszty przekaźnikowe.

Odnośnie wyboru programu wizualizacji sieci wodociągowej mamy do czynienia z dużą liczbą różnych programów o różnych możliwościach. Dostępne programy wizualizacji, oferowane przez różne firmy operujące na rynku polskim, to na przykład iFIX, InTouch,

Genesis, Lookout, Wizcon, ProTool, Procon, WinCC i RSView. Różne przedsiębiorstwa wodociągowe preferują różne programy, na ogół kierując się jedynie bieżącymi podstawowymi wymaganiami dotyczącymi wdrażanego systemu monitoringu i ceną programu, zgodnie z wymaganiami obowiązujących procedur przetargowych. Te podstawowe wymagania, to wizualizacja danych pomiarowych i ich archiwizacja. Nie bierze przy tym zwykle pod uwagę możliwej przyszłej rozbudowy systemu monitoringu i związanych z tym przyszłych wymagań, którym aktualnie wybrany program może nie sprostać.

Te przyszłe wymagania mogą dotyczyć na przykład konieczności stosowania równoległe kilku różnych systemów transmisji danych, generowania różnych raportów o pomiarach dla celów badawczych lub sprawozdawczych, wykonywania różnych analiz statystycznych na podstawie zebranych pomiarów, zmiany ustalonych wcześniej kroków próbkowania oraz okresów uśredniania pomiarów, wreszcie możliwości rozbudowy systemu do odpowiednio dużej liczby punktów pomiarowych. Dla celów badawczych i sprawozdawczych należy zwykle mieć możliwość samodzielnego pisania odpowiednich procedur narzędziowych, co oznacza, że program wizualizacji powinien dysponować własnym prostym językiem programowania. Również nie każdy program może obsługiwać kilka kanałów transmisji danych i zwykle programy wizualizacji mają ograniczone możliwości odnośnie obsługi odpowiednio dużej liczby punktów pomiarowych. Także istotną sprawą jest posiadanie przez program wizualizacji wygodnego w obsłudze i bogatego w funkcje edytora graficznego.

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

Niestety, zorganizowanie takiego wzorcowego zespołu w ramach danego przedsiębiorstwa wodociągowego jest bardzo trudne, kalkulowane koszty wydają się zwykle zbyt wysokie a możliwe do uzyskania korzyści bardzo wątpliwe, co powoduje, że systemy monitoringu instalowane zwykle w polskich wodociągach są bardzo ograniczone odnośnie liczby punktów pomiarowych i bardzo ubogie odnośnie realizowanych przez nie zadań. Dysponują one zwykle jedynie kilkoma punktami pomiarowymi zainstalowanymi nie w charakterystycznych a w głównych punktach sieci, tzn. w punktach źródłowych i w przepompowniach, czyli hydroforniach strefowych, a ich zadania ograniczają się do informowania operatora sieci wodociągowej o ciśnieniach i przepływach w tych punktach.

Klasyczna i zwykle realizowana funkcja monitoringu sieci wodociągowej, to archiwizowanie i wizualizacja pomiarów przepływów i ciśnienia wody zbieranych w głównych punktach sieci, takich jak przepompownie strefowe i źródła wody. Jednak systemy monitoringu odpowiednio opracowane mogą być używane również do innych zadań związanych bezpośrednio ze sterowaniem operacyjnym i zarządzaniem siecią wodociągową. Takie zadania, to:

- Kalibracja modelu hydraulicznego sieci wodociągowej. Model hydrauliczny opisany liniowymi i nieliniowymi równaniami algebraicznymi zawiera szereg parametrów, których wartości w momencie formułowania modelu nie są dokładnie określone. Część z tych parametrów, na przykład średnice rurociągów, można określić stosunkowo dokładnie, natomiast o wartościach innych parametrów, takich jak na przykład

chropowatość odcinków sieci, wiadomo jedynie, że są zawarte w pewnym dopuszczalnym przedziale i te wartości należy wyznaczyć w procesie obliczeniowym zwanym kalibracją. Zmieniając wartości nieznanych parametrów w zadanych przedziałach i wykonując obliczenia symulacyjne modelu oblicza się przepływy i ciśnienia w odcinkach i węzłach sieci, które porównuje się następnie z przepływami i ciśnieniami zmierzonymi w punktach pomiarowych systemu monitoringu. Jeżeli występuje zgodność wartości obliczonych i mierzonych, to przyjmuje się, że model jest poprawny i stanowi wiarygodne odzwierciedlenie badanego obiektu. Jeżeli takiej zgodności nie ma, to zmienia się ręcznie lub automatycznie wartości parametrów modelu i ponownie sprawdza się jego poprawność, powtarzając te czynności do momentu uzyskania wymaganej zgodności między modelem i obiektem (przy tym proces dopasowywania modelu do obiektu nazywa się kalibracją, gdy zmiana wartości parametrów modelu odbywa się ręcznie, natomiast w przypadku automatycznej zmiany tych wartości właściwszą się nazwa: identyfikacja modelu).

Można zauważyć, że kalibracja modelu jest tym bardziej poprawna, im dysponuje się większą liczbą punktów pomiarowych monitoringu dla porównywania pomiarów z obliczeniami. Jednocześnie kalibracja nie jest czynnością jednorazową; ponieważ parametry sieci wodociągowej zmieniają się z czasem (np. chropowatość), więc wyznaczanie ich wartości należy okresowo powtarzać.

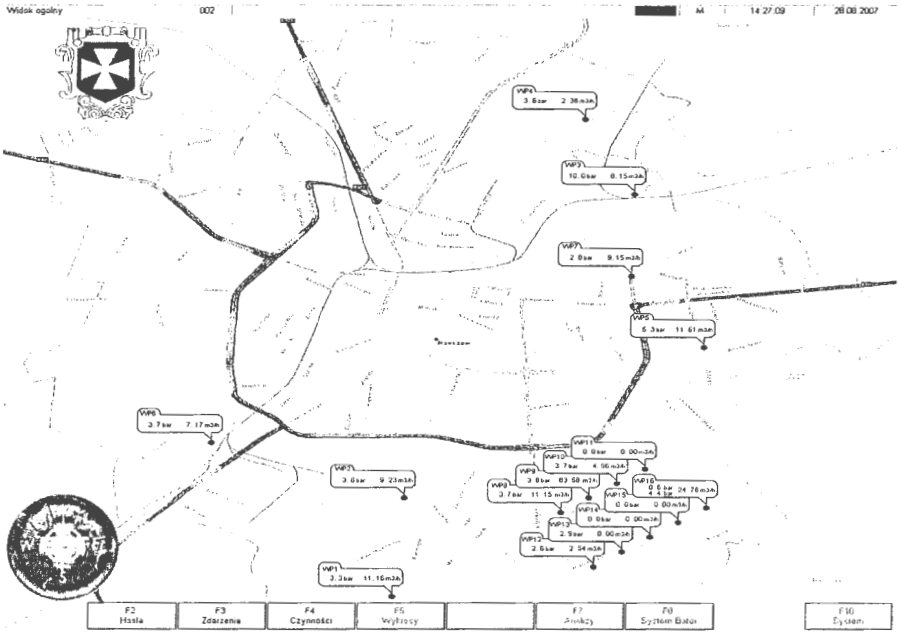
- Wykrywanie stanów awaryjnych: Wdrażając system monitoringu z punktami pomiarowymi odpowiadającymi punktom charakterystycznym sieci wodociągowej można wykrywać stany i lokalizować miejsca awarii. W przypadku normalnej eksploatacji sieci mamy do czynienia z pewnym typowym rozkładem ciśnień w węzłach oraz z typowymi zmianami tego rozkładu. Wystąpienie awarii jest sytuacja nietypową, która wpływa na nietypową zmianę ciśnień węzłowych w obszarze awarii. Sygnalizacja tej zmiany przez system monitoringu jest informacją dla operatora sieci o możliwości wystąpienia awarii. Podobnie można się posługiwać standardowymi rozkładami przepływów w przewodach wodociągowych, porównując je z rozkładami zmienionymi w przypadku awarii.

- Wykrywanie nieuzasadnionych poborów wody: Często zdarza się praktyce, że kradnie się wodę z sieci wodociągowej. Oznacza to, że produkcja wody przekracza udokumentowany rozbiór wody. W przypadku braku systemu monitoringu można jedynie stwierdzić wystąpienie takiego zdarzenia w skali całej sieci. Natomiast jeżeli istnieje dokładny monitoring, to porównując rejestrowane odbiory wody przez użytkowników sieci z przepływami monitorowanymi przestrzennie można zlokalizować miejsca sieci, w których występują istotne nierówności między poborem i produkcją, a więc wskazać miejsca potencjalnych kradzieży względnie niejawnych wycieków wody.

- Wyznaczanie modeli prognozujących obciążenie sieci: Obciążenie sieci zmienia się cyklicznie w zależności od pory roku, dnia tygodnia czy pory dnia. Te zmiany mają wpływ na sterowanie siecią, w szczególności na napełnianie i opróżnianie zbiorników wyrównawczych zlokalizowanych w sieci: przewidując większe obciążenie sieci powinno się odpowiednio wcześniej zbiorniki napełnić, podczas gdy można je opróżniać w przypadku mniejszego zapotrzebowania na wodę. Również do wykonywania dokładnych obliczeń hydraulicznych sieci należy znać godzinowe rozkłady obciążenia już nie tylko całej sieci, ale również jej poszczególnych węzłów lub grup węzłów. Aby takie modele obciążenia sieci względnie węzłów sieci wyznaczyć, należy dysponować odpowiednio długimi seriami pomiarów przepływu z zainstalowanego na sieci systemu monitoringu.

- Sterowanie prędkością przepływu wody w sieci: Problem dotyczy poprawiania jakości wody krążącej w sieci wodociągowej. Woda wprowadzana do sieci po uzdatnieniu w stacji poboru wody może tracić swoje walory smakowe i zapachowe, jeżeli przebywa w sieci odpowiednio długo i w dodatku nie krąży w niej z odpowiednio dużą prędkością. Szczególnie dotyczy to przypadków sieci starych o rurach stalowych, żeliwnych lub cementowych, które z upływem czasu rdzewieją lub zarastają glonami. Aby uniknąć pogarszania się jakości wody, należy w takich przypadkach wymusić jej odpowiednio szybkie przepływy w sieci poprzez odpowiednie sterowanie pracą pomp w przepompowniach i stanem zasuw zainstalowanych w sieci. Pomiary z monitoringu są niezbędne do stwierdzania niekorzystnych przestojów wody i realizacji takiego sterowania.

System monitoringu sieci wodociągowej w Rzeszowie buduje się już od ok. 10 lat, dodając stopniowo nowe punkty pomiarowe i zmieniając systemy przesyłu danych oraz ich wizualizacji i archiwizacji. Obecny system monitorowania parametrów pracy sieci pokazany jest na rys. 5.



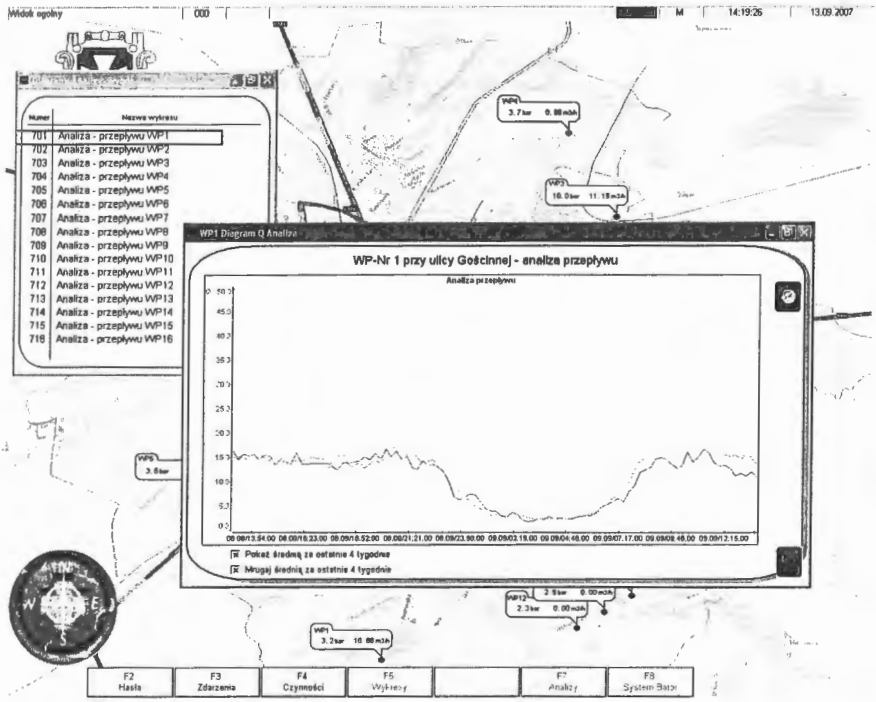
Rys. 5. Układ węzłów pomiarowych na sieci wodociągowej Rzeszowa.

Składa się z on 30 punktów pomiarowych, przekazujących do systemu G/Technology informacje o mierzonych ciśnieniach i przepływach. Transmisja danych z punktów pomiarowych do serwera systemu monitoringu odbywa się dla 15 punktów za pomocą telefonii komórkowej (system GPRS) oraz dla pozostałych punktów drogą radiową. W

systemie monitoringu wizualizację, archiwizację i przetwarzanie danych pomiarowych wykonuje program ProconWin firmy Infoprod.

Obecnie rozbudowuje się system monitoringu o kolejnych 14 punktów pomiarowych i dwa dodatkowe stanowiska operatorskie, które będą ulokowane w Dziale Głównego Energetyka i Dziale Głównego Automatyka Przedsiębiorstwa a programem wizualizacji zainstalowanym na tych stanowiskach będzie Wizcon.

Obecnie eksploatowany system ProconWin umożliwia m.in. śledzenie poprawności pracy sieci poprzez porównywanie aktualnych przebiegów przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych z charakterystykami wzorcowymi tych parametrów. Charakterystyki te zostały utworzone jako przebiegi uśrednione odpowiednich sygnałów zarejestrowanych w tych punktach w kilku poprzednich analogicznych dniach tygodnia. Oznacza to, że bieżący przebieg na przykład przepływu w danym punkcie pomiarowym rejestrowanym na przykład w poniedziałek porównuje się z charakterystyką przepływu wyznaczoną na podstawie przepływów zarejestrowanych dla kilku poprzednich poniedziałków.



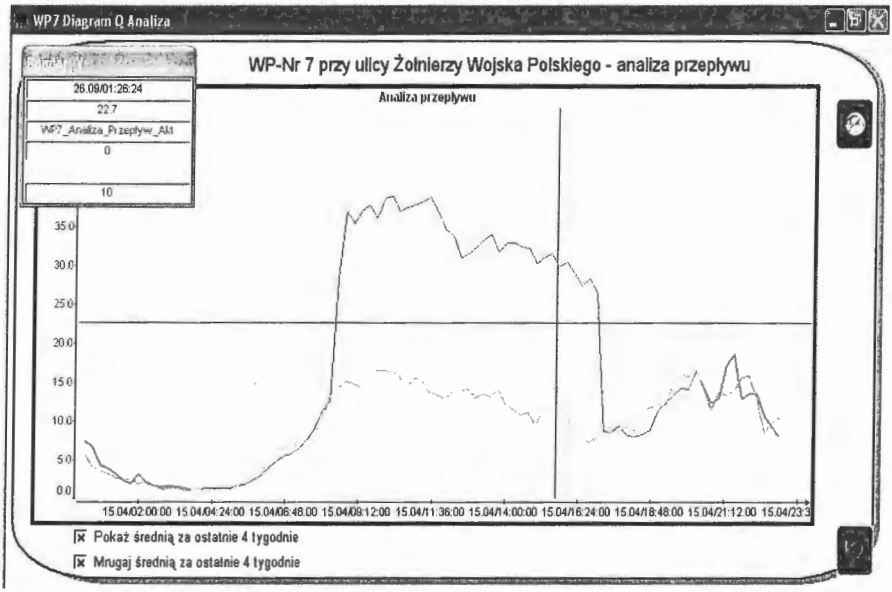
Rys. 6. Diagram trendów przepływu wody.

Na rys. 6 pokazano dwa przykładowe przebiegi przepływu wody, jeden bieżący a drugi uśredniony, dla pojedynczego punktu pomiarowego systemu monitoringu sieci wodociągowej.

Pomiary wartości przepływów zapisane w postaci wykresów wykorzystuje się w praktyce eksploatacyjnej sieci w celach analitycznych, z których to analiz mogą wynikać korzyści ekonomiczne oraz wnioski optymalizujące stan i pracę sieci wodociągowej. Na przykład analizując wykres przepływu wody z danego węzła pomiarowego można wychwycić rozbieżności przepływów w stosunku do ostatnich tygodni, dzięki czemu w łatwy sposób zlokalizowana zostanie anomalia świadcząca na przykład o pękniętym rurociągu.

Taki przypadek jest widoczny na rys. 7, na którym widać zdecydowany wzrost przepływu wody w sieci wodociągowej w mierzonym punkcie sieci, w którym średnie przepływy kształtowały się zwykle na poziomie ok. 12 m^3/h, natomiast w godzinach między 10.00 a 12.00 wartość przepływu wzrosła nagle do 40 m^3/h. Oznacza to większy niż zwykle w tym czasie rozbiór wody o ok. 60 %. Tak gwałtowny wzrost przepływu wody w sieci informuje służby pracownicze MPWiK o kilku prawdopodobnych nieprawidłowościach zaistniałych w tym fragmencie sieci, którymi mogą być:

- awaria przewodu wodociągowego
- otwarcie hydrantu przeciwpożarowego
- nagły zwiększony pobór wody.



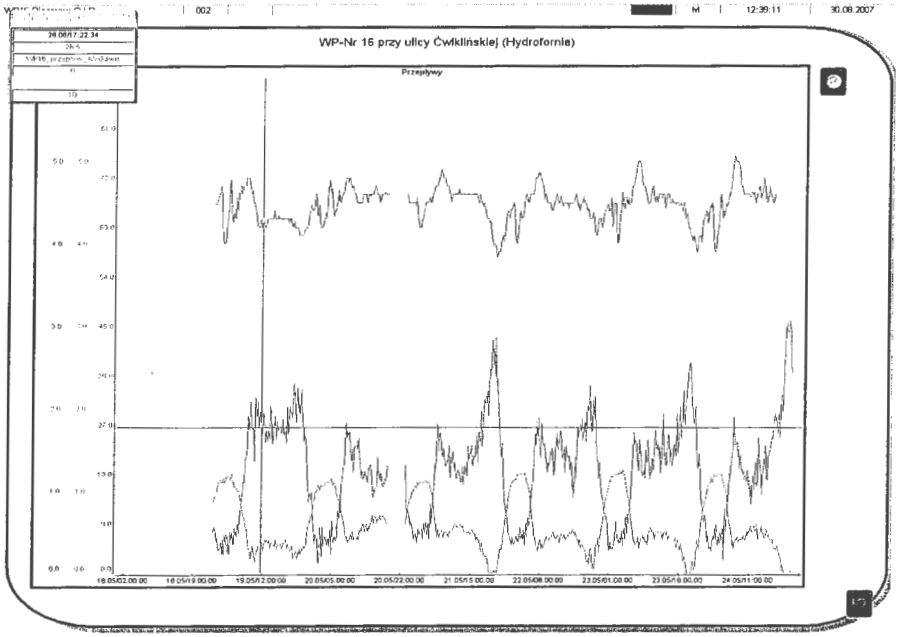
Rys. 7. Porównanie anomalii przepływu (wykres górny) ze średnim trendem (wykres dolny) w monitorowanym węźle pomiarowym.

Pierwsze dwie przyczyny tak nagle następującego wzrostu przepływu wody (awaria, otwarcie hydrantu) wiążą się z potencjalnymi stratami ekonomicznymi dla przedsiębiorstwa: na przykład nie wykryty powierzchniowo upływ wody z sieci pociąga za sobą konieczność dodatkowego jej wyprodukowania przez Zakład Uzdatniania Wody MPWiK oraz

podwyższenia pracy pomp w pompowniach celem dostarczenia wody do dalszych rejonów miasta. Ponadto otwarty zawór hydrantowy przeciwpożarowy nie zawsze oznacza pobór wody zgodnie z jej przeznaczeniem (pożar), lecz nierzadko kradzież wody, na przykład. na cele budowlane bądź ogrodnicze.

Innym przykładem potwierdzającym przydatność systemu monitoringu w warunkach eksploatacji sieci wodociągowej jest przypadek zarejestrowanego niedoboru wody w punkcie pomiarowym zainstalowanym w jednej z przepompowni strefowych. Wówczas w późnych godzinach wieczornych (20.00 – 23.00) ciśnienie wody w sieci rejestrowane w tej przepompowni spadało nawet do poziomu 0 bar (rys. 8). Taki poziom ciśnienia wody na „wejściu" do przepompowni oznacza nie tylko niedobór wody w danym obszarze sieci, ale automatycznie jest to problem z poprawną pracą pomp i utrzymaniem wymaganego ciśnienia w sieci za przepompownią, czyli w tzw. drugiej strefie ciśnieniowej.

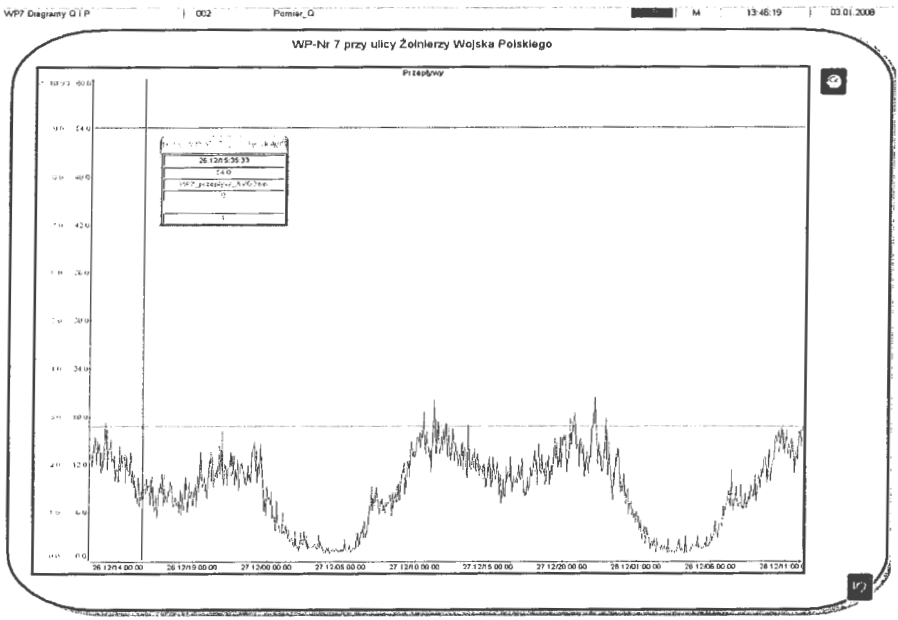
Problem ten został rozwiązany odpowiednim otwarciem/zamknięciem zasuw na sieci wodociągowej przez pracowników Działu Sieci Przedsiębiorstwa, dzięki analizie wykonanej przez pracowników Działu Głównego Energetyka i Działu Obsługi Komputerowej na podstawie wydruków wykresów ciśnień i przepływów wody z systemu monitoringu dotyczących odnośnego rejonu miasta. Uchroniło to przedsiębiorstwo przed koniecznością kosztownych inwestycji w postaci budowy nowej lub przebudowy istniejącej sieci wodociągowej.



Rys. 8. Wykresy wartości ciśnienia na wejściu (wykres dolny), na wyjściu (wykres górny) i przepływu wody (wykres środkowy) w omawianej przepompowni.

Innym ciekawym zastosowaniem systemu monitoringu sieci wodociągowej jest praktyczne wykazanie, że pomiary ciśnienia zasadniczo są mało przydatne do wykrywania stanów awaryjnych w sieci i raczej należy korzystać w tym celu z obserwacji przebiegów przepływu wody i ich porównywania z przebiegami wzorcowymi dla danych punktów pomiarowych. W prowadzonych dotychczas analizach teoretycznych sugerowano raczej korzystanie z pomiarów ciśnienia biorąc pod uwagę dużo niższe koszty inwestycyjne zakupu i instalacji ciśnieniomierzy w porównaniu z przepływomierzami. Jednak nie brano pod uwagę, że w przypadku wystąpienia awarii i związanego z tym wycieku wody nastąpi wprawdzie zmiana ilości pompowanej wody, natomiast ze względu na włączenie się zwykle dodatkowych pomp w przepompowni strefowej nie nastąpi praktycznie zmiana ciśnienia, gdyż jego spadek zostanie natychmiast wyrównany przez pracę dodatkowych pomp. Czyli o zaistniałej awarii może informować obserwacja przepływów i ewentualnie pracy pomp w przepompowniach, natomiast praktycznie żadnej informacji o awarii nie dostarczy obserwacja przebiegów ciśnienia.

Widać to wyraźnie na wykresach na rys. 9, na którym istotnym zmianom przepływu w obserwowanym punkcie pomiarowym praktycznie nie towarzyszą żadne zmiany ciśnienie w tym punkcie.



Rys. 9. Obserwowane zmiany przepływu i stałe ciśnienie w wybranym punkcie pomiarowym sieci wodociągowej.

Pomiary z systemu monitoringu służą także do kalibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, który z kolei jest wykorzystywany do celów optymalizacji i sterowania siecią oraz przede wszystkim do obliczeń ciśnienia i przepływów w punktach, które nie są

monitorowane. W wodociągach rzeszowskich zainstalowano model hydrauliczny opracowany w Instytucie Badań Systemowych PAN (model OHIO = Obliczenia Hydrauliczne I Optymalizacji) i dokonano jego kalibracji dla fragmentu sieci wodociągowej, objętej pierwszym etapem tworzenia systemu monitoringu, zrealizowanym w 2000 roku i składającym się z 8 punktów pomiarowych.

Dysponując systemem monitoringu i modelem hydraulicznym opracowano koncepcję oceny jakościowej stanu pracy sieci przy użyciu algorytmu aproksymacji krigingowej. Algorytm ten wyznacza wartości badanego parametru w dowolnym punkcie badanego obszaru na podstawie znanych wartości tego parametru w innych punktach obszaru.

Sposób postępowania przy realizacji tej oceny jest wobec tego następujący:

- Na podstawie pomiarów z systemu monitoringu dokonuje się kalibracji modelu hydraulicznego
- Na podstawie obliczeń hydraulicznych wyznacza się wartości przepływów i ciśnień we wszystkich węzłach i przewodach sieci wodociągowej
- Na podstawie algorytmu aproksymacji krigingowej wyznacza się wartości przepływów i ciśnień w punktach siatki prostokątnej opisanej na badanym obszarze obejmującym całą sieć wodociągową; brzegi obszaru siatki wyznacza się obrysowując myszką na monitorze skrajne węzły sieci wodociągowej.

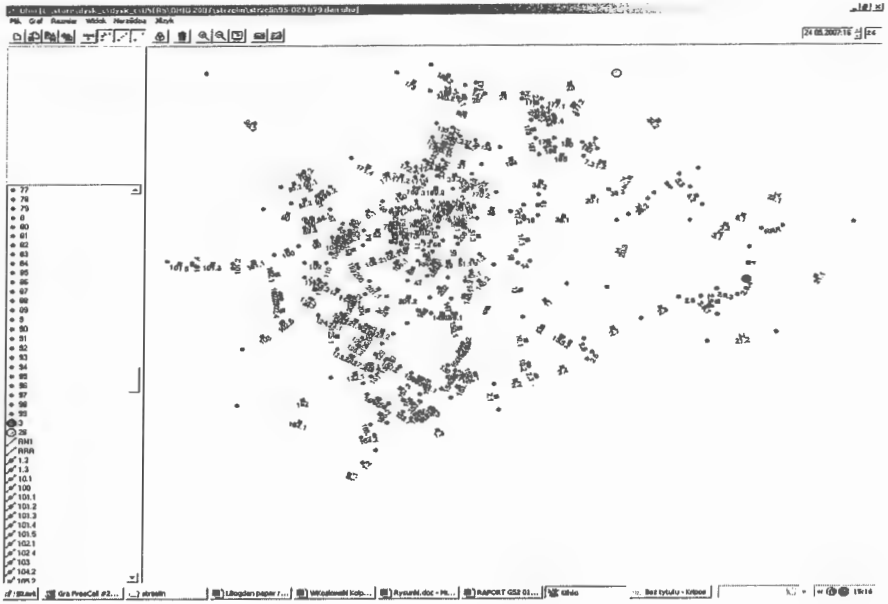
Wartości przepływów i ciśnienia wyznaczone z aproksymacji krigingowej mają charakter szacunkowy, dlatego ocena stanu pracy sieci wodociągowej na ich podstawie ma również charakter jedynie jakościowy. Jednak zgodnie z naszą koncepcją taka ocena ma służyć operatorowi sieci wodociągowej do szybkiego analizowania stanu sieci i w przypadku stwierdzenia jakichś anomalii w jej pracy dokładniejsza analiza mogłaby już przebiegać na przykład na podstawie oceny wyników obliczeń hydraulicznych.

Na rysunkach 10, 11 i 12 przedstawiono ekran programu OHIO z badanym fragmentem sieci wodociągowej Rzeszowa oraz ekrany z wynikami aproksymacji krigingowej wykonanej dla tego fragmentu sieci za pomocą programu KRIPOW (KRIging Pomiarów Wodociągowych), opracowanego również w Instytucie Badań Systemowych PAN.

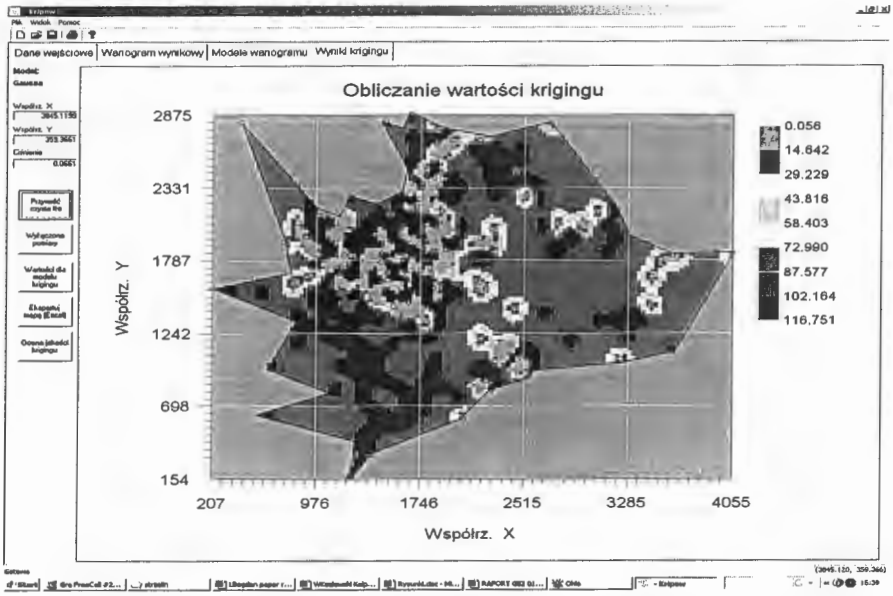
Na rys. 11 są zamieszczone wyniki aproksymacji dotyczące ciśnienia, natomiast na rys. 12 wyniki dotyczące przepływów. Różnymi kolorami zaznaczono ciśnienia względnie przepływy o różnych wartościach, przy czym zasadniczo rozróżnia się trzy przedziały badanego parametru: o wartościach właściwych, za dużych i za małych.

W naszym przykładzie sieć pracuje generalnie poprawnie i tylko w niewielkich jej obszarach ciśnienie jest zbyt duże (obszary zaznaczone kolorem bordowym na mapie, oznaczające ciśnienia powyżej 8 atm) lub zbyt małe (obszary zaznaczone kolorem niebieskim na mapie, oznaczające ciśnienia poniżej 3 atm) i również przepływy są zbyt duże (obszary zaznaczone także kolorem bordowym na mapie) lub zbyt małe (obszary zaznaczone kolorem niebieskim na mapie). W takich przypadkach operator powinien podjąć działania usprawniające pracę sieci poprzez redukcję względnie zwiększenie ciśnień względnie szybkości przepływów w nieprawidłowo działających obszarach sieci.

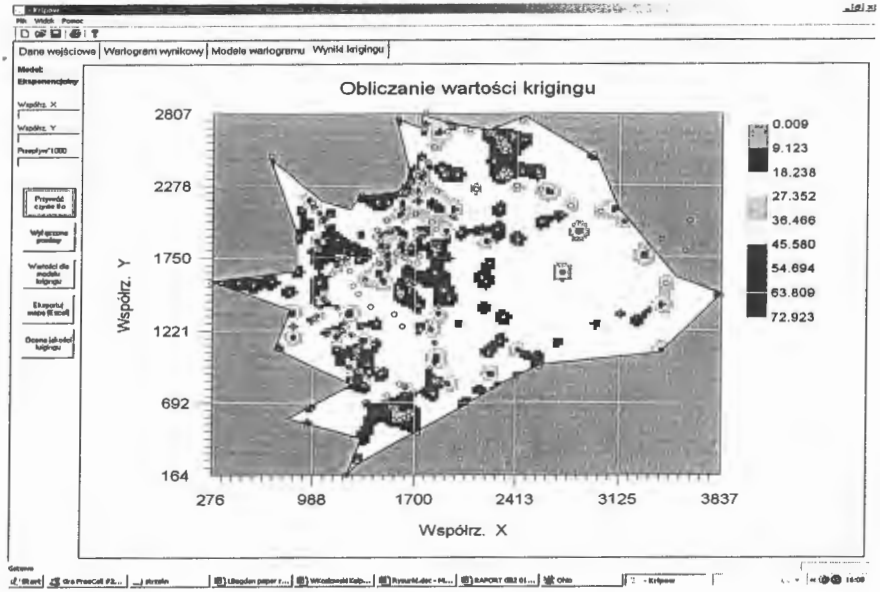
Należy zauważyć, że zbyt duże ciśnienia grożą awariami na łączeniach przewodów wodociągowych, natomiast zbyt małe ciśnienia oznaczają brak wody u użytkowników sieci. Z kolei za duże lub za małe prędkości wody w przewodach wodociągowych skutkują pogorszeniem jakości wody, czy na skutek jej zagniwania (przy bardzo małych prędkościach), czy na skutek zabrudzenia z powodu porywania ze ścianek przewodów różnego rodzaju osadzonych tam zanieczyszczeń (przy bardzo dużych prędkościach).



Rys. 10. Fragment badanej sieci wodociągowej na ekranie programu OHIO.



Rys. 11. Ocena stanu pracy sieci wodociągowej na podstawie analizy wartości ciśnienia.



Rys. 12. Ocena stanu pracy sieci wodociągowej na podstawie analizy wartości przepływów.

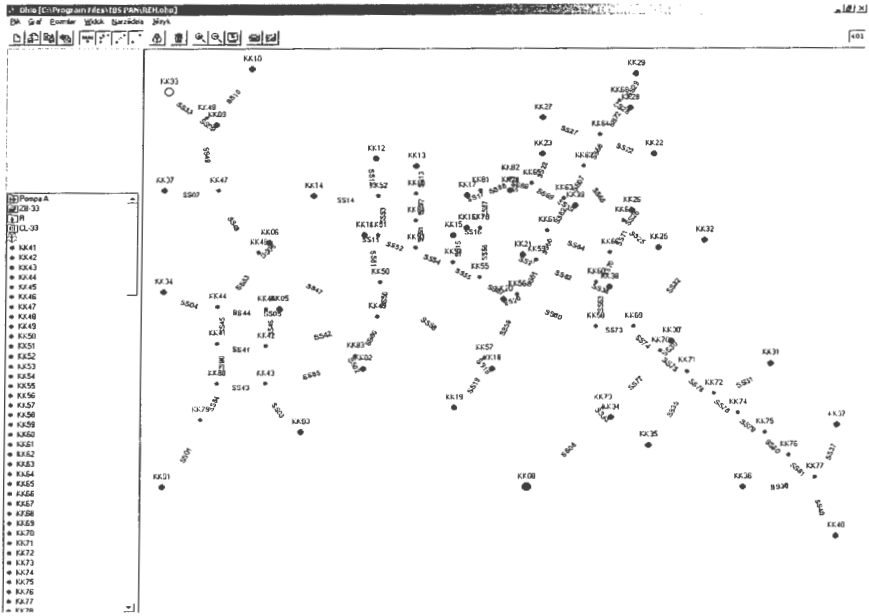
5. Modele hydrauliczne

Podstawowym narzędziem informatycznym ułatwiającym zarządzanie siecią wodociągową jest model hydrauliczny do obliczania przepływów i ciśnień wody w sieci. Model taki 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. 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 zasuwy, zawory zwrotne, reduktory ciśnienia, zbiorniki wyrównawcze, układy pompowe w węzłach zasilających na wejściu sieci i w hydroforniach umieszczonych wewnątrz sieci. Dodatkowe niezbędne dane, to wartości rozbiorów wody w węzłach odbiorczych na wyjściu sieci.

Systemy monitoringu są konieczne do kalibracji modelu, czyli jego dopasowania do badanego obiektu, oraz do okresowej weryfikacji modelu koniecznej ze względu na zmiany zachodzące na sieci i spowodowane jej starzeniem się względnie modernizacją lub rozbudową. Kalibracja 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. Wykonywanie kalibracji a nie identyfikacji jest spowodowane faktem, że modele hydrauliczne sieci wodociągowych 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 odcinków. 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. Kalibracja polega na tym, że w równaniach modelu ręcznie ustala się wartości nieznanych współczynników i następnie wykonując symulację modelu porównuje się obliczone wyjścia modelu z wartościami zmierzonymi na obiekcie. Te wyjścia, to 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.



Rys. 13. Ekran programu OHIO obliczeń hydraulicznych z przykładowym grafem modelowanej sieci wodociągowej.

Przy kalibracji modelu hydraulicznego sprawą zasadniczą jest prawidłowe zadanie rozbiorów wody, które na równi z geometrycznymi parametrami sieci wodociągowej decydują o poprawności obliczeń symulacyjnych. Dysponując systemem monitoringu mamy do dyspozycji zmierzone wartości rozbiorów w wybranych punktach sieci i na ich podstawie jesteśmy w stanie wyznaczyć charakterystyki godzinowe dla typowych węzłów odbiorczych sieci. W sieci wodociągowej wyróżnia się kilka standardowych typów odbiorców, jak na przykład: domek jednorodzinny, budynek mieszkalny kilku i wielopiętrowy, zakład rzemieślniczy (piekarnia), przedszkole lub żłobek, szpital, zakład produkcyjny itp. Dla tych odbiorców można wyznaczyć charakterystyki obciążenia (rozbioru) korzystając z

automatycznych systemów monitoringu lub prowadząc eksperymenty z wykorzystaniem przenośnych urządzeń pomiarowych.

W miejskich wodociągach w Rzeszowie od kilku lat są prowadzone prace dotyczące implementacji zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego sterowanie operacyjne i zarządzanie siecią wodociągową. Jednym z elementów tego systemu jest komputerowy model hydrauliczny sieci wodociągowej, służący do symulacji pracy sieci, jej optymalizacji, sterowania i projektowania. Podjęto decyzję o rozwijaniu własnego komputerowego modelu sieci wodociągowej, stwarzając w ten sposób możliwość zastosowania i sprawdzenia w praktyce różnych algorytmów obliczeniowych rozwijanych od wielu lat w IBS PAN. Jednocześnie decyzja ta umożliwiła zintegrowanie z modelem algorytmów optymalizacji i sterowania, co nie jest stosowane w programach dostępnych na rynku. Program OHIO został opracowany na podstawie algorytmów Andrzeja Pawlaka.

Program OHIO jest przeznaczony do tworzenia komputerowego modelu systemu dystrybucji wody (sieci wodociągowej) oraz do analizowania stanów hydraulicznych systemu w zadanych horyzontach czasowych. Inne zadania programu, to optymalizacja struktury sieci wodociągowej oraz optymalizacja funkcjonowania systemu dystrybucji.

Optymalizacja struktury sieci jest elementem procesu projektowania systemu zaopatrzenia w wodę (SZW), na który składa się sekwencja obliczeń obejmująca:

- dobór optymalnych średnic przewodów (odcinków) wodociągowych
- lokalizacja i dobór parametrów zaworów redukcyjnych w sieci
- dobór pomp w pompowniach i ustalanie parametrów ich pracy.

Optymalizacja funkcjonowania systemu dystrybucji wody sprowadza się do eliminacji uchybu między ciśnieniem wymaganym a ciśnieniem obliczonym w węzłach odbiorczych sieci, poprzez:

- zmniejszanie chropowatości przewodów
- zmianę średnicy rur na ścieżkach największej oporności między źródłami zasilania a węzłami z niedoborem ciśnienia.

Podstawy budowy komputerowych modeli hydraulicznych układów dystrybucji wody

Każde z wymienionych zadań programu można podzielić na szereg prostszych podzadań, polegających na wyznaczeniu chwilowego stanu hydraulicznego sieci wodociągowej. Stan hydrauliczny sieci jest określany poprzez wyznaczenie wartości natężeń przepływu wody przez wszystkie elementy systemu oraz wartości ciśnień w każdym punkcie systemu na podstawie strat ciśnień wywołanych przepływem wody przez te elementy.

Stan hydrauliczny sieci opisują równania wynikające z praw *Kirchhoffa*. I prawo *Kirchhoffa* wynika z zasady zachowania masy i mówi, że w każdym węźle *w* sieci suma strumieni cieczy dopływającej jest równa sumie strumieni cieczy odpływającej, tzn. (Pawlak, 2007)

$$\forall_{w} \sum_{i \in dopyw \rightarrow w} q_i = \sum_{j \in odpyw \leftarrow w} q_j \qquad (1)$$

Liczba równań wynikających z I prawa *Kirchhoffa* jest równa liczbie węzłów *w* i jest wystarczająca do obliczenia natężeń przepływów cieczy w sieci o strukturze rozgałęźnej (bez

obwodów). Liczba nieznanych zmiennych odpowiadających natężeniom przepływu przez odcinki sieci ograniczone węzłami jest równa:

$$l = w - 1 \tag{2}$$

Dla jednoznacznego wyznaczenia l wartości natężeń przepływów q_i w odcinkach sieci wystarczy układ $(w - 1)$ równań. Ponieważ liczba równań wynikających z I prawa *Kirchhoffa* jest równa w, należy ją zredukować o jedno równanie. W praktyce z układu równań eliminowane jest równanie opisujące bilans natężeń strumieni cieczy w źródle zasilania. W przypadku sieci z wieloma źródłami zasilania pomijane jest równanie opisujące bilans natężeń strumieni cieczy w jednym dowolnym źródle zasilania.

W przypadku sieci o strukturze obwodowej (pierścieniowej, oczkowej), w której pojawiają się kolejne odcinki i odpowiadające im zmienne natężeń przepływu, dla jednoznacznego wyznaczenia wartości natężeń przepływu we wszystkich odcinkach konieczne są dodatkowe równania opisujące stan hydrauliczny systemu. Dodatkowe równania buduje się w oparciu o II prawo *Kirchhoffa*. Wynika ono z zasady zachowania energii i mówi, że w każdym zamkniętym obwodzie systemu suma strat ciśnienia wywołanych przepływem strumieni cieczy przez wszystkie elementy systemu należące do zamkniętego obwodu jest równa zero, to znaczy:

$$\forall_{o} \sum_{l \in obwodu} \Delta h_l = 0 \tag{3}$$

Liczba równań wynikających z II prawo *Kirchhoffa* jest równa liczbie niezależnych obwodów, które powstają w wyniku dokładania do struktury sieci o budowie rozgałęźnej kolejnych odcinków domykających. Zależność na liczbę niezależnych obwodów można wyprowadzić, wychodząc z zależności na liczbę odcinków l w sieci rozgałęźnej zbudowanej z w węzłów, to znaczy:

$$o = l - w + 1 \tag{4}$$

Zależność ta jest znana jako zależność *Eulera* do wyznaczania niezależnych obwodów w sieci zbudowanej z l odcinków i w węzłów. W konsekwencji zbudowania układu $(w - 1)$ równań wynikających z I prawa *Kirchhoffa* oraz $(o = l - w + 1)$ równań wynikających z II prawa *Kirchhoffa* otrzymujemy układ równań

$$w - 1 + o = w - 1 + (l - w + 1) = l \tag{5}$$

jednoznacznie opisujących stan hydrauliczny sieci zawierającej w swojej strukturze l odcinków odpowiadających l nieznanym wartościom natężeń przepływu w odcinkach.

Czynnikiem wpływającym na kształtowanie stanów hydraulicznych sieci są z jednej strony parametry sieci, czyli jej struktura oraz parametry jej elementów, a z drugiej strony wymuszenia będące efektem oddziaływania otoczenia na system. Otoczeniem kształtującym funkcjonowanie systemu są wartości zapotrzebowania na wodę zgłaszanego przez odbiorców wody oraz założone wydajności pierwotnych źródeł zasilania.

Komputerowe modele hydrauliczne elementów sieci wodociągowej

Komputerowy model hydrauliczny elementu sieci wyraża zależność strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływającej cieczy oraz parametrów charakteryzujących oporność tego

elementu, zależną od rodzaju materiału oraz jego cech konstrukcyjnych (kształtu). Podstawowym elementem każdej sieci są przewody wodociągowe o przekroju kołowym wywołujące opory liniowe. Pozostałymi elementami sieci wywołującymi straty ciśnienia są elementy armatury (zasuwy, zawory, kolanka, trójniki, klapy zwrotne, hydranty itp.) wywołujące miejscowe straty ciśnienia. Do elementów czynnych zaliczamy pompownie, zbiorniki wyrównawcze oraz hydrofory.

Model hydrauliczny przewodu wodociągowego

Podstawowa zależność określająca *opory miejscowe tarcia* w kołowym przewodzie wodociągowym mówi, że straty ciśnienia są wprost proporcjonalne do współczynnika tarcia λ, długości przewodu L i kwadratu prędkości przepływu cieczy v oraz odwrotnie proporcjonalne do średnicy d. Jest ona wyrażona wzorem *Darcy-Weisbacha*

$$\Delta h = \lambda \frac{v^2}{2g} \frac{L}{d} \tag{6}$$

który po wyrażeniu prędkości w funkcji natężenia przepływu przez przewód o przekroju kołowym:

$$v = \frac{4q}{\pi d^2} \tag{7}$$

przyjmuje postać

$$\Delta h = \lambda \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{d^5} q^2 \tag{8}$$

Współczynnik tarcia λ jest wyrażony wzorem *Colebrooka-White'a*

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}71d}\right) \tag{9}$$

gdzie: k – współczynnik zastępczej chropowatości będący miarą chropowatości ścian wewnętrznych przewodu, liczba *Reynoldsa* $\mathrm{Re} = vd/\upsilon$ jest wprost proporcjonalna do prędkości v i średnicy przewodu d, a odwrotnie proporcjonalna do współczynnika lepkości kinematycznej cieczy υ.

Wyrażając oporność właściwą przewodu przez

$$c = \lambda \frac{8}{g\pi^2} \frac{1}{d^5} \tag{10}$$

otrzymujemy wzór

$$\Delta h = cLq^2 = Kq^2 \tag{11}$$

gdzie K jest *opornością hydrauliczną* przewodu.

Model hydrauliczny oporów miejscowych

Opory miejscowe tarcia powodują powstanie strat ciśnienia w zależności od cech konstrukcyjnych przewodu w danym miejscu, takich jak:

- Zwężenie lub rozszerzenie przewodu
- Zmiana kierunku przewodu (kolanka)
- Częściowe zamknięcie przekroju przewodu (zasuwy, zawory)
- Odgałęzienie lub dołączenie innego przewodu (trójniki).

Każda strata miejscowa jest proporcjonalna do kwadratu prędkości przepływu cieczy v oraz współczynnika strat miejscowych ζ zależnego od konstrukcji przewodu w danym miejscu:

$$\Delta h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \tag{12}$$

Wzór ten po wyrażeniu prędkości w funkcji natężenia przepływu przez przewód o przekroju kołowym przyjmie postać

$$\Delta h_m = \zeta \frac{8}{g\pi^2} \frac{1}{d^4} q^2 \tag{13}$$

Porównując otrzymany wzór ze wzorem na straty ciśnienia w przewodzie:

$$\lambda \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{d^5} q^2 = \zeta \frac{8}{g\pi^2} \frac{1}{d^4} q^2 \tag{14}$$

uzyskujemy wzór na długość zastępczą ekwiwalentnego przewodu o średnicy d dla strat miejscowych ζ:

$$L_z = \frac{\zeta d}{\lambda} \tag{15}$$

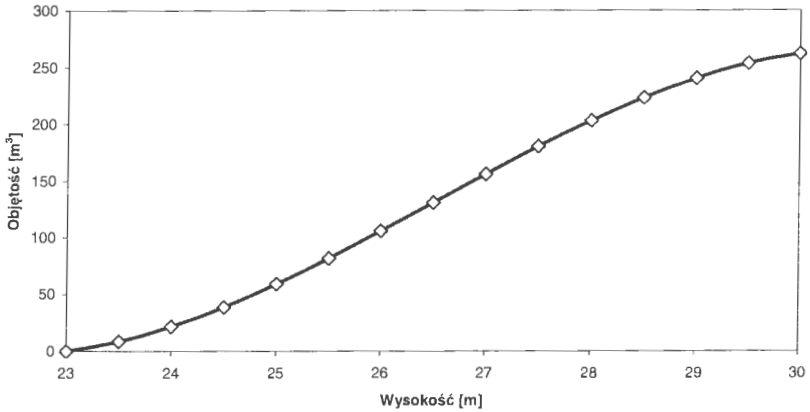
a wzór na opór miejscowy tarcia można wyrazić w postaci

$$\Delta h_m = c L_z q^2 = K_z q^2 \tag{16}$$

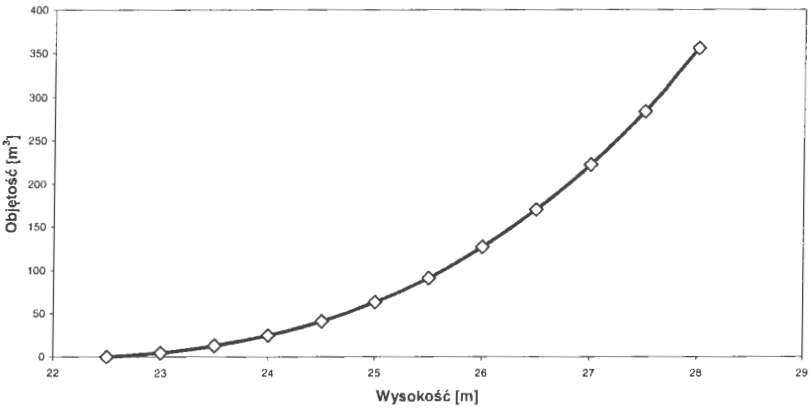
Model hydrauliczny zbiornika wyrównawczego

Parametrem istotnym z punktu widzenia hydrauliki sieci wodociągowej jest poziom zwierciadła wody w zbiorniku w określonym momencie czasu. Do analiz funkcjonowania systemu w zadanym horyzoncie czasowym należy zamodelować zmianę poziomu wody w zależności od kształtu oraz zmian objętości wody w zbiorniku.

Charakterystyka objętości zbiornika o kształcie kuli



Charakterystyka objętości zbiornika o kształcie odwróconego ściętego stożka



Rys. 14. Charakterystyki objętości zbiorników (*źródło A. Pawlak*).

Charakterystyka hydrauliczna zbiornika wyrażająca wysokość zwierciadła wody H_z w funkcji objętości może być opisana wielomianem interpolacyjnym 3 stopnia postaci:

$$H_z = H_{z\,\min} + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 \tag{17}$$

gdzie:

H_{zmin} – minimalny poziom zwierciadła wody w zbiorniku w [m H_2O]

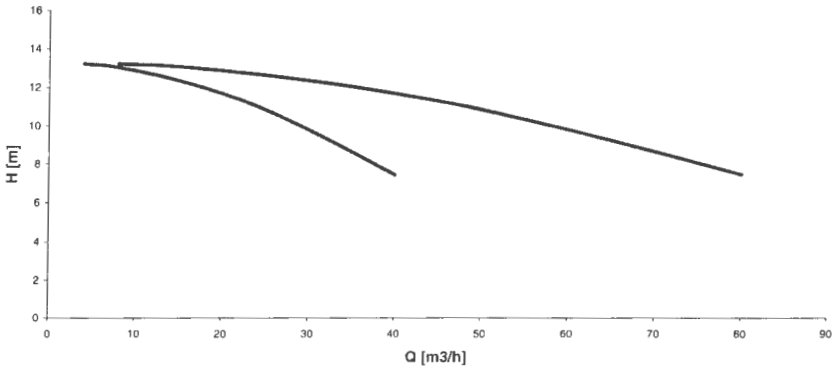
V – objętość wody w zbiorniku w [m^3]

a_i – współczynniki wielomianu.

Model hydrauliczny pompowni

Pompownie pracujące w systemach dystrybucji wody wyposażone są najczęściej w pompy o charakterystykach diagonalnych, które przedstawiają zależność wysokości podnoszenia H_p od wydajności pompy Q_p.

Pompy w pompowniach pracują zazwyczaj w układzie równoległym i są najczęściej pompami tego samego typu, o identycznych charakterystykach.



Rys. 15. Przykładowe charakterystyki pomp (*źródło A. Pawlak*).

Na zamieszczonym wykresie (rys. 15) przedstawione są charakterystyki jednej oraz dwóch identycznych pomp pracujących w układzie równoległym. Charakterystyki pomp pracujących w układzie równoległym są sumowane według wydajności (wzdłuż osi x (Q_p)).

Do opisu charakterystyki układu pomp pracujących równolegle wykorzystuje się także wielomiany interpolacyjne 2 stopnia. Aby nie budować wielu wielomianów dla wielu zestawów równolegle pracujących identycznych pomp, należy dokonać transformacji standaryzującej charakterystyki jednej lub wielu równolegle pracujących pomp przy pomocy przekształcenia standaryzującego o postaci:

$$q_p = \frac{2Q_p - (Q_{\max} + Q_{\min})}{Q_{\max} - Q_{\min}} \tag{18}$$

Przekształcenie to, zarówno dla jednej pompy jak i dla n równolegle pracujących pomp, sprowadza charakterystykę do przedziału standaryzowanego <–1,+1>. Dzięki temu wielomian

aproksymujący charakterystyki pompy w przedziale wydajności standaryzowanych <-1,+1> jest identyczny dla jednej, jak i dla wielu pomp o tych samych charakterystykach.

Charakterystyka hydrauliczna układu n równolegle pracujących pomp może być opisana wielomianem:

$$H_p = a_0 + a_1 q_p + a_2 q_p^2 \tag{19}$$

na podstawie co najmniej 3 punktów o współrzędnych $\{Q_p; H_p\}$ odczytanych z charakterystyki hydraulicznej pompy, gdzie:

H_p – wysokość podnoszenia pomp pracujących równolegle w [m H_2O]

q_p – znormalizowana wydajność zestawu n pomp pracujących równolegle

a_i – współczynniki wielomianu.

Często, w celu dostosowania dostawy wody do zmieniającego się zapotrzebowania, regulowana jest wydajność pompy przez zmianę jej prędkości obrotowej. Ten rodzaj regulacji powoduje zmianę charakterystyki pompy według następujących zależności:

$$\frac{Q_p}{Q_p'} = \frac{n}{n'} \qquad \text{oraz} \qquad \frac{H_p}{H_p'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \tag{20}$$

gdzie: Q_p i H_p – wydajność i wysokość podnoszenia pompy przy nominalnej prędkości obrotowej

Q'_p i H'_p – wydajność i wysokość podnoszenia pompy przy zmienionej prędkości obrotowej

n i n' – nominalna prędkość obrotowa i prędkość po zmianie.

Jeśli znana jest charakterystyka $H_p = f(Q_p)$ pompy przy prędkości obrotowej n, to charakterystykę przy prędkości n' wyznaczamy na podstawie punktów o współrzędnych

$$\{ Q_p' = \frac{n'}{n} Q_p \ ; \ H_p' = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 H_p \} \tag{21}$$

stosując przekształcenie normalizujące i wyznaczając współczynniki wielomianu interpolacyjnego 2 stopnia.

Metody rozwiązywania układów równań opisujących stan hydrauliczny sieci

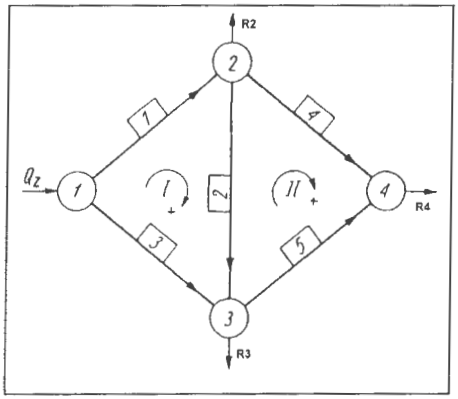
W celu wyznaczenia stanu hydraulicznego sieci wodociągowej opracowane zostały metody iteracyjne rozwiązywania układu równań nieliniowych wynikające z metody *Newton'a-Raphson'a*. Zostały one wyprowadzone przy wykorzystaniu twierdzenia mówiącego, że

- Każdą ciągłą i różniczkowalną funkcję n-tego stopnia możemy w dowolnym punkcie x_o rozwinąć w szereg *Taylora* w epsilonowym otoczeniu tego punktu:

$$f(q_1, q_2, \ldots, q_l) = f(q_1, q_2, \ldots, q_l)_o + \sum_i \frac{\partial f}{\partial q_i} dq_i + \sum_i \frac{\partial f^2}{\partial q_i^2} (dq_i^2 / 2!) + \ldots + \sum_i \frac{\partial f^n}{\partial q_i^n} (dq_i^n / n!)$$

gdzie natężenie przepływu $q_i = q_{io} + dq_i$ wyrażone jest jako suma stałej założonej *a'propri* wartości natężenia przepływu i zmiennej poprawki korygującej to natężenie w każdym z l odcinków systemu.

Pomijając w uzyskanym szeregu *Taylora* wszystkie wyrazy rozwinięcia oprócz dwóch pierwszych, uzyskujemy liniowe przybliżenie funkcji n-tego stopnia. W rezultacie równanie nieliniowe w funkcji natężeń przepływów w każdym odcinku sieci możemy przedstawić w postaci równania liniowego w funkcji poprawek natężeń przepływów w każdym odcinku sieci z błędem residualnym określonym przez pozostałe $(n - 1)$ wyrazy rozwinięcia funkcji w szereg *Taylora*.



Rys. 16. Przykładowy graf sieci wodociągowej (*źródło A. Pawlak*).

Istotę metody rozwiązywania układów równań nieliniowych opisujących stan hydrauliczny sieci z wykorzystaniem podanych wyżej zasad przybliżymy na przykładzie sieci o dwóch obwodach, w której są znane wymiary geometryczne rurociągów i parametry pozwalające obliczyć oporność przewodów, rozbiory węzłowe R_i i natężenia zasilania sieci Q_Z, kierunki przepływu wody w odcinkach, a także jest przyjęty kierunek sumowania strat energii w odcinkach poszczególnych obwodów zgodny z ruchem wskazówek zegara.

Stan równowagi hydraulicznej sieci opisują trzy (w–1 = 4–1) równania warunku ciągłości przepływu w węzłach:

$$\textit{węzeł } 2\text{: } q_1 - q_4 - q_2 - R_2 = 0$$

$$\textit{węzeł } 3\text{: } q_3 + q_2 - q_5 - R_3 = 0$$

$$\textit{węzeł } 4\text{: } q_4 + q_5 - R_4 = 0$$

oraz dwa (o = 2) warunki równowagi strat ciśnienia w obwodach:

$$\textit{obwód } \mathrm{I}\text{: } \Delta h_1 + \Delta h_2 - \Delta h_3 = 0$$

$$\textit{obwód } \mathrm{II}\text{: } \Delta h_4 + \Delta h_5 - \Delta h_2 = 0$$

które po uwzględnieniu zależności $\Delta h = Kq^2$ przyjmują postać

$$\textit{obwód}\ \mathrm{I}:\ K_1 q_1^2 + K_2 q_2^2 - K_3 q_3^2 = 0$$

$$\textit{obwód}\ \mathrm{II}:\ K_4 q_4^2 - K_5 q_5^2 - K_2 q_2^2 = 0$$

gdzie:

Q_Z – natężenie dopływu do sieci (zasilanie), [m^3/s]

q_i – natężenie przepływu w odcinkach [m^3/s]

R_j – natężenie rozbiorów w węzłach [m^3/s]

K_k – oporności odcinków [s^2/m^5].

Uzyskany układ 5 równań jest układem równań nieliniowych w funkcji natężeń przepływów opisujących stan hydrauliczny przedstawionej na schemacie sieci. Rozwijając każde z podanych równań w szereg *Taylora* i ograniczając się do dwóch pierwszych wyrazów rozwinięcia, wyżej podany układ możemy zapisać w postaci:

$$dq_1 - dq_4 - dq_2 = R_2 - q_{1o} + q_{4o} + q_{2o}$$

$$dq_3 + dq_2 - dq_5 = R_3 - q_{3o} - q_{2o} + q_{5o}$$

$$dq_4 + dq_5 = R_4 - q_{4o} - q_{5o}$$

$$K_1\, q_{1o}\, dq_1 + K_2\, q_{2o}\, dq_2 - K_3\, q_{3o}\, dq_3 = -\,(K_1 q_{1\,o}^2 + K_2 q_{2\,o}^2 - K_3 q_{3\,o}^2)/2$$

$$K_4\, q_{4o}\, dq_4 - K_5\, q_{5o}\, dq_5 - K_2\, q_{2o}\, dq_2 = -\,(K_4 q_{4\,o}^2 - K_5 q_{5\,o}^2 - K_2 q_{2\,o}^2)/2$$

Uzyskany układ równań liniowych można rozwiązać jedną ze standardowych procedur (na przykład metodą eliminacji *Gaussa*).

Wadą przedstawionej metody jest duża wymiarowość zadania, wynikająca z liczby zmiennych równej liczbie odcinków sieci wodociągowej. W rzeczywistych systemach zaopatrzenia w wodę liczba odcinków może wynosić kilka a nawet kilkanaście czy kilkadziesiąt tysięcy.

Istotną redukcję wymiarowości przedstawionego zadania można przeprowadzić, zakładając wartości natężeń *a'priori* nie w sposób dowolny, ale taki, aby spełnione były warunki równań wynikające z I prawa *Kirchhoffa*, czyli aby była zachowana równość przepływów w każdym punkcie systemu. Wówczas równania wynikające z I prawa *Kirchhoffa* można zapisać w postaci:

$$dq_1 - dq_4 - dq_2 = R_2 - q_{1o} + q_{4o} + q_{2o} = 0$$

$$dq_3 + dq_2 - dq_5 = R_3 - q_{3o} - q_{2o} + q_{5o} = 0$$

$$dq_4 + dq_5 = R_4 - q_{4o} - q_{5o} = 0$$

Z równań tych wynikają kolejne równania:

dla obwodu II: $dq_4 = -dq_5 = dQ_{II}$

dla obwodu I: $dq_1 = -dq_3 = dQ_I$

$dq_2 = dQ_I - dQ_{II}$.

przy czym poprawka na odcinku wspólnym dla obwodów jest różnicą poprawek natężeń przepływu dla obu obwodów.

Podstawiając uzyskane rezultaty do równań wynikających z II prawa *Kirchhoffa* otrzymujemy układ równań:

$$(K_1\, q_{1o} + K_2\, q_{2o} + K_3\, q_{3o})\, dQ_I - K_2\, q_{2o}\, dQ_{II} = -\,(K_1\, q_{1\,o}^2 + K_2\, q_{2\,o}^2 - K_3\, q_{3\,o}^2)/2$$

$$(K_4\, q_{4o} + K_5\, q_{5o} + K_2\, q_{2o})\, dQ_{II} - K_2\, q_{2o}\, dQ_{I.} = -\,(K_4\, q_{4\,o}^2 - K_5\, q_{5\,o}^2 - K_2\, q_{2\,o}^2)/2$$

W rezultacie redukuje się wymiar zadania z *l* (liczba odcinków, kilka do kilkudziesięciu tysięcy) do *o* (liczba obwodów, do kilkuset).

Kolejnym zabiegiem upraszczającym proces obliczania stanów hydraulicznych sieci wodociągowej jest zdekomponowanie struktury sieci do zbioru niezależnych obwodów. Tym sposobem z równań opisujących stan równowagi energii w każdym obwodzie wyeliminowane zostaną wyrazy odnoszące się do oddziaływań obwodów sprzężonych z danym obwodem. Równania dla przedstawionej na schemacie sieci zapiszemy w postaci:

$$(K_1\, q_{1o} + K_2\, q_{2o} + K_3\, q_{3o})\, dQ_{I.} = -\,(K_1\, q_{1\,o}^2 + K_2\, q_{2\,o}^2 - K_3\, q_{3\,o}^2)/2$$

$$(K_4\, q_{4o} + K_5\, q_{5o} + K_2\, q_{2o})\, dQ_{II} = -\,(K_4\, q_{4\,o}^2 - K_5\, q_{5\,o}^2 - K_2\, q_{2\,o}^2)/2$$

a ich rozwiązania w postaci wzorów:

$$dQ_I = -\frac{K_1 q_1^2 + K_1 q_2^2 - K_3 q_3^2}{2(K_1 q_1 + K_2 q_2 + K_3 q_3)}\ [\mathrm{m^3/s}]$$

$$dQ_{II} = -\frac{K_4 q_4^2 + K_5 q_5^2 - K_2 q_2^2}{2(K_4 q_4 + K_5 q_5 + K_2 q_2)}\ [\mathrm{m^3/s}]$$

W ogólności otrzymujemy uniwersalny wzór na poprawkę cyrkulującą w dowolnym obwodzie sieci o układzie zamkniętym:

$$dQ_j = -\frac{\sum_{i=1}^{r} K_i q_i^2}{\sum_{i=1}^{r} K_i q_i}\ [\mathrm{m^3/s}]$$

lub, po uwzględnieniu zależności $\Delta h = Kq^2$, w postaci

$$dQ_j = -\frac{\sum_{i=1}^{r} \Delta h_i}{\sum_{i=1}^{r} \frac{\Delta h_i}{q_i}}$$

gdzie:

Δh_i – spadek linii ciśnienia w odcinku sieci należącym do obwodu

q_i – natężenie przepływu w odcinku sieci

K_i – oporność hydrauliczna odcinka sieci

r – liczba odcinków w obwodzie j.

Wzory te znane są pod nazwą wzorów *Crossa- Łobaczewa.*

Algorytm wyznaczania stanu hydraulicznego sieci wodociągowej

Algorytm rozwiązywania zadania wyznaczania stanu hydraulicznego systemu zaopatrzenia w wodę z wykorzystaniem wzorów *Crossa-Łobaczewa* jest następujący:

1. Wyznaczyć na podstawie rozbiorów w węzłach sieci wstępne natężenia przepływów q_{oi} w odcinkach sieci tak, aby spełnione były równania ciągłości przepływu wynikające z I prawa *Kirchhoffa.*
2. Obliczyć oporności hydrauliczne K_i odcinków systemu.
3. Sprawdzić, czy dla każdego obwodu systemu spełniony jest warunek

$$\sum_{i=1}^{r} K_i \, q_i^2 \leq D_{dop}$$

   gdzie D_{dop} jest dopuszczalną odchyłką wyrównywania ciśnień w obwodzie sieci.
4. Jeżeli warunek 3 jest spełniony, zakończyć obliczenia.
5. Jeżeli warunek 3 nie jest spełniony, obliczyć poprawki dQ_j we wszystkich obwodach sieci.
6. Wyznaczyć skorygowane przepływy we wszystkich odcinkach sieci:

$$q'_i = q_i + dQ_j.$$

Rozwiązanie tego zadania wymaga przeprowadzenie analizy struktury sieci przy pomocy narzędzi i metod wywodzących się z teorii grafów.

Komputerowe modelowanie struktury sieci wodociągowej

Struktura sieci przedstawiana jest najczęściej w postaci schematu graficznego, na którym poszczególne elementy systemu są określone za pomocą umownych symboli rysunkowych. Jednak forma ta jest niewystarczająca do przeprowadzania analiz struktury systemu wymaganych przy formułowaniu i rozwiązywaniu zadań wyznaczania stanów hydraulicznych systemu. Jednym ze sposobów prezentowania struktury systemu w takich zadaniach jest zamodelowanie jej przy pomocy grafu rozumianego jako zbiór węzłów i łuków.

Łuki grafu odpowiadają takim elementom systemu, jak:

- odcinki przewodów wodociągowych
- opory miejscowe
- pompy wirowe
- zbiorniki.

Węzły grafu są punktami odwzorowującymi:

- początki i końce odcinków przewodów
- miejsca zmian średnicy lub współczynnika chropowatości rurociągu
- miejsca rozgałęzienia rurociągów

- punkty poboru wody
- punkty zasilania w wodę:
  - punkty podłączenia pompowni
  - punkty podłączenia zbiorników.

Do opisu struktury sieci wystarczające jest podanie:

1. listy węzłów w postaci ich unikalnych identyfikatorów
2. listy łuków w postaci ich identyfikatorów oraz identyfikatorów węzłów początku i końca łuku.

Podane w postaci tak przygotowanych list informacje o strukturze grafu umożliwiają określenie wzajemnych relacji topologicznych wszystkich elementów grafu.

Dzięki temu możliwe jest zidentyfikowanie najczęściej popełnianych błędów przy opisie struktury sieci wodociągowej, czyli:

- numerowanie dwóch różnych węzłów lub łuków tymi samymi identyfikatorami
- pominięcie na liście węzłów węzła, który wykorzystany jest do opisu łuku
- stwierdzenie niespójności grafu opisującego strukturę sieci.

Wyeliminowanie wymienionych błędów jest warunkiem poprawnego zamodelowania struktury systemu. W celu przeprowadzenia obliczeń hydraulicznych konieczne jest przeprowadzenie operacji na grafie systemu, których celem jest:

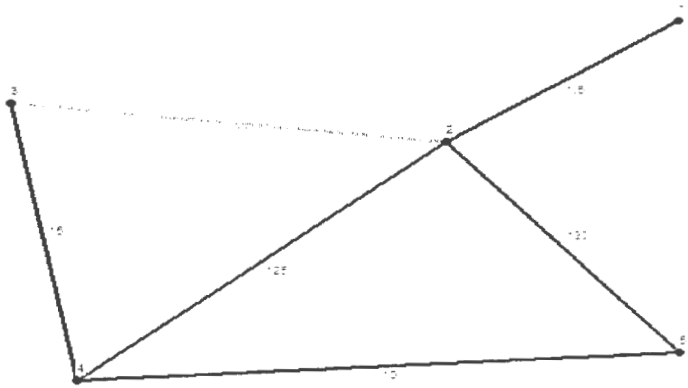
1. wyznaczenie minimalnego drzewa grafu
2. wyznaczenie kodrzewa grafu
3. wyznaczenie wszystkich niezależnych obwodów grafu.

Algorytm wyznaczenia minimalnego drzewa grafu i kodrzewa

Drzewem grafu nazywamy taki podgraf, który zawiera wszystkie węzły grafu oraz łączące je łuki w taki sposób, aby nie tworzyły obwodów. Dla grafu zbudowanego z w węzłów i l łuków drzewo będzie podgrafem o $(w - 1)$ łukach. Kodrzewem jest podgraf, który jest dopełnieniem drzewa grafu do grafu wyjściowego.

W celu wyznaczenia minimalnego drzewa grafu oraz kodrzewa należy (Pawlak, 2007):

1. Dla wszystkich łuków grafu obliczyć ich wagi, którymi są oporności odcinków sieci. Wagi łuków odwzorowujących pompy i zbiorniki są oznaczane minimalnymi wagami, aby zawsze były elementami drzewa grafu.
2. Dla wszystkich węzłów grafu zbudować listy łuków incydentnych.
3. Dla każdego węzła grafu wybrać łuk o najmniejszej wadze.
4. Jeżeli liczba wybranych łuków jest równa $(w - 1)$, zakończyć postępowanie.
5. Jeżeli liczba wybranych łuków jest mniejsza niż $(w - 1)$, należy dopełnić ją do $(w - 1)$ o łuki o najmniejszych wagach z listy pozostałych łuków.
6. Pozostałe $(l - w + 1)$ łuków grafu stanowi kodrzewo grafu zbudowane z łuków o największych wagach.



Rys. 17. Przykład drzewa minimalnego i kodrzewa grafu wyznaczonych według przedstawionego algorytmu (*źródło A. Pawlak*).

Na schemacie (rys. 17) przedstawiony jest graf zbudowany z 5 węzłów i 6 łuków. Drzewem minimalnym tego grafu jest podgraf zbudowany z 5 (w) węzłów i 4 ($w - 1$) łuków. Kolorem niebieskim oznaczone są 3 łuki grafu o najmniejszych wagach, które zostały wybrane w punkcie 3 algorytmu. Do skompletowania drzewa według punktu 5 algorytmu, spośród pozostałych łuków został wybrany łuk o najmniejszej wadze. Łukiem tym jest łuk oznaczony kolorem zielonym. Pozostałe 2 (l–w+1) łuki oznaczone kolorem czerwonym, o największych wagach, są kodrzewem przedstawionego na schemacie grafu (punkt 6 algorytmu).

Algorytm wyznaczenia niezależnych obwodów grafu

Liczba niezależnych obwodów grafu wynosi (l–w+1) i jest równa liczbie łuków kodrzewa. Algorytm wyznaczania niezależnych obwodów grafu pozwala zbudować obwody na bazie elementów kodrzewa. W celu wyznaczenia obwodów grafu należy (Barski, 2008; Pawlak, 2007):

1. Dla wszystkich węzłów grafu określić wagi, którymi będą liczby łuków incydentnych z danym węzłem.
2. Dla wszystkich węzłów grafu o wadze większej niż 1 zbudować listy łuków incydentnych pomijając łuki, których waga węzła przeciwstawnego jest równa 1 oraz łuki będące elementami kodrzewa.
3. Dla każdego łuku z kodrzewa zbudować obwód, przeglądając ścieżki grafu według następujących zasad:
   a. Dla początkowego węzła łuku należącego do kodrzewa wybrać pierwszy łuk z listy łuków incydentnych utworzonej w punkcie 2 algorytmu.

b. Sprawdzić, czy waga węzła przeciwległego jest wyższa niż 1.

c. Jeżeli tak, to:

i. Dopisać łuk do budowanego obwodu i zaznaczyć go jako wybrany.

ii. Sprawdzić czy węzeł końcowy wybranego łuku odpowiada węzłowi końcowemu łuku kodrzewa, dla którego budowany jest obwód.

x. Jeżeli tak, zakończyć budowę obwodu. Wybrać następny łuk należący do kodrzewa i przejść do punktu a.

xx. Jeżeli nie, to przejść dalej do punktu iii.

iii. Spośród łuków incydentnych z węzłem końcowym wybranego odcinka wybrać łuk jeszcze nieoznaczony jako wybrany. Przejść do punktu b.

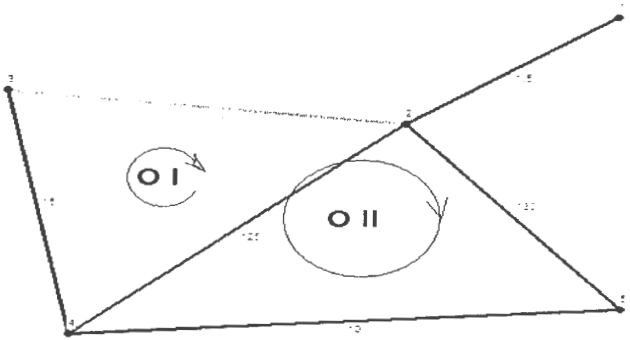
d. Jeżeli nie, to:

i. Zaznaczyć łuk jako 'ślepa ścieżka' (zablokować).

ii. Wrócić do węzła początkowego zablokowanego łuku.

iii. Spośród nieoznaczonych łuków incydentnych z tym węzłem wybrać kolejny i przejść do punktu c.ii.

iv. Jeżeli nie ma łuków nieoznaczonych, usunąć łuk dopisany do obwodu i przejść do punktu d.i.



Rys. 18. Przykład drzewa minimalnego i kodrzewa grafu wyznaczonych według przedstawionego algorytmu (*źródło A. Pawlak*).

Elementami kodrzewa stanowiącymi bazę do wyznaczania niezależnych obwodów według przedstawionego algorytmu są łuki oznaczone na czerwono o numerach węzłów 2-4 oraz 2-5.

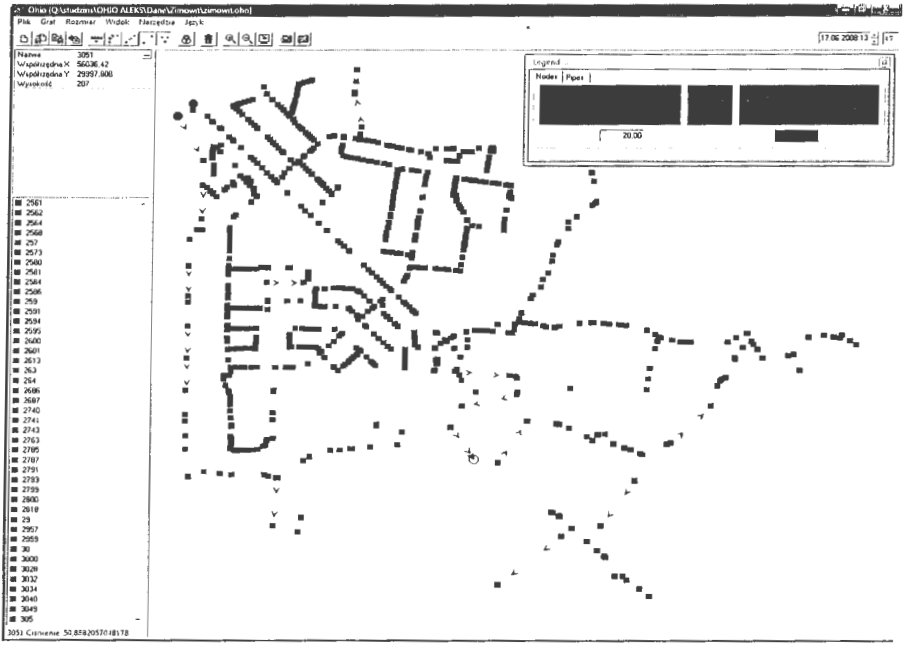
Obwód I zbudowany według zasad podanych w algorytmie składa się z łuków o numerach węzłów {2-4, 2-3, 3-4}. Obwód II zbudowany według tych samych zasad składa się z łuków o numerach węzłów {2-5, 2-3, 3-4, 4-5}.

Przedstawione algorytmy operacji na grafach oraz opisana metoda rozwiązywania układu równań, opisujące stan hydrauliczny sieci wodociągowej o dowolnej strukturze, zostały zastosowane w programie OHIO, będącym programem z rozbudowanym edytorem graficznym do obliczeń hydraulicznych systemu zaopatrzenia w wodę.

Graficzna prezentacja wyników obliczeń

Wyniki obliczeń programem OHIO mogą zostać zaprezentowane w obszarze grafu oraz na liście obiektów. Dla każdej godziny analizowanego horyzontu czasowego możliwe jest wyświetlenie:

- Stanu ciśnień we wszystkich węzłach sieci.
- Kierunków i prędkości przepływów na wszystkich odcinkach sieci.



Rys. 19. Ekran programu OHIO z sygnalizacją stanu ciśnień w węzłach sieci.

Stan ciśnień w węzłach sieci sygnalizowany jest przez wyświetlenie w obszarze grafu symboli ciśnień w postaci kolorowych kwadratów oraz podświetlenie w tych samych kolorach węzłów na liście obiektów. Przyjęto, że kolor:

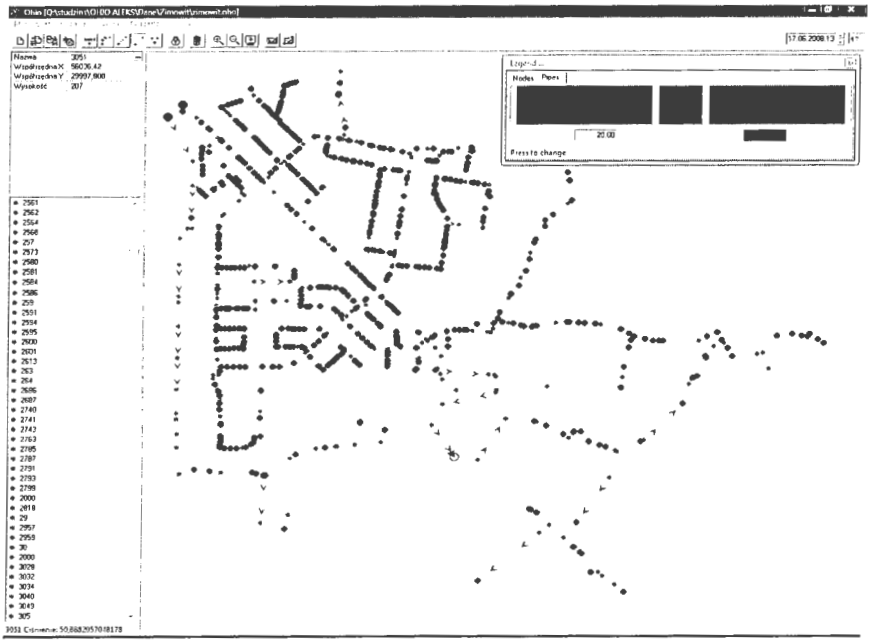
niebieski – wskazuje wartości ciśnienia dyspozycyjnego w zakresie do 20 m

zielony – wskazuje wartości ciśnienia dyspozycyjnego w zakresie do 50 m.

czerwony – wskazuje wartości ciśnienia w zakresie do 70 m.

Podobne zasady dotyczą informacji o prędkościach i kierunkach przepływu, które są sygnalizowane w postaci kolorowych strzałek wyświetlanych na wszystkich odcinkach sieci (przewody, przewody z oporami miejscowymi, pompownie) dla każdej godziny analizowanego horyzontu czasowego. Strzałki nie są wyświetlane na odcinkach, na których w danej godzinie przepływ nie występuje. Poszczególne kolory, od niebieskiego, poprzez zielony do czerwonego, informują o prędkościach od 20 cm/sek do 70 cm/sek.

Tak w przypadku sygnalizacji ciśnień, jak i prędkości, zarówno kolory, jak i odpowiadające im przedziały wartości, można dowolnie zmieniać.



Rys. 20. Ekran programu OHIO z sygnalizacją stanu przepływów w odcinkach sieci.

6. Algorytmy optymalizacji i sterowania

Kolejny przykład wykorzystania danych pomiarowych z systemu monitoringu a także modelu hydraulicznego, to *optymalizacja sieci wodociągowej*. Metody optymalizacji są wykorzystywane do prac projektowych związanych z rekonstrukcją i rozbudową sieci wodociągowych oraz do sterowania pracą sieci. Stosuje się wówczas metody optymalizacji statycznej. Istnieją dwa podstawowe zadania optymalizacji: projektowanie i sterowanie siecią, oraz dwa podstawowe zadania projektowania: rekonstrukcja i rozbudowa sieci wodociągowej.

Projektowanie sieci wodociągowej oznacza taki dobór jej parametrów technicznych względnie struktury, aby były spełnione określone wymagania techniczne, technologiczne i ekonomiczne związane z eksploatacją sieci. 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.

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 należy 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.

Jednak istnieją istotne różnice w jakości otrzymywanych rozwiązań w zależności od tego, czy stosuje się w obliczeniach metody optymalizacji jednokryterialnej czy wielokryterialnej.

Optymalizacja jednokryterialna ma następujące własności:

- ocena wyników obliczeń odbywa się na podstawie jednego kryterium jakości (celu)
- pojedyncze kryterium jakości ma 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 celu
- kryteria celu mogą mieć charakter kosztowe, techniczny i technologiczny.

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

Porównanie obu metod optymalizacji pokazuje, że w przypadku optymalizacji jednokryterialnej uzyskuje się bardzo ograniczony zakres podejmowanych decyzji.

Poniżej pokazano rzeczywisty przykład optymalizacji wielokryterialnej, dotyczący optymalizacji sieci wodociągowej w Königs-Wusterhausen w Niemczech za pomocą programu REH (Rechnerunterstuetzte EntscheidungHilfe) opracowanego przez Reinharda Straubela. 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.

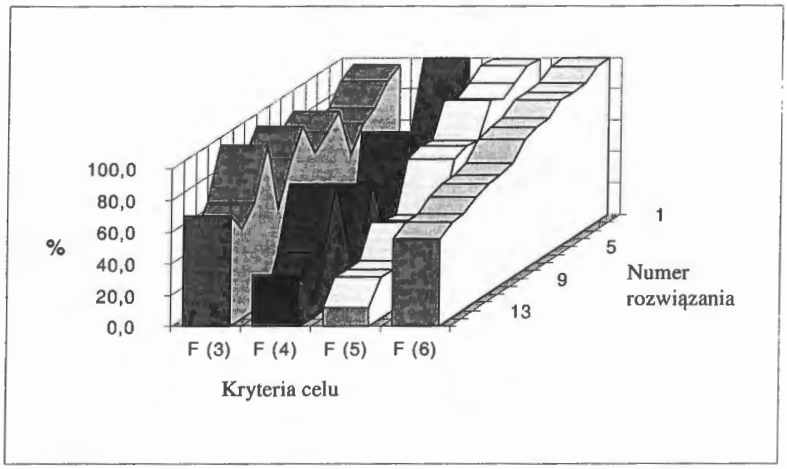
Projektując sieć wodociągową uwzględnia się w omawianym przykładzie następujące możliwe działania:

- 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. Ustalono następujące kryteria:

- F(1) (min): maksymalna różnica między zadanym 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 szybkość przepływu wody w przewodach
- F(5) (min): łączne koszty inwestycyjne
- F(6) (min): cena 1 m^3 wody

Wyniki optymalizacji są pokazane na rys. 21.



Rys. 21. Wyniki obliczeń optymalizacji wielokryterialnej (*źródło R. Straubel*).

Zbiór otrzymanych rozwiązań Pareto-optymalnych 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.

W programie obliczeń hydraulicznych OHIO opracowanym w IBS PAN stosuje się algorytm optymalizacji sieci wodociągowej, jednak tylko optymalizacji jednokryterialnej z technicznym kryterium jakości. Program OHIO pozwala na przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych systemu zaopatrzenia w wodę w zakresie optymalizacji parametrów systemu, która obejmuje zmniejszenie oporności hydraulicznej przewodów sieci poprzez ich wymianę lub renowację.

Scenariusz wyznaczania przewodów do renowacji lub wymiany obejmuje:

1. Obliczenie hydrauliczne sieci w godzinie maksymalnego godzinowego zapotrzebowania na wodę.
2. Wyznaczenie miarodajnego punktu w sieci wodociągowej, czyli takiego, w którym występuje maksymalny niedobór wymaganego ciśnienia.
3. Wyznaczenie wszystkich dróg między źródłami zasilania (pompownie, zbiorniki), a punktem miarodajnym.
4. Zbudowanie tabeli wag przewodów wodociągowych jako iloczynu spadku ciśnienia i liczby ścieżek przechodzących przez ten przewód.
5. Wybór przewodu z największą wagą, a przy równych wagach, o większym oporze.
6. Zasymulowanie renowacji przewodu, czyli redukcja chropowatości przewodu.
7. Powtórzenie scenariusza od 1 do 6 po zmianie chropowatości przewodu.

W przypadku ponownego wybrania w punkcie 5 tego samego przewodu do renowacji należy zmienić przewód na przewód o większej średnicy i przejść do punktu 1.

8. Przebieg obliczeń optymalizacyjnych jest zakończony po zniwelowaniu niedoboru ciśnienia w miarodajnym punkcie sieci, lub po wybraniu 5 przewodów do renowacji lub wymiany.

Zadanie *sterowania siecią wodociągową* polega na opracowaniu takiego scenariusza pracy pomp oraz napełniania i opróżniania zbiorników wyrównawczych, aby zapewnić zadane zmienne rozbiory wody w węzłach końcowych przy minimalnych kosztach eksploatacyjnych i prawidłowych parametrach pracy sieci.

Zadanie to można rozwiązać również przy użyciu metody optymalizacji wielokryterialnej. Jego rozwiązanie wymaga znajomości rozkładów godzinowych rozbiorów wody w węzłach końcowych sieci w okresie 1 doby oraz sformułowania odpowiednich kryteriów jakości do optymalizacji. Kryteria te mogą być na przykład następujące:

- Kryterium 1 (min): maksymalna różnica między zadanym i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych
- Kryterium 2 (min): suma dobowego zużycia energii przez pompy
- Kryterium 3 (min): maksymalna liczba włączeń/wyłączeń pompy
- Kryterium 4 (min): maksymalne ciśnienie pompowania ustalone dla pompy
- Kryterium 5 (max): minimalna szybkość przepływu wody w przewodach
- Kryterium 6 (max) łączna wymiana wody w zbiornikach sieci.

W wyniku obliczeń otrzymuje się zbiór scenariuszy pracy pomp i napełniania oraz opróżniania zbiorników, z których operator sieci wybierze najlepszy do realizacji, kierując się przy tym własnymi już arbitralnymi preferencjami.

Jednocześnie jednak można generować scenariusze sterowania siecią wodociągową korzystając z algorytmu optymalizacji jednokryterialnej zaimplementowanego w programie OHIO. Algorytm ten korzysta jedynie z następującego pojedynczego kryterium technicznego:

- Kryterium (min): maksymalna różnica między zadanym i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych

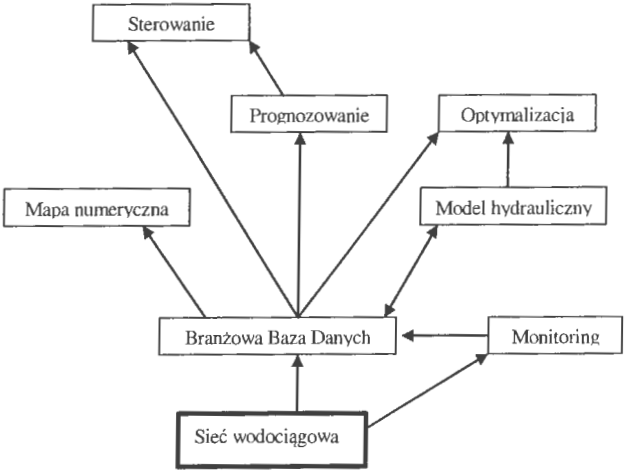
i tak dobiera ciśnienia w przepompowniach oraz zasilanie sieci przez pompownie źródłowe, aby uzyskać zadane ciśnienia i rozbiory w węzłach odbiorczych sieci.

Praktyka postępowania jest taka, że po skalibrowaniu modelu danej sieci wodociągowej najpierw dokonuje się jej optymalizacji a dopiero potem wykonuje się obliczenia sterowania, generując różne scenariusze pracy pomp w zależności od przyjętych charakterystyk obciążenia sieci.

7. Systemy wspomagania decyzji dla sieci wodociągowych

Zarządzanie miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym odbywa się zasadniczo na trzech poziomach, na których zadania są wykonywane z różnym horyzontem czasowym. Na najniższym poziomie odbywa się zarządzanie operacyjne względnie eksploatacyjne danym obiektem, czyli w przypadku sieci wodociągowej takie sterowanie tymi sieciami, aby użytkownicy sieci mieli dostarczoną wodę odpowiedniej jakości, w odpowiednich ilościach i pod odpowiednim ciśnieniem. Te działania odbywają się w sposób ciągły, w trybie *on-line*, a

operatorzy sieci reagują natychmiast na wszelkie zakłócenia i zmiany w pracy obiektów. Te działania mogą polegać na włączeniu lub wyłączeniu pompy, otwarciu lub zamknięciu zasuwy, usuwaniu awarii na sieci itp.

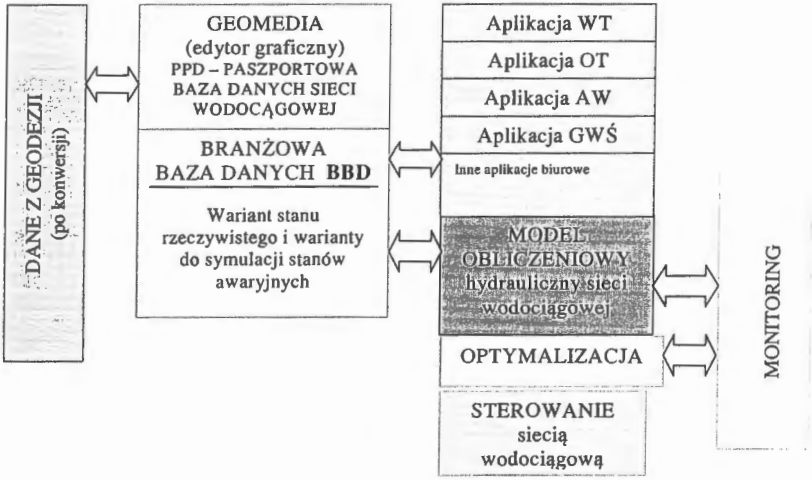


Rys. 21. Koncepcja systemu wspomagania decyzji dla sieci wodociągowej.

Na wyższym poziomie realizuje się zadania o charakterze taktycznym, wykonywane w trybie *off-line*, a więc nie natychmiast i planowane z dłuższym horyzontem czasowym. Są to takie zadania, jak wykonywanie pomiarów geodezyjnych, planowanie i wykonywanie przyłączy do sieci wodociągowej lub kanalizacyjnej, odbiory techniczne, wykonywanie remontów i przeglądów sieci itp.

Na najwyższym poziomie są wykonywane zadania o charakterze strategicznym, związane głównie z planowaniem prac modernizacyjnych, remontowych i inwestycyjnych. Są one również wykonywane w trybie *off-line* z najdłuższym horyzontem czasowym, a w ich realizację jest zaangażowane kierownictwo przedsiębiorstwa, podczas gdy zadania z niższych poziomów są realizowane zasadniczo przez personel techniczno-administracyjny i kadrę inżynieryjno-techniczną średniego szczebla.

Dla realizacji zarządzania przy wspomaganiu komputerowym opracowano koncepcję systemu informatycznego pokazaną na rys. 21, natomiast realizacja tej koncepcji wdrożona w Rzeszowie jest pokazana na rys. 22. System składa się z modułów funkcjonalnych technicznych i administracyjnych, przy czym jego głównymi elementami wykonującymi zadania techniczne jest mapa numeryczna z branżową bazą danych (program GEOMEDIA), system monitoringu i model obliczeniowy z algorytmami optymalizacji i sterowania, natomiast główne elementy z zadaniami administracyjnymi, to aplikacje branżowe WT (wydawanie warunków technicznych dla prac remontowych i rozwojowych sieci wodociągowej i kanalizacyjnej), OT (odbiory techniczne wykonanych prac), AW (rejestracja i statystyka awarii na sieci wodociągowej i kanalizacyjnej) oraz GWŚ (gospodarka wodno-ściekowa, czyli prowadzenie rejestracji sprzedanej wody i pozyskanych ścieków).



Rys. 22. Pierwotna realizacja systemu informatycznego do zarządzania siecią wodociągową.

Zaproponowany system informatyczny integrujący funkcje techniczne i administracyjne został wdrożony w wodociągach rzeszowskich jako wstępna wersja systemu, który w przyszłości ma objąć również pozostałe obiekty miejskiego systemu wodno-ściekowego, czyli stacje ujęcia i uzdatniania wody, sieć kanalizacyjną oraz oczyszczalnię ścieków. W pokazanym systemie informatycznym podstawowe źródła informacji o obiektach, to branżowa baza danych zintegrowana z mapą numeryczną oraz system monitoringu sieci wodociągowo-kanalizacyjnej. Zarządzanie przedsiębiorstwem wodociągowym opiera się na wykorzystaniu danych pomiarowych i obliczeniowych zgromadzonych i aktualizowanych w tych modułach.

System monitoringu sieci wodociągowej może oczywiście funkcjonować w przedsiębiorstwie wodociągowym jako system autonomiczny i jeżeli będzie odpowiednio dokładny, to jest w stanie realizować samodzielnie szereg zadań znacznie usprawniających zarządzanie siecią. Jednak rozwiązaniem znacznie korzystniejszym jest wdrożenie w przedsiębiorstwie kompleksowego systemu wspomagania decyzji, w którym monitoring byłby jedynie jednym z jego elementów. Z przeprowadzonych rozważań wynika już, że aby system monitoringu mógł być właściwie wykorzystany, powinien on współpracować z modelem hydraulicznym sieci wodociągowej. Dodając jako kolejny element mapę numeryczną sieci wodociągowej oraz modele prognozowania obciążenia sieci a także algorytmy optymalizacji i sterowania siecią otrzymujemy strukturę takiego kompleksowego systemu wspomagania decyzji, będącego użytecznym narzędziem zarządzania siecią wodociągową.

Takich systemów nie ma jeszcze w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych, jednak wydaje się, że w tym właśnie kierunku powinien iść rozwój informatyzacji tych przedsiębiorstw.

System monitoringu i model hydrauliczny sieci wodociągowej mogą być, jak pokazano powyżej, stosowane do symulacji pracy sieci, do jej optymalizacji i sterowania a także, wykorzystując obliczenia symulacyjne, do projektowania sieci przy jej modernizacji lub rozbudowie. Dodatkowy zakres zastosowań pomiarów z monitoringu i modelu hydraulicznego jest jednak szerszy. Takie inne zastosowanie, to na przykład obliczanie i wizualizacja rozkładów ciśnień i przepływów w sieci, co było już również wcześniej pokazane. Poniżej wyjaśnimy dokładniej celowość takiej wizualizacji i również podstawowe własności zastosowanej do tego celu aproksymacji krigingowej.

Podczas eksploatacji sieci wodociągowej ważną informacją dla operatora sieci jest znajomość bieżącego stanu obiektu, tzn. znajomość przepływów i ciśnień w przewodach i węzłach sieci. Informacje te może on uzyskać z wyników symulacji modelu hydraulicznego, jednak ogromna liczba danych, jaka jest uzyskiwana w wyniku symulacji, praktycznie uniemożliwia szybką orientację odnośnie ciśnienia i przepływu w konkretnym węźle i odcinku sieci. Konkretnie chodzi o to, aby szybko zorientować się, czy w jakimś obszarze sieci ciśnienia i prędkości nie są za małe lub za duże. Te pierwsze grożą skargami użytkowników sieci, te drugie grożą wystąpieniem awarii.

Dlatego wydaje się celowym, aby operator miał możliwość szybkiej i wstępnie jakościowej orientacji o stanie sieci. W przypadku stwierdzenia jakichś nieprawidłowości w jej funkcjonowaniu, może on w dalszej kolejności zająć się bardziej szczegółową i już ilościową analizą danych dostarczonych przez model hydrauliczny. Aby stworzyć operatorowi sieci wodociągowej narzędzie szybkiej oceny poprawności rozkładów ciśnień i przepływów opracowano program ich obliczania i wizualizacji za pomocą algorytmów krigingowych.

Aproksymacja krigingowa oznacza aproksymację nieznanych wartości badanej zmiennej w wybranych punktach badanego obszaru (punkty obliczeniowe) na podstawie znanych wartości tej zmiennej zmierzonych w innych punktach tego obszaru (punkty pomiarowe). Nieznana wartość zmiennej w punkcie obliczeniowym x_o jest szacowana na podstawie wzoru

$$z(x_o) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i z(x_i)$$

gdzie $z(x_i)$ oznacza wartości zmiennej zmierzone w N punktach pomiarowych a λ_i oznacza odpowiednie współczynniki wagowe. Funkcją służącą do obliczania współczynników wagowych jest tzw. wariogram

$$D^2[Z(x+h) - Z(x)] = E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2\,\gamma(h)$$

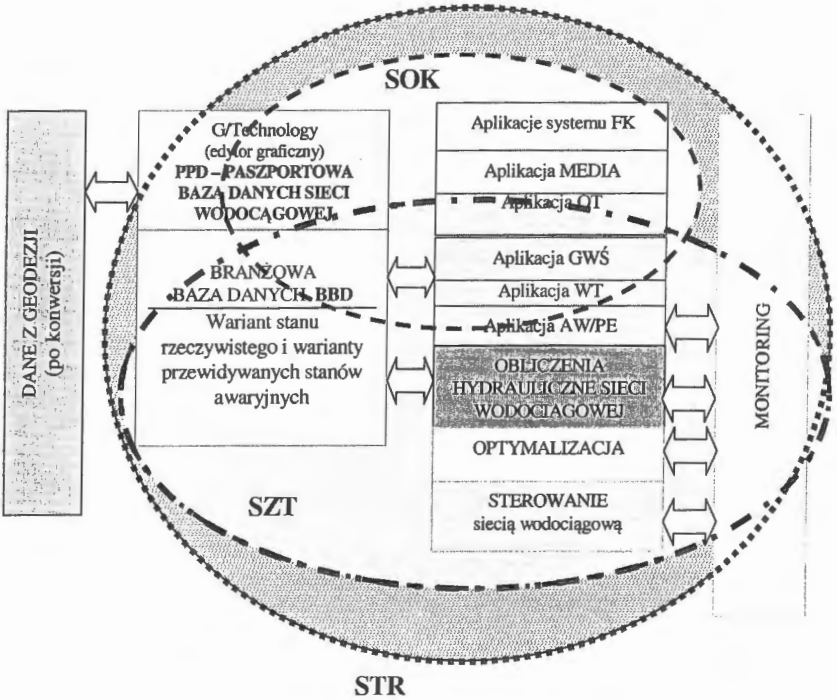
gdzie: $Z(x)$ – badana zmienna, D, E – wariancja i wartość średnia zmiennej $Z(x)$, $2\,\gamma(h)$ – wariogram, $\gamma(h)$ – semiwariogram, $Z(x)$, $Z(x+h)$ – wartości zmiennej w punktach obszaru $[x, x+h]$ dla $h \in [0,+\infty]$.

Podstawą algorytmu aproksymacji krigingowej jest modelowanie semiwariogramu względnie wariogramu na podstawie danych otrzymanych z monitoringu punktów pomiarowych (Bogdan, 2007).

Stosując aproksymację krigingową opracowano w Instytucie Badań Systemowych PAN program KRIPOW, w którym zaimplementowano osiem różnych funkcji analitycznych do modelowania semiwariogramu doświadczalnego, w tym funkcję wykładniczą, potęgową, Gaussa, kwadratową, falową, sferyczną i także liniową.

Nieznane współczynniki w tych funkcjach wyznacza się za pomocą metody regresji nieliniowej z algorytmem optymalizacji gradientowej Marquardta. Program obliczeniowy pochodzi z biblioteki programów IDOL (Identyfikacja Dynamicznych Obiektów Liniowych), opracowanej również w Instytucie Badań Systemowych PAN.

Na rysunkach 10,11, i 12 pokazano przykład modelowanej sieci wodociągowej i wyznaczone mapy warstwicowe rozkładów ciśnień i przepływów. Na podstawie tych map operator może bardzo szybko ocenić w sposób jakościowy stan pracy eksploatowanej sieci.



Rys. 23. Schemat rozbudowanego systemu informatycznego zarządzania przedsiębiorstwem wodociągowym.

System wspomagania decyzji z rys. 22 jest systemem otwartym, co oznacza, że może być stopniowo rozbudowywany o dodatkowe programy rozszerzające jego funkcjonalność. Taki rozbudowany system jest pokazany na rys. 23.

Umożliwia on ma przykład komputerowo wspomaganą obsługę klientów przedsiębiorstwa wodociągowego (system SOK = System Obsługi Klienta). Dotychczas sposób współpracy poszczególnych działów z klientem był wyizolowany i prawie niezależny od innych działów. Po wdrożeniu rozbudowanego systemu informatycznego poszczególni jego użytkownicy

(działy przedsiębiorstwa) widzą, na jakim etapie współpracy jest klient i czy „przeszedł" on prawidłowo do następnego etapu współpracy.

System informatyczny zapewnia ponadto wspomaganie funkcjonowania przedsiębiorstwa wodociągowego od strony administracyjno-technicznej, tzn. jest w stanie wspierać w przedsiębiorstwie pracę jego działów: TT, TS, TK, POŚ, EZ, gdzie: TT – Dział Techniczny; TS – Dział Sieci, POŚ – Dział Ochrony Środowiska, EZ – Dział Zbytu; TK – Dział Obsługi Komputerowej, poprzez udostępnianie omówionych wcześniej modułów systemu: WT, OT, AW, GWŚ, PE.

Wdrożenie wymienionych modułów i odpowiednie ich powiązanie z systemem monitoringu, modułami obliczeń hydraulicznych i optymalizacyjnych aż po sterowanie obiektami sieci wodociągowej, pozwala zdefiniować i użytkować przedstawione na rys. 23 tzw. profile funkcyjne systemu informatycznego wspomagania decyzji:

Oznaczenia i funkcje profili funkcyjnych przedstawionych na schemacie są następujące:

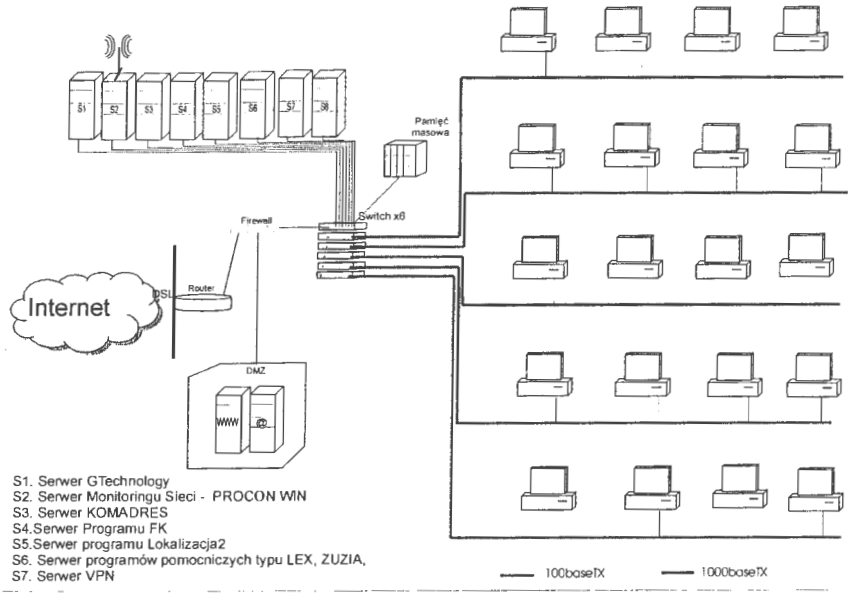
1. SYSTEM ZARZĄDZANIA TECHNICZNEGO (ZT) – uwzględnia w swej strukturze moduły funkcyjne AW i PE, system monitoringu, program obliczeń hydraulicznych oraz programy optymalizacji i sterowania – ma zapewnić sprawną eksploatację sieci istniejącej oraz profesjonalne planowanie rozbudowy i modernizacji sieci;
2. SYSTEM OBSŁUGI KLIENTA (SOK) – uwzględnia moduły funkcyjne WT, OT, MEDIA oraz analizy ilościowe i jakościowe realizowane przez program GEOMEDIA – ma poprzez szybki dostęp do informacji o kliencie i obiektach sieci związanych z klientem zapewnić sprawną obsługę klienta od etapu złożenia warunków technicznych, poprzez etapy projektu, uzgodnień, budowy, odbioru technicznego, aż do etapu zawarcia umowy, a także zapewnić systematyczne prowadzenie odczytów wodomierza, wystawianie faktur, kontrolę płatności itp.;
3. SYSTEM ELIMINOWANIA STRAT (STR) – rozumiany jako narzędzie dostępu do różnych informacji o systemie produkcji, dystrybucji i sprzedaży wody z możliwością wykonywania przestrzennych analiz porównawczych danych z Systemu Obsługi Klienta oraz danych gromadzonych przez System Zarządzania Technicznego; pozwala stworzyć i uruchomić procedury zmierzające do eliminowania strat wody.

Celem obecnie prowadzonych w przedsiębiorstwie wodociągowym prac badawczo-rozwojowych jest, aby poprzez wdrożenie wymienionych profili funkcyjnych – systemów ZT, SOK, STR:

a. zwiększyć poziom świadczenia usług dla klientów: poprzez szybki dostęp do pełnej informacji o sieci wodociągowo-kanalizacyjnej (materiał, średnica, rok budowy, inwestor itp.); poprzez trafniejsze planowanie i projektowanie dalszych dróg rozbudowy i modernizacji sieci (wykorzystując model obliczeniowy, system monitoringu i procedury optymalizacji);
b. usprawnić proces bieżącej eksploatacji sieci wodociągowej poprzez natychmiastową informację o stanie pracy najważniejszych obiektów sieci wodociągowej uzyskiwaną z systemu monitoringu oraz poprzez komputerową ewidencję awarii i prac planowych na sieci wodociągowej, wspomagając procesy planowania remontów i modernizacji sieci w przyszłości;
c. uaktywnić procedury zmierzające do ograniczenia strat wody.

Wprowadzanie złożonego systemu informatycznego w przedsiębiorstwie pociąga za sobą konieczność wprowadzenia w nim pewnych zmian organizacyjnych (Karczmarska,

Studziński. 2008). System działa w sieci komputerowej przedsiębiorstwa, która w miarę instalacji kolejnych programów musi ulegać rozszerzeniu. W chwili obecnej w sieci komputerowej w MPWiK w Rzeszowie pracuje 8 serwerów z bazami danych różnych programów, składających się na tworzony system informatyczny (Posiak, 2008).



Rys. 24. Sieć komputerowa sieci wodociągowej w Rzeszowie.

Jednocześnie system wymusza tworzenie nowych stanowisk pracy w różnych działach przedsiębiorstwa, do obsługi różnych modułów systemu: mapy numerycznej do wizualizacji sieci i wykonywania analiz, monitoringu do obserwacji aktualnego stanu sieci, modeli hydraulicznych i programów optymalizacji do sterowania siecią oraz planowania i wykonywania prac projektowych. W ten sposób pełni on rolę integrującą w przedsiębiorstwie, ponieważ pracownicy różnych działów pracujący w ramach jednego systemu są zmuszeni ze sobą współpracować.

Problemy z realizacją systemu informatycznego

Przedstawiony system informatyczny do zarządzania miejską siecią wodociągową jest wdrażany w wodociągach rzeszowskich. Proces jego tworzenia i implementacji różni się, niestety, od modelowych procedur postępowania, zalecanych w literaturze do projektowania systemów informatycznych wspomagania decyzji (Rojek, 2007). Problemy występujące podczas takiej pracy są zasadniczo trzech rodzajów: organizacyjne, merytoryczne i finansowe.

Problemy organizacyjne są związane z kompletowaniem zespołów wykonawczych, tak po stronie realizatora, którym w omawianym przypadku jest placówka naukowa – IBS PAN, jak i po stronie beneficjenta, czyli MPWiK w Rzeszowie, oraz z zapewnieniem dobrej współpracy obu zespołów. Nie jest to takie proste, ponieważ zespól badawczy jest interdyscyplinarny, złożony ze specjalistów różnych dziedzin: matematyków, automatyków, programistów, informatyków i technologów, którzy operują na ogół różnymi specjalistycznymi językami, natomiast zespół branżowy jest złożony z inżynierów praktyków, mających często niechętny, bo pragmatyczny stosunek do teoretycznych wypowiedzi akademickich. Stworzenie takich zespołów a następnie zapewnienie przez dłuższy okres czasu poprawnej kooperacji między nimi jest trudnością, która często uniemożliwia realizację projektu.

Problemy merytoryczne polegają na pojawianiu się w trakcie realizacji prac badawczych nowych zagadnień, których wcześniej nie przewidziano a które muszą być rozwiązane, aby prace zakończyły się sukcesem. W przypadku omawianego systemu informatycznego sytuacje takie występowały praktycznie na każdym etapie badań, rozszerzając każdorazowo zakres prac i zwiększając także ponoszone koszty. Tworzony system informatyczny składa się z trzech podstawowych modułów: systemu mapy numerycznej z Branżową Bazą Danych, systemu monitoringu oraz modeli hydraulicznych z algorytmami optymalizacji.

Pierwsze problemy pojawiły się już przy opracowywaniu mapy numerycznej, gdy okazało się, że dane dostarczane z Działu Geodezji Urzędu Miasta, na których podstawie tworzy się graf geodezyjny sieci wodociągowej, są niepełne i nie pozwalają na wykonywanie obliczeń hydraulicznych. Aby z grafu geodezyjnego utworzyć graf hydrauliczny, umożliwiający takie obliczenia, należało opracować procedury zapewniające ciągłość grafu i generujące węzły sieci. Kolejny problem związany ze sprzęgnięciem mapy numerycznej z modelem hydraulicznym powstał, gdy stwierdzono, że dane geodezyjne dotyczące sieci nie umożliwiają na określenie współrzędnej wysokościowej wygenerowanych punktów węzłowych. Należało opracować kolejną procedurę do aproksymacji wysokości węzłów sieci na podstawie współrzędnych wysokościowych miejskich punktów geodezyjnych, którymi dysponował Urząd Miejski. Zastosowano przy tym, dla celów porównawczych, dwa algorytmy: aproksymacji krigingowej oraz aproksymacji geometrycznej, pokrywając trójkątami przestrzeń wyznaczoną punktami geodezyjnymi.

Problemy związane z systemem monitoringu dotyczyły przede wszystkim liczby i lokalizacji punktów pomiarowych na sieci wodociągowej oraz wyboru sposobu transmisji danych z punktów pomiarowych do programu wizualizacji i archiwizacji. Liczba punktów pomiarowych, ze względu na koszty ich montowania, powinna być możliwie mała i jednocześnie ilość przekazywanych przez nie informacji o sieci powinna być możliwie duża. Z kolei transmisja danych może odbywać drogą radiową, telefonii komórkowej lub kablową i zasadniczo nie ma wiarygodnych analiz porównawczych, które by wykazywały jednoznacznie wyższość któregoś z tych systemów. Dlatego w Rzeszowie budowę systemu monitoringu na sieci wodociągowej rozpoczęto początkowo od jednej pilotowej dzielnicy i kilku punktów pomiarowych i stopniowo rozbudowując system osiągnięto obecnie poziom 30 punktów pomiarowych rozmieszczonych na całej sieci, przy czym przede wszystkim zlokalizowane są one w przepompowniach strefowych, w punktach źródłowych i na końcówkach sieci. Odnośnie systemów transmisji danych, działają obecnie w Rzeszowie, również dla celów porównawczych, równolegle trzy systemy: telemetryczny (kablowy), komórkowy (GPRS) i radiomodemowy.

Problemy związane z modelami hydraulicznymi dotyczyły zasadniczo czterech zagadnień: wyboru właściwej kombinacji pierścieni sieci wodociągowej do konstruowania układu równań algebraicznych opisujących sieć, wyboru metody rozwiązywania tego układu równań,

stopnia szczegółowości generowanych przez mapę numeryczną grafów hydraulicznych oraz wyboru metody optymalizacji do kalibracji, projektowania i sterowania siecią wodociągową. W przypadku pierścieniowej sieci wodociągowej liczba możliwych kombinacji pierścieni rośnie silnie nieliniowo wraz z liczbą tych pierścieni a ponieważ algorytmy obliczeniowe są przybliżone, więc ostatecznie sformułowana postać układu równań ma istotne znaczenie na wyniki obliczeń. W utworzonym w IBS PAN modelu OHIO przyjęto ostatecznie przy wyborze kombinacji pierścieni zasadę, aby łączna długość rur w wybranej kombinacji pierścieni była minimalna.

Odnośnie możliwych do zastosowania metod rozwiązywania układów nieliniowych równań algebraicznych są dwie możliwości: stosowanie algorytmów specjalizowanych, uwzględniających występowanie równań liniowych i nieliniowych w układzie równań modelu i rozwiązujących je w sposób rekurencyjny, oraz stosowanie algorytmów traktujących układ równań modelu jako jedną całość i rozwiązujących go iteracyjnie. W omawianym przypadku, dla celów porównawczych, zastosowano oba podejścia: w modelu OHIO do rozwiązywania równań modelu stosuje się specjalizowany algorytm rekurencyjny *Crossa*, natomiast w opracowanym także w IBS PAN drugim programie modelowania hydraulicznego sieci wodociągowej MOSUW stosuje się klasyczny algorytm iteracyjny *Newtona-Raphsona*.

Kwestia konieczności różnicowania szczegółowości grafów hydraulicznych generowanych przez system mapy numerycznej do modelu hydraulicznego wyniknęła w momencie, gdy generowane grafy obejmowały coraz większy obszar sieci i stawały się coraz bardziej szczegółowe. Gdy grafy sieci były ograniczone na przykład do jednej dzielnicy miasta, mogły wtedy bez szkody dla obliczeń zawierać całą strukturę wodociągową, tzn. wszystkie występujące w niej rury nawet o najmniejszych średnicach i wszystkie przyłącza, stanowiące wówczas węzłowe punkty rozbioru. Natomiast w miarę rozszerzania się obszaru sieci objętej obliczeniami i związanego z tym wzrostu liczby równań modelu, czas obliczeń coraz bardziej się wydłużał aż do przypadków zawieszania się programu. W rezultacie wprowadzono do obliczeń hydraulicznych dwie modyfikacje: Pierwsza polega na możliwości zastępowania rozbiorów węzłowych rozbiorami odcinkowymi, przy czym rozbiór odcinkowy oznacza zsumowane rozbiory węzłowe, traktowane w obliczeniach jako łączne obciążenie rury, której są przyporządkowane. Takie postępowanie znacznie zmniejsza liczbę równań modelu, ponieważ eliminuje liczne węzły odbiorcze i łączące je odcinki sieci, zastępując je jednym przewodem i jednym rozbiorem odcinkowym. Druga modyfikacja polega na możliwości generowania przez mapę numeryczną trzech rodzajów grafów hydraulicznych: maksymalnego, minimalnego i mieszanego. *Graf maksymalny* obejmuje wszystkie rury i przyłącza sieci traktowane jako węzły odbiorcze i może być używany albo do wizualizacji sieci wodociągowej albo do obliczeń hydraulicznych w przypadku małych fragmentów sieci. *Graf minimalny* obejmuje wszystkie rury o średnicach większych od zadanej, a więc w praktyce przewody magistralne, i operuje głównie rozbiorami odcinkowymi, i może być użyty do obliczeń hydraulicznych całej sieci wodociągowej, chociaż te obliczenia mają wówczas charakter bardzo ogólny i poglądowy. *Graf mieszany* obejmuje wszystkie rury i przyłącza sieci traktowane jako węzły odbiorcze w przypadku wybranego ograniczonego fragmentu sieci oraz przewody magistralne i rozbiory odcinkowe dla pozostałej części sieci i może być używany do projektowania i optymalizacji sieci wodociągowej w tym fragmencie.

Metody optymalizacji stosowane w zarządzaniu sieciami wodociągowymi mogą być, jak już wspominano wcześniej, dwóch rodzajów: jednokryterialne i wielokryterialne. Optymalizacja jednokryterialna jest stosunkowo prosta, w jej wyniku otrzymuje się jednoznaczne rozwiązanie, jednak stosowanie pojedynczej funkcji celu czy nawet sumy kilku funkcji z wagami bardzo ogranicza zakres badań. Z kolei optymalizacja wielokryterialna jest trudniejsza od strony obliczeniowej i zwykle bardzo czasochłonna, dając w rezultacie nie

jedno rozwiązanie a zbiór rozwiązań quasi-optymalnych, z których należy dopiero wybrać rozwiązanie najbardziej korzystne. Ogromną jej zaletą jest natomiast możliwość badania sieci wodociągowej z uwzględnieniem bardzo różnych warunków pracy, co upodabnia proces obliczeń do rzeczywistych warunków eksploatacji. Biorąc pod uwagę wady i zalety obu rodzajów optymalizacji, zainstalowano w programie OHIO algorytm optymalizacji jednokryterialnej a w programie MOSUW, dla porównania, algorytm optymalizacji wielokryterialnej.

Problemy finansowe występujące przy realizacji omawianych prac dotyczą zwykle trudności z zaplanowaniem przewidywanych kosztów. Prace tego rodzaju mają charakter innowacyjny a nie rutynowy i w znacznym stopniu aplikacyjny a nie jedynie teoretyczny, i – jak wykazano wyżej – nie można na ich początku przewidzieć wszystkich problemów, które pojawia się już w trakcie realizacji i które muszą być rozwiązane, aby wymagane wdrożenie zakończyło się powodzeniem. Stąd konieczność dużej elastyczności tak w planowaniu, jak i w realizacji wydatków, co jest trudne do urzeczywistnienia w obecnym krajowym systemie przyznawania środków na projekty badawcze, szczególnie w sytuacji, gdy te środki są bardzo ograniczone. Wydaje się jednak, że ta niekorzystna sytuacja zaczyna powoli się zmieniać w związku z coraz szerszym dostępem do środków finansowych Unii Europejskiej, które są znacznie większe.

8. Uwagi końcowe

Istotnym problemem w rozwoju informatyzacji w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych jest obecna słaba współpraca jednostek badawczych z gospodarką. Nie istnieją obecnie mechanizmy zachęcające przedsiębiorstwa do wspierania prac badawczo-rozwojowych. Niskie nakłady budżetowe na naukę i wynikające stąd niskie wynagrodzenia w placówkach badawczych oraz brak jasnych priorytetów badawczych skoordynowanych z potrzebami i możliwościami gospodarki doprowadziły do znacznego osłabienia infrastruktury badawczej, co już spowodowało i w dalszym ciągu powoduje znaczny odpływ kadry z tego sektora. Celem strategicznym jest zatem rozwijanie konkurencyjnej gospodarki opartej na wiedzy i przedsiębiorczości i pozostającej w ścisłej współpracy z sektorem nauki. Są do tego niezbędne odpowiednie programy badawcze o charakterze aplikacyjnym, finansowane lub współfinansowane przez państwo, gdyż same przedsiębiorstwa z jednej strony nie są w stanie ponosić stosunkowo wysokich kosztów związanych z kompleksową informatyzacją a drugiej strony nie mają jeszcze wystarczającego przekonania do celowości prowadzenia takich prac. Stąd pomoc państwa jest tu bezwzględnie potrzebna.

Należy ponownie podkreślić, że efektywna informatyzacja przedsiębiorstwa wspomagająca zarządzanie nim na podstawie gromadzonych i odpowiednio przetwarzanych informacji wymaga ścisłej i długotrwałej współpracy osób o bardzo różnych kwalifikacjach, czyli zespołów interdyscyplinarnych składających się z pracowników nauki różnych specjalności i praktyków z doświadczeniem branżowym, a więc kadry technicznej przedsiębiorstwa. Dlatego, pomijając nawet sprawy finansowe, nie jest praktycznie możliwe, aby tak złożone prace mogły być wykonane w sposób właściwy jedynie siłami przedsiębiorstwa lub jedynie przez zewnętrzne zespoły pracowników naukowych. To z kolei rodzi określone problemy organizacyjne i logistyczne związane ze stworzeniem i kierowaniem odpowiednim zespołem.

Podsumowując, problemy finansowe, brak odpowiedniej wiedzy po stronie przedsiębiorstw o korzyściach z kompleksowej informatyzacji oraz trudności organizacyjne są główną przyczyną mizernego dotychczas stanu tej informatyzacji w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych. Aby ten stan poprawić, są niezbędne państwowe duże programy badawcze zorientowane na zaspakajanie określonych potrzeb gospodarki. Przyniosą one korzyść nie

tylko przedsiębiorstwom, ale również instytutom naukowym znajdującym się od kilkunastu lat w stanie permanentnej wegetacji. Również konieczne jest organizowanie nie tylko krajowych, ale również międzynarodowych, bilateralnych programów badawczych, poza tymi istniejącymi w ramach Unii Europejskiej, co pozwoli na korzystanie z bogatego doświadczenia zagranicznych instytutów naukowych. Takich programów obecnie nie ma.

W raporcie przedstawiono możliwości wykorzystania informacji, pozyskiwanych z systemu monitoringu i branżowej bazy danych zintegrowanej z programem mapy numerycznej, do wspomagania zarządzania przedsiębiorstwem wodociągowym, w tym w szczególności usprawnienia eksploatacji sieci wodociągowej, która stanowi główny obiekt wodociągowy. Jest to możliwe poprzez zintegrowanie pracy systemów monitoringu i mapy numerycznej w ramach jednolitego kompleksowego systemu informatycznego wspomagania decyzji. Taka integracja pozwala na lepsze wykorzystanie informacji dostarczanych przez oba systemy i lepsze wykorzystanie wiedzy o przedsiębiorstwie i jego obiektach zgromadzonej w bazach tych systemów.

Przedstawiono także dokładny opis programu obliczeń i optymalizacji sieci wodociągowej, opracowany w Instytucie Badań Systemowych PAN. Program jest wdrażany, testowany i stosowany w wodociągach rzeszowskich do operacyjnego sterowania siecią wodociągową. Doświadczenia wynikające z wdrożenia a także z porównań programu OHIO z innymi dostępnymi programami obliczeń sieci wodociągowych były i są przyczyną ciągłego rozwijania i udoskonalania programu. Wynikiem tych doświadczeń jest między innymi:

- zastosowanie algorytmu *Crossa* do rozwiązywania równań sieci wodociągowej
- opracowanie algorytmu wyznaczania optymalnej kombinacji niezależnych obwodów grafu sieci
- opracowanie algorytmu dwustopniowej optymalizacji parametrów sieci wodociągowej z wykorzystaniem metody optymalizacji jednokryterialnej
- opracowanie przejrzystej i wygodnej dla użytkownika struktury pliku danych wejściowych
- opracowanie bardzo przyjaznego użytkownikowi interfejsu
- opracowanie systemu sygnalizacji kolorami wartości ciśnień i przepływów w sieci.

Wydaje się, że takie postępowanie doprowadziło do powstania programu bardzo efektywnego i jednocześnie prostego i łatwego w obsłudze. Na przykład dostępny w Internecie program EPANET nie dysponuje algorytmem optymalizacji i jednocześnie ma bardzo skomplikowaną strukturę pliku danych wejściowych.

Przedstawiono również opis i strukturę zintegrowanego systemu informatycznego zaprojektowanego do kompleksowego zarządzania miejską siecią wodociągową, problemy, jakie powstają przy tego typu pracach o charakterze badawczo-rozwojowym, a także zmiany organizacyjne, jakie wdrażanie takiego systemu wymusza w badanym przedsiębiorstwie. Przedstawiony system nie jest jeszcze zakończony i jego rozbudowa ciągle trwa, w znacznym stopniu prowadzona już samodzielnie przez przedsiębiorstwo wodociągowe, w szczególności w zakresie rozbudowy systemu monitoringu oraz aktualizacji mapy numerycznej sieci wodociągowej.

Prace badawczo-rozwojowe związane z tworzeniem wspomnianego systemu informatycznego są jeszcze dalekie od zakończenia a ich ostatecznym celem jest stworzenie kompleksowego systemu obejmującego swym działaniem wszystkie obiekty przedsiębiorstwa, a więc również stację ujęcia i uzdatniania wody, sieć kanalizacyjną i oczyszczalnię ścieków.

Literatura

Barski A.: *Algorytm wyznaczania oczek w sieci wodociągowej.* Raport Badawczy IBS PAN, Raport RB 09 2008, Warszawa 2008.

Bogdan L.: *Some properties of kriging calculations for environmental measurements data.* Proceedings of the ASIS 2007 Conference. Brno 2007.

Bogdan L., Karczmarska 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, 157-169.

Bogdan L., Studzinski J.: *Modeling of water pressure distribution in water nets using the kriging algorithms.* In: Industrial Simulation Conference ISC'2007 (J. Ottjes and H. Vecke, eds.), June 11-13, 2007, Delft, TU Delft Netherlands, 52-56.

Karczmarska D.: *Uruchomienie komputerowego systemu wspomagania decyzji projektanta i operatora sieci wodociągowej w Rzeszowie.* Raport badawczy IBS PAN nr 11B/2007, Warszawa 2007.

Karczmarska D.: *Stan komputeryzacji wybranych wodociągów krajowych w zakresie systemów monitoringu, mapy numerycznej i obliczeń hydraulicznych do celów eksploatacji i prac projektowych sieci wodociągowych.* IBS PAN, Raport RB 11 2008, Warszawa 2008.

Karczmarska D., Studziński J.: *Restrukturyzacja przedsiębiorstwa wodociągowego wymuszana wdrażaniem zintegrowanego systemu informatycznego zarządzania.* Raport Badawczy IBS PAN i MPWiK Rzeszów, Warszawa-Rzeszów 2008.

Pawlak A.: *OHIO – aplikacja do modelowania i optymalizacji systemu dystrybucji wody.* IBS PAN, Raport RB 04 2007, Warszawa 2007.

Posiak K. (2008) *Wdrażanie, eksploatacja i rozwój sieci komputerowej w Miejskim Przedsiębiorstwie Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie.* Raport Badawczy IBS PAN i MPWiK Rzeszów, Warszawa-Rzeszów 2008.

Rojek I.: *Projektowanie systemu informatycznego zarządzania miejską siecią wodociągową.* PAN IBS, Seria Badania Systemowe / Inżynieria Środowiska, Warszawa 2008.

Straubel R., Holznagel B.: *Mehrkriteriale Optimierungen für Planung und Steuerung von Trink- und Abwasser-Verbundsystemen.* W: Problemy monitoringu i automatyzacji oczyszczalni ścieków bytowo-gospodarczych. PZIiTS, Oddział w Poznaniu, Ustronie Morskie 1998, 30-42.

Straubel R., Studzinski J.: *Computer aided planning and operating of the water networks in Königs Wüsterhausen and Rzeszow.* Proceedings of the 4th International Conference in Water Supply and Quality (M.M. Sozanski, Ed.), Krakow 2000.

Straubel R., Studzinski J.: *Computer aided planing and operating of the water networks in Koenigs-Wusterhausen and Rzeszow.* Proceedings of 4th International Conference in Water Supply and Quality, Ed. M.M. Sozański, Kraków 2000, 43-54.

Studzinski J.: Problemy zarządzania informacją w miejskim przedsiębiorstwie wodociągowym. *Kongres Zarządzania Wiedzą*, Ciechocinek, styczeń 2006.

Studziński J.: *Modelowanie, optymalizacja i sterowanie miejskich sieci wodociągowych.* IBS PAN, Raport RB G54/07/2007, Warszawa 2007.

Studzinski J.: *Zastosowanie danych z monitoringu w systemie zarządzania miejską siecią wodociągową.* Studia i Materialy PSZW (W. Bojar, red.) tom 9, PSZW Bydgoszcz 2007, 154-164.

Studzinski J.: *Wspomaganie zarządzania miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym za pomocą informacji z systemów monitoringu i mapy numerycznej.* Studia i Materiały PSZW, Bydgoszcz, vol. 14, 2008, 100-115.

Studzinski J., Bogdan L.: *Application of kriging algorithms for environmental and engineering parameters approximation.* In: O. Hryniewicz, J. Studzinski, M. Romaniuk (eds.) Environmental Informatics and Systems Research, EnviroInfo'2007 Conference, Warsaw, 12-14 September 2007, Vol. 1, Shaker Verlag Aachen, 185-192.

Studziński J., Karczmarska D., Popek J.: Uwagi o wdrożeniu, eksploatacji i propozycjach rozbudowy GIS-Geomedia w wodociągach rzeszowskich. W: *Eksploatacja wodociągów i kanalizacji: GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi*, t. 7, PZSIiTS, Warszawa 2005, 117-128.

Studziński J., Straszak A. (red.): *Ekspertyza w zakresie wykorzystywania modeli matematyczno-systemowych w zakresie zarządzania środowiskiem.* IBS PAN, Warszawa 2007, stron 118.

Studzinski J., Straubel R.: *Optymalizacja i sterowanie miejskiej sieci wodociągowej na podstawie modeli matematycznych.* Studia i Materialy PSZW (W. Bojar, red.) tom 10, PSZW Bydgoszcz 2007, 181-191.

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

Żyła A. (2008) *System monitorowania sieci i obiektów wodociągowych w MPWiK Rzeszów.* Raport Badawczy IBS PAN i MPWiK Rzeszów, Warszawa-Rzeszów 2008.